

# Die Bedeutung der Elementarisierung für den Erfolg von Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I

DISSERTATION

zur  
Erlangung des Grades  
„Doktor der Naturwissenschaften“

an der Fakultät für Physik und Astronomie  
der Ruhr-Universität Bochum

von  
Marco Seiter

aus  
Unna

Bochum 2021

1. Gutachter: Prof. Dr. Heiko Krabbe
2. Gutachter: Prof. Dr. Ulrich Köhler

Tag der Disputation: 03.02.2022

# Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich in den letzten Jahren bei meinem Promotionsprojekt unterstützt haben und ohne die der erfolgreiche Abschluss dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Es folgt ein expliziter Dank an die wichtigsten Personen.

Ich bedanke mich bei meinem Betreuer und Doktorvater **Heiko Krabbe** dafür, dass er mich in die Arbeitsgruppe geholt hat und mich in meiner Promotion immer weiter vorangetrieben hat.

Ich bedanke mich bei meinem Zweitbetreuer **Ulrich Köhler** für seine Zeit und Unterstützung.

Ich bedanke mich bei **Thomas Wilhelm** dafür, dass er mir immer beratend zur Seite stand und sich stets Zeit für Fragen genommen hat. In Verbindung damit bedanke ich mich auch bei dem **Institut für Didaktik der Physik** an der Goethe-Universität Frankfurt am Main für die finanzielle sowie personelle Unterstützung, ohne die das Projekt in seinem Umfang und seiner Tiefe nicht realisierbar gewesen wäre.

Ich bedanke mich bei meiner Freundin und Arbeitskollegin **Carina Wöhlke**, die immer ein offenes Ohr für mich hatte, sei es zu inhaltlichen Aspekten der Arbeit oder einfach zum Meckern oder Jammern, wenn ich an einer Stelle mal nicht weiterwusste.

Ich bedanke mich bei meinem Arbeitskollegen **Rainer Wackermann**, der sich stets darauf verstand, mich mit gezielten Fragen oder Anmerkungen zum Nachdenken anzuregen.

Ich bedanke mich bei meiner Hilfskraft **Valerie Vogel**, die mich bei der Datenerhebung und -auswertung in hohem Maße unterstützt und vielen Stunden mit dem Ausfüllen von Excel Tabellen oder der Durchführung von Testungen an Schulen verbracht hat.

Ich bedanke mich bei meiner besten Freundin und Verlobten **Line Steffens** für die emotionale Unterstützung und für ihre Art mich unentwegt zu motivieren, egal zu welcher Tages- und Nachtzeit.

---

Ich bedanke mich bei meinen **Eltern** für ihren festen Glauben an mich und meine Ziele, bei deren Verfolgung sie mich immer bestärkt haben.

Ich bedanke mich bei meinem Physiklehrer und Vorbild **Heinz Sändker**, der mich in meiner Schulzeit wie kein anderer für das Fach Physik begeistert hat. Ich hoffe, in Zukunft ein mindestens genauso guter Lehrer zu werden wie er.

Ich bedanke mich bei allen **LehrerInnen und SchülerInnen**, die am Projekt teilgenommen haben.

Es sei auch allen Personen und Institutionen, die ich nicht namentlich genannt habe, abschließend gedankt.

**Euch allen nochmals vielen herzlichen Dank, ich habe viel von euch gelernt!**

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Danksagung</b>                                                          | <b>IV</b> |
| <b>Abstract</b>                                                            | <b>IX</b> |
| <b>Abstract (english)</b>                                                  | <b>XI</b> |
| <b>1 Einleitung</b>                                                        | <b>1</b>  |
| <b>I Theorieteil</b>                                                       | <b>5</b>  |
| <b>2 Fachdidaktischer Hintergrund</b>                                      | <b>7</b>  |
| 2.1 Elementarisierung . . . . .                                            | 7         |
| 2.1.1 Aspekte der Elementarisierung . . . . .                              | 7         |
| 2.1.2 Kriterien der Elementarisierung . . . . .                            | 9         |
| 2.1.3 Modellierung des Prozesses der Elementarisierung . . . . .           | 10        |
| 2.2 Modell der didaktischen Rekonstruktion . . . . .                       | 12        |
| <b>3 Fachliche Grundlage der Mechanik</b>                                  | <b>15</b> |
| 3.1 Kinematik eines Massenpunktes . . . . .                                | 15        |
| 3.2 Dynamik: Die drei Newton'schen Axiome . . . . .                        | 17        |
| <b>4 Stand der Forschung</b>                                               | <b>21</b> |
| 4.1 SchülerInnenvorstellungen in der Mechanik . . . . .                    | 21        |
| 4.1.1 SchülerInnenvorstellungen in der Kinematik . . . . .                 | 22        |
| 4.1.2 SchülerInnenvorstellungen in der Dynamik . . . . .                   | 23        |
| 4.2 Evaluationsstudien zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept . . | 26        |
| 4.2.1 Überblick über die bisherigen Evaluationsstudien . . . . .           | 26        |
| 4.2.2 Elementarisierungen der Mechanik . . . . .                           | 35        |
| 4.2.2.1 Elementarisierung von Jung et al. . . . .                          | 35        |
| 4.2.2.2 Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner . . . . .                | 39        |
| 4.2.2.3 Elementarisierung von Wilhelm . . . . .                            | 46        |
| 4.2.3 Begründungen der Elementarisierungen . . . . .                       | 50        |
| 4.2.4 Einschränkungen der bisherigen Studien . . . . .                     | 54        |
| 4.2.4.1 Einschränkungen in Tobias (2010) . . . . .                         | 54        |

|           |                                                                                                |           |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.4.2   | Einschränkungen in Jung & Callsen (1976) . . . . .                                             | 56        |
| 4.2.4.3   | Einschränkungen in Wilhelm (2005) . . . . .                                                    | 56        |
| 4.2.4.4   | Einschränkungen in Amenda (2017) . . . . .                                                     | 57        |
| <b>5</b>  | <b>Offene Fragen der bisherigen Forschung und Entwicklung der Forschungsfragen</b>             | <b>59</b> |
| 5.1       | Offene Fragen . . . . .                                                                        | 59        |
| 5.2       | Entwicklung der Forschungsfragen . . . . .                                                     | 60        |
| <b>II</b> | <b>Empirischer Teil</b>                                                                        | <b>65</b> |
| <b>6</b>  | <b>Methode</b>                                                                                 | <b>67</b> |
| 6.1       | Forschungsdesign . . . . .                                                                     | 67        |
| 6.2       | Stichprobe . . . . .                                                                           | 70        |
| 6.3       | Instrumente und erfasste Variablen . . . . .                                                   | 72        |
| 6.4       | Validierungslogik . . . . .                                                                    | 76        |
| 6.4.1     | Argument-based-approach nach Kane . . . . .                                                    | 76        |
| 6.4.2     | Validierungslogik für die Mechanikstudie . . . . .                                             | 77        |
| 6.5       | Diskussion der Übersetzungsschritte aus der Validierungslogik . . . . .                        | 91        |
| 6.5.1     | Diskussion der Argumente zur Ebene der Mechanikkonzepte . . . . .                              | 91        |
| 6.5.1.1   | Modell zu Elementarisierungen der Mechanik (Argument 1.1) . . . . .                            | 91        |
| 6.5.1.2   | Elementarisierung der 1D-Adaption (Argument 1.2) . . . . .                                     | 93        |
| 6.5.1.3   | Zusammenfassung der Elementarisierungen . . . . .                                              | 97        |
| 6.5.2     | Diskussion der Argumente zur Ebene der Mechaniklehrgänge . . . . .                             | 99        |
| 6.5.2.1   | Themenstruktur der Mechaniklehrgänge (Argument 2.1) . . . . .                                  | 99        |
| 6.5.2.2   | Material der Mechaniklehrgänge (Argument 2.2) . . . . .                                        | 101       |
| 6.5.3     | Diskussion der Argumente zur Ebene des Unterricht . . . . .                                    | 105       |
| 6.5.3.1   | Lernprozessstruktur (Argument 3.1) . . . . .                                                   | 105       |
| 6.5.3.2   | Unterrichtszeit (Argument 3.2) . . . . .                                                       | 106       |
| 6.5.3.3   | Bearbeitungsumfang der Workbookaufgaben (Argument 3.3) . . . . .                               | 107       |
| 6.5.4     | Diskussion der Argumente zur Ebene der Performanz . . . . .                                    | 108       |
| 6.5.4.1   | Korrektheit der bearbeiteten Workbookaufgaben (Argument 4.2) . . . . .                         | 108       |
| 6.5.5     | Diskussion der Argumente zur Ebene der Testwerte . . . . .                                     | 109       |
| 6.5.5.1   | Itemkonstruktion und -auswahl zur Abbildung der Interventionseinhalte (Argument 5.1) . . . . . | 109       |
| 6.5.5.2   | Abbildung von Lernzuwächsen durch den Fachwissenstest (Argument 5.2) . . . . .                 | 115       |
| 6.5.5.3   | Latente Struktur des Fachwissenstests (Argument 5.3) . . . . .                                 | 118       |
| 6.5.6     | Abschließende Diskussion der Folge von Übersetzungsschritten . . . . .                         | 122       |

|            |                                                                                                    |            |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b>   | <b>Ergebnisse</b>                                                                                  | <b>125</b> |
| 7.1        | Rasch-Skalierung der Daten aus dem Fachwissenstest . . . . .                                       | 125        |
| 7.1.1      | Skalierung der Prätestergebnisse . . . . .                                                         | 126        |
| 7.1.2      | Bestimmung der Anker-Items . . . . .                                                               | 128        |
| 7.1.3      | Bestimmung der Personenfähigkeiten im Posttest . . . . .                                           | 131        |
| 7.2        | Mehrebenenanalyse . . . . .                                                                        | 133        |
| 7.3        | Lernzuwächse innerhalb der Treatmentgruppen . . . . .                                              | 136        |
| 7.3.1      | Lernzuwachs in der 1D-Adaption . . . . .                                                           | 136        |
| 7.3.2      | Lernzuwachs im 2DD-Mechanikkonzept . . . . .                                                       | 138        |
| 7.4        | Vergleich der beiden Treatmentgruppen . . . . .                                                    | 140        |
| 7.5        | Auswertung nach klassischer Testtheorie . . . . .                                                  | 144        |
| 7.6        | Bildung von Leistungsklassen . . . . .                                                             | 147        |
| 7.7        | Einzelitemanalyse . . . . .                                                                        | 154        |
| 7.8        | Einfluss der Kontrollvariablen . . . . .                                                           | 170        |
| 7.8.1      | Einflüsse auf der Individualebene . . . . .                                                        | 170        |
| 7.8.2      | Einflüsse auf der Klassenebene . . . . .                                                           | 171        |
| 7.9        | Analyse der Gesamtschulklassen . . . . .                                                           | 172        |
| <b>8</b>   | <b>Diskussion</b>                                                                                  | <b>173</b> |
| 8.1        | Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .                                                        | 173        |
| 8.1.1      | Forschungsfrage 1: Lernzuwachs innerhalb der beiden Treatment-<br>gruppen . . . . .                | 173        |
| 8.1.2      | Forschungsfrage 2: Unterschiede im Lernzuwachs zwischen den bei-<br>den Treatmentgruppen . . . . . | 175        |
| 8.2        | Diskussion der Kontrollvariablen . . . . .                                                         | 175        |
| 8.3        | Methodische Diskussion . . . . .                                                                   | 177        |
| 8.4        | Limitationen der Studie . . . . .                                                                  | 178        |
| <b>III</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                                                | <b>183</b> |
| <b>9</b>   | <b>Zusammenfassung</b>                                                                             | <b>185</b> |
| <b>10</b>  | <b>Ausblick</b>                                                                                    | <b>189</b> |
|            | <b>Literaturverzeichnis</b>                                                                        | <b>191</b> |
|            | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                                                       | <b>197</b> |
|            | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                                                         | <b>199</b> |

|                                                                           |            |
|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>IV Anhang</b>                                                          | <b>201</b> |
| <b>A Datenauswertung</b>                                                  | <b>203</b> |
| A.1 Rasch-Analyse . . . . .                                               | 203        |
| A.2 Interferenzstatistische und varianzanalytische Auswertungen . . . . . | 205        |
| A.2.1 t-Test . . . . .                                                    | 205        |
| A.2.2 Mann-Whitney U-Test . . . . .                                       | 207        |
| A.2.3 ANOVA bzw. ANCOVA . . . . .                                         | 208        |
| A.2.4 Bootstrapping . . . . .                                             | 209        |
| A.2.5 Bonferroni-Holm-Korrektur . . . . .                                 | 209        |
| A.3 Latente Klassenanalyse . . . . .                                      | 210        |
| A.4 Mehrebenenanalyse . . . . .                                           | 211        |
| <b>B Statistische Tabellen</b>                                            | <b>213</b> |
| <b>C Interventionsmaterial</b>                                            | <b>227</b> |
| C.1 SchülerInnenhefte . . . . .                                           | 227        |
| C.2 Workbooks . . . . .                                                   | 253        |
| C.3 Unterrichtsverlaufspläne . . . . .                                    | 309        |
| <b>D Fachwissenstest zu Kraft und Bewegung</b>                            | <b>335</b> |
| <b>E Liste der digitalen Anlagen der vorliegenden Arbeit</b>              | <b>351</b> |
| <b>F Liste der aus der Dissertation hervorgegangenen Publikationen</b>    | <b>353</b> |
| <b>G Lebenslauf</b>                                                       | <b>355</b> |

# Abstract

Die Newton'sche Mechanik stellt für viele SchülerInnen eines der schwierigsten Inhaltsgebiete dar. Selbst nach dem Unterricht verfügen diese oft nicht über ein adäquates Verständnis und weisen in diesem Inhaltsgebiet besonders viele und stabile SchülerInnenvorstellungen auf. Aufgrund dieser Problematik wurden verschiedene alternative Zugänge für den Unterricht zur Newton'schen Mechanik entwickelt. Einen dieser Zugänge bildet das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept, welches in unterschiedlichen Ausführungen für die Sekundarstufe I und II immer im Vergleich zu „konventionellem“ Mechanikunterricht positiv evaluiert und dabei fortlaufend überarbeitet wurde. In allen bisherigen Studien wurden neben der Elementarisierung weitere Parameter wie beispielsweise der Medieneinsatz verändert oder die Treatmentgruppe mit zusätzlichen, aufgearbeiteten Materialien unterstützt, so dass die positiven Effekte nicht ausschließlich der veränderten Elementarisierung zugeschrieben werden können. Weitere Einschränkungen bestehen in der unklar definierten Kontrollgruppe in Form des „konventionellen“ Mechanikunterrichts und der potenziellen Bevorzugung der Treatmentgruppe durch die Testinstrumente.

Die Studie in dieser Arbeit untersucht den isolierten Effekt der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen im Mechanikunterricht der Sekundarstufe I, indem dem aktuellsten zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept nach Wiesner (2DD-Mechanikkonzept) eine standardisierte Vergleichsgruppe in Form einer eindimensional-dynamischen Adaption (1D-Adaption) gegenübergestellt wird, die es erlaubt, alle übrigen Einflussfaktoren konstant zu halten. Damit können zum einen die positiven Ergebnisse der bisherigen Studien überprüft werden. Zum anderen wird aber auch ein Beitrag zur Grundlagenforschung geleistet, indem Einblick in den Einfluss von Elementarisierungen auf den Lernzuwachs der SchülerInnen gegeben wird.

Die Studie fand in den Schuljahren 2019/20 und 2020/21 statt. Hierbei unterrichteten 27 Lehrkräfte in 56 Klassen nach den beiden Mechanikkonzepten. Die Studie verlief in beiden Treatmentgruppe inklusive Materialien und Testungen nach dem gleichen Schema, wobei der einzige Unterschied in der Elementarisierung bestand.

In beiden Treatmentgruppen konnte ein höchst signifikanter Lernzuwachs in der Größenordnung eines LehrerInneneffekts nachgewiesen werden. Vergleicht man den Lernzuwachs zwischen den Treatmentgruppen lässt sich kein Unterschied feststellen. In dieser Studie hat also der Unterschied in den Elementarisierungen keinen Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen. Des Weiteren zeigt sich in beiden Gruppen keine Varianz im Lernzuwachs auf der Klassenebene. Dies führt insbesondere zu dem Ergebnis, dass die coronabedingt online unterrichteten Klassen ebenso gut dazugelernt haben wie die im Präsenzunterricht.



# Abstract (english)

Newtonian mechanics is one of the most difficult content areas for many students. Even after instruction, they often do not have adequate comprehension and have particularly many and stable preconceptions in this content area. Because of this problem, various alternative approaches for teaching Newtonian mechanics were developed. One of these approaches is the two-dimensional dynamic mechanics concept, which in different versions for secondary level I and II has always been positively evaluated in comparison to “conventional” instructions and has been continuously revised. In all previous studies, in addition to educational reconstruction, other parameters such as the use of media were changed or the treatment group was supported with additional, processed materials, so that the positive effects cannot be ascribed exclusively to the changed educational reconstruction. Further restrictions exist in the unclearly defined control group in the form of “conventional” instructions and the potential preference given to the treatment group by the test instruments.

The study in this thesis examines the isolated effect of educational reconstruction on the learning progress of the students in mechanics at lower secondary school by using a standardized comparison group in the form of a one-dimensional dynamic adaptation (1D adaptation) of the current two-dimensional dynamic mechanics concept according to Wiesner (2DD mechanics concept), which allows all other influencing factors to be kept constant. On the one hand, this allows the positive results of previous studies to be checked. On the other hand, it also makes a contribution to basic research by providing an insight into the influence of educational reconstructions on the learning progress of students.

The study took place in the school years 2019/20 and 2020/21. Here, 27 teachers taught in 56 classes according to the two mechanical concepts. The study was carried out in both treatment groups, including materials and tests, according to the same scheme, the only difference being educational reconstruction.

In both treatment groups, a highly significant increase in learning progress in the order of magnitude of a teacher effect could be demonstrated. If the learning progress between the treatment groups is been compared, no difference can be found. In this study, the difference in educational reconstructions has no influence on the learning progress of the students. Furthermore, there is no variance in the learning progress at the class level in either group. This leads in particular to the result that the corona-related classes taught online have learned just as well as those in classroom teaching.



# 1 Einleitung

SchülerInnen bringen aus ihrem Alltag viele Erfahrungen mit mechanischen Vorgängen in Form von stabilen SchülerInnenvorstellungen mit in den Mechanikunterricht der Sekundarstufe I (Clement, 1982; Nachtigall, 1986; Schecker, 1975; Schecker et al., 2018), welche in vielen Fällen auch noch nach dem Unterricht bei den SchülerInnen nachgewiesen werden können. Allein dies macht die Newton'sche Mechanik zu einem schwierigen Inhaltsgebiet. Eine weitere Problematik ergibt sich beim „konventionellen“<sup>1</sup> Mechanikunterricht dadurch, dass der Kraftbegriff in der Regel über die Statik eingeführt wird. Diese ungünstige Sachstruktur kann dazu führen, dass keine adäquate Verbindung zwischen den Begriffen der Kinematik und Dynamik hergestellt wird, was wiederum zu Lernschwierigkeiten und SchülerInnenvorstellungen führen kann (Schecker et al., 2018; Wilhelm, 2018). Problematisch sind aber auch abstrakte Darstellungsformen von Bewegungen in Form von  $s(t)$ –,  $v(t)$ –, und  $a(t)$ –Diagrammen, wenn sie zu früh im Unterricht eingeführt werden (Wilhelm, 2018). Die eben genannten Gründe können dazu führen, dass die SchülerInnen auch nach dem Unterricht nicht über ein adäquates Verständnis besonders im Hinblick auf den physikalischen Kraftbegriff verfügen.

Um diesem Problem entgegenzuwirken wurden verschiedenen alternative Elementarisierungen zur Newton'schen Mechanik entwickelt, darunter das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept (Jung et al., 1977; Wilhelm, 2005; Wodzinski & Wiesner, 1994a, 1994b, 1994c), und im Vergleich zu „konventionellem“ Mechanikunterricht positiv evaluiert (Jung & Callsen, 1976; Tobias, 2010; Wilhelm, 2005), wobei unklar bleibt, welchen Effekt die Elementarisierung allein auf den Lernzuwachs der SchülerInnen hat. Die bisherigen Studien waren stets so aufgebaut, dass die Treatmentgruppe nach einem aufbereiteten Mechaniklehrgang unterrichtet wurde, welcher sich neben der Elementarisierung auch in der Unterrichtsstruktur sowie im Medieneinsatz vom Unterricht in der Kontrollgruppe unterschieden hat. Insgesamt bleibt der „konventionelle“ Mechanikunterricht der Kontrollgruppe in den Arbeiten unklar definiert, indem zum Beispiel offen bleibt, welcher Zugang zum Kraftbegriff (statisch oder dynamisch) gewählt wurde. Weitere Einschränkungen in Bezug auf die Vergleichbarkeit von Treatment- und Kontrollgruppe bestehen darin, dass die Lehrkräfte der Treatmentgruppe stets mit zusätzlichen Materialien unterstützt wurden und die Treatmentgruppe potenziell durch die eingesetzten Testinstrumente bevorzugt wurde. Es ergeben sich somit eine ganze Reihe von potenziell konfundierten Variablen, welche Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen und somit auf die positiven Ergebnisse der alternativen Elementarisierungen haben könnten. Es kann also nicht valide

---

<sup>1</sup>Aufgrund der unklaren Definition, wird das Wort „konventionell“ in der gesamten Arbeit stets in Anführungsstriche gesetzt, da keine der hier vorgestellten Studien eine genauere Definition liefert.

von den positiven Ergebnissen der Studien auf einen Effekt der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen geschlossen werden.

Aus den eben genannten Einschränkungen der bisherigen Studien ergibt sich die übergeordnete Forschungsfrage dieser Arbeit:

- Welchen Effekt hat die (isolierte) Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen (im Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I)?

Durch die Beantwortung können sowohl die Ergebnisse der bisherigen Studien erneut bestätigt werden und es wird ein Beitrag zur Grundlagenforschung geliefert. Zur Beantwortung dieser übergeordneten Forschungsfrage wird als Ausgangspunkt das 2DD-Mechanikkonzept aus der Arbeit von Tobias (2010) gewählt, da dieses zum Zeitpunkt dieser Arbeit die aktuellste Studie zur Elementarisierung der Mechanik in der Sekundarstufe I bildet und durch die diversen Vorarbeiten bereits vielseitig empirisch erforscht und positiv bewertet wurde. Diesem Konzept wird als Vergleichsgruppe eine 1D-Adaption gegenübergestellt, welche sich bezogen auf die Elementarisierung in eindeutig benennbaren Parametern vom 2DD-Mechanikkonzept unterscheidet, gleichzeitig aber ein Konstanthalten aller anderen Gestaltungsmerkmale ermöglicht. Daraus ergeben sich schließlich die beiden Forschungsfragen dieser Arbeit:

1. In welchem Umfang führt der Unterricht nach den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) in beiden Treatmentgruppen zu einem Lernzuwachs der SchülerInnen in der Sekundarstufe I?
2. Welche Unterschiede im Lernzuwachs bei den SchülerInnen gibt es zwischen dem Unterricht nach den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) in der Sekundarstufe I, wenn die anderen Gestaltungsmerkmale kontrolliert werden?

Für die Beantwortung der beiden Forschungsfragen ist die vorliegende Arbeit, wie folgt, gegliedert. Als Vorbereitung im Theorieteil wird zunächst in Kapitel 2 der fachdidaktische Hintergrund aufgearbeitet, indem der Begriff der Elementarisierung verbunden mit dem Modell der didaktischen Rekonstruktion eingeführt wird. Gleichzeitig wird an dieser Stelle durch die Einbeziehung des Verstehensmodells nach Drollinger-Vetter (2011) ein einheitliches Begriffsnetz für die gesamte Arbeit aufgebaut. Anschließend werden in Kapitel 3 die fachlichen Grundlagen der Mechanik zusammengefasst, da diese insbesondere Voraussetzung für das Verständnis der alternativen Elementarisierungen bilden. In Kapitel 4 wird der aktuelle Stand der Forschung in zwei Bereichen präsentiert. Zum einen werden die bekannten SchülerInnenvorstellungen zur Mechanik vorgestellt und zum anderen die bisherigen Forschungsarbeiten zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept zusammengefasst. Im Zuge dessen werden die verschiedenen alternativen Elementarisierungen der Mechanik vorgestellt und begründet sowie Einschränkungen in den bisherigen Evaluationsstudien herausgearbeitet. Die Einschränkungen werden in Kapitel 5 dazu verwendet offene Fragen in der fachdidaktischen Forschung zu benennen und schließlich die Forschungsfragen dieser Arbeit zu formulieren.

Im empirischen Teil dieser Arbeit werden zunächst in Kapitel 6 das Forschungsdesign, die Stichprobe sowie die eingesetzten Instrumente und erfasste Variablen erläutert. Hauptteil des Methodenkapitels bildet das Aufstellen einer Validierungslogik, welche die verschiedenen Übersetzungsschritte von den Fragestellungen dieser Arbeit hin zu den gemessenen Werten durch die eingesetzten Testinstrumente benennt. Diese Übersetzungsschritte sind mit gewissen Argumenten verbunden, welche im Verlauf des Kapitels diskutiert werden. In Kapitel 7 werden schließlich die Ergebnisse der empirischen Studie vorgestellt, die anschließend in Kapitel 8 diskutiert werden. In Kapitel 8 wird des Weiteren auch auf die Limitationen der Studie eingegangen. Den Abschluss der Arbeit bildet im dritten Teil die Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse in Kapitel 9 und der Ausblick in Kapitel 10. Zusätzlich findet sich im Anhang in Kapitel A ein Überblick über die eingesetzten statistischen Verfahren und Auswertungsmethoden.



# **Teil I**

## **Theorieteil**



## 2 Fachdidaktischer Hintergrund

Im ersten Teil dieser Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zur Elementarisierung und für das damit verbundene Modell der didaktischen Rekonstruktion zusammengefasst. Damit soll zum einen ein Überblick über das fachdidaktische Verständnis von diesem Gebiet gegeben und zum anderen ein einheitliches Begriffsverständnis beim Lesen der Arbeit gewährleistet werden.

### 2.1 Elementarisierung

Unter dem Begriff der Elementarisierung versteht man allgemein den Anpassungsvorgang von komplexen Gegenständen und Sachverhalten der fachlichen Physik auf das Auffassungsvermögen und die geistige Leistungsfähigkeit einer zu unterrichtenden Zielgruppe (z. B. SchülerInnen einer bestimmten Jahrgangsstufe oder Schulform) (vgl. Bleichroth et al., 1991, S. 95).

#### 2.1.1 Aspekte der Elementarisierung

Der Vorgang der Elementarisierung besteht nach Bleichroth et al. (1991, S. 95ff) aus den folgenden drei Aspekten:

1. Die Festlegung des Elementaren, das heißt des Kerns der Sache (z.B. ein Prinzip, eine grundlegende Idee oder ein Gesetz)
2. Die Vereinfachung (Verringerung des Niveaus und der Komplexität beispielsweise durch die Beschränkung auf qualitative Aussagen, Vernachlässigen von Einflussfaktoren oder die Überführung in bildhaft-symbolische Darstellungen)
3. Die Zerlegung in Elemente (d.h. die Zerlegung in methodische Schritte)

Die drei Aspekte sind, so betont Bleichroth et al. (1991, S. 98), nicht als eine vorgeschriebene Abfolge oder als verschiedene Arten von Elementarisierung zu verstehen. Beim Prozess der Elementarisierung müssen vielmehr alle drei Aspekte berücksichtigt werden. Diese drei Aspekte werden von Reinhold (2006) noch um einen vierten Aspekt, der (empirischen) Erprobung im Unterricht, ergänzt.

Im Unterschied zu den oben genannten Aspekten unterscheiden Wiesner et al. (2013, S. 72ff) beim Prozess der Elementarisierung verschiedene Schwerpunkte, welche von den gesetzten Zielen und den Voraussetzungen durch die Adressatengruppe abhängig sind:

- **Inhaltliche Elementarisierung:** Hierbei geht es um die Bestimmung der grundlegenden Aussage beziehungsweise der fundamentalen Idee eines Themas. Dies können allgemeine Gesetzmäßigkeiten (z.B. die Newton'sche Bewegungsgleichung) oder auch prototypische Phänomene für grundlegende physikalische Konzepte (z.B. die Energieerhaltung anhand eines Dynamos) sein. Dies entspricht der Festlegung des Elementaren bei Bleichroth et al. (1991).
- **Elementarisierung als Vereinfachung (didaktische Reduktion):** Hierunter versteht man die Anpassung der Inhalte an das Auffassungsvermögen und die geistige Leistungsfähigkeit der Zielgruppe durch Reduktion der Komplexität. Dies entspricht der Definition der Vereinfachung bei Bleichroth et al. (1991).
- **Methodische Elementarisierung:** Damit ist die Zerlegung des Lerngegenstandes in elementare Lernschritte gemeint, welche aufeinander aufbauend einer inneren Konsistenz folgen. Hierbei geht es zunächst um die Klärung, welches Vorwissen und welche Kompetenzen bereits bei den Lernenden vorhanden sind, um daraus die noch notwendigen Wissens Elemente (z.B. Begriffe, Gesetze oder Methoden) zu bestimmen. Dies entspricht der Zerlegung der Elemente bei Bleichroth et al. (1991).
- **Begriffliche Elementarisierung:** Im Gegensatz zur inhaltlichen Elementarisierung geht es hier um den Aufbau von übergeordneten Leitideen, die sich über einzelne Themen hinaus erstrecken (z.B. den Begriff der Wechselwirkung). Die so entstehenden Leitideen können flexibel auf neue Situationen oder Problemstellungen übertragen werden. Die begriffliche Elementarisierung unterscheidet sich von den anderen Schwerpunkten und der Definition der Elementarisierung bei Bleichroth et al. (1991) dadurch, dass es hier nicht um die Zerlegung in kleinere Einheiten, sondern um eine Zusammenfassung auf höherer Ebene geht.

Alle drei Aspekte von Bleichroth et al. (1991) finden sich bei Wiesner et al. (2013) wieder mit dem Unterschied, dass hier von Schwerpunkten und nicht von notwendigen Aspekten der Elementarisierung gesprochen wird.

In dieser Arbeit wird zur Diskussion und zum Vergleich von verschiedenen Elementarisierungen der begriffliche Rahmen von Wiesner et al. (2013) übernommen, da bei Verwendung dieser Begrifflichkeiten immer ein direkter Bezug zur Elementarisierung als Ganzes sichtbar und somit auch eine Anschlussfähigkeit an aktuellere fachdidaktische Literatur gegeben ist. Es wird also nicht von der Festlegung des Elementaren oder der Zerlegung in Elemente, sondern von der inhaltlichen bzw. methodischen Elementarisierung gesprochen. Diese werden allerdings als notwendige Aspekte im Sinne von Bleichroth et al. (1991) und nicht als mögliche Schwerpunkte einer Elementarisierung definiert. Es handelt sich bei den verschiedenen Aspekten um gleichwertige Ebenen. Die begriffliche Elementarisierung bildet eine Ausnahme, weil es sich hierbei um eine Zusammenfassung auf höherer Ebene über ein einzelnes Thema hinaus handelt. Da sich diese Arbeit auf den Themenbereich der Mechanik beschränkt ist eine Unterscheidung von verschiedenen begrifflichen Elementarisierungen nicht notwendig, weil keine übergeordneten Leitideen aufgebaut werden.

Wird im Folgenden also der Begriff Elementarisierung verwendet, sind, soweit nicht weiter differenziert, immer die inhaltliche und methodische Elementarisierung sowie die didaktische Reduktion gemeint.

### 2.1.2 Kriterien der Elementarisierung

Die Elementarisierung muss gewissen Kriterien genügen. Sie muss fachgerecht, adressatengerecht (schülerInnengerecht) und zielgerecht sein (Wiesner et al., 2013, S. 74ff). Kircher (2015, S. 111f) hingegen beziehen diese Kriterien nicht auf die Elementarisierung, sondern auf die didaktische Rekonstruktion (siehe Kap. 2.2) als Gesamtprodukt. Die Kriterien werden im Folgenden weiter ausgeführt (vgl. Kircher, 2015, S. 111ff):

- fachgerecht: Mit dem Kriterium ist gemeint, dass die Sinneinheiten der Elementarisierung keine grundlegend physikalisch falschen Aussagen enthalten dürfen. Aufgrund von didaktischer Reduktion (Vereinfachung) können oder sollen gerade nicht immer alle Aspekte einer Gesetzmäßigkeit oder eines Konzepts berücksichtigt werden. Entscheidend ist an dieser Stelle die Klärung der sogenannten fachlichen Relevanz. Es soll die Frage danach beantwortet werden, ob die Aussagen zwar nicht komplett fachlich richtig aber in der betrachteten Modellvorstellung oder Analogie als gültig erachtet werden können. Darüber hinaus muss eine Elementarisierung nach Jung (1973) anschlussfähig und erweiterbar sein. Die grundlegenden Bedeutungen müssen also erhalten bleiben, auch wenn im späteren Unterrichtsverlauf neue Begriffe oder Zusammenhänge hinzugefügt werden. Die Aneignungslogik stimmt dabei oft nicht mit der Sachlogik überein.
- adressatengerecht: Als nächstes Kriterium muss die Elementarisierung adressatengerecht (schülerInnengerecht) sein. Die Elementarisierung sollte möglichst auf dem Vorwissen und den Präkonzepten der SchülerInnen aufbauen sowie insbesondere vorhandene (inadäquate) Alltagsvorstellungen berücksichtigen. Des Weiteren soll die Elementarisierung auch motivational auf die SchülerInnen abgestimmt sein, indem zum Beispiel Bezüge zur Alltagswelt der SchülerInnen hergestellt werden.
- zielgerecht: Das letzte Kriterium ist, dass die Elementarisierung zielgerecht (didaktisch relevant) sein muss. Sie muss auf das Ziel des Unterrichts abgestimmt sein. Das Ziel von Physikunterricht muss nicht in allen Fällen die Vermittlung von Fachwissen sein. Kircher (2015, S. 28ff) spricht allgemein neben der fachlichen Dimension auch von der gesellschaftlichen (z.B. Verständnis der Natur der Naturwissenschaften oder Erkenntnisgewinnung) und der pädagogischen Dimension (z.B. humanes Lernen) des Physikunterrichts.

Eine Elementarisierung stellt keine isolierte Anwendung auf einzelne Begrifflichkeiten oder Themen der Physik dar (Wiesner et al., 2013, S. 77). Sie kann vielmehr als Teilprozess im Rahmen des übergeordneten Modells der didaktischen Rekonstruktion (siehe Kap. 2.2) verstanden werden.

### 2.1.3 Modellierung des Prozesses der Elementarisierung

Als Erweiterung zum Verständnis wird neben den oben genannten Aspekten und Kriterien im Folgenden der Prozess der Elementarisierung bezogen auf die Begriffs- und Konzeptbildung modelliert. Hierzu ist es zunächst notwendig den Verstehensprozess eines Begriffs oder Konzepts zu modellieren, um anschließend in diesem den Prozess der Elementarisierung einzuordnen.

Aus kognitionspsychologischer Sicht kann das Verstehen eines Begriffs oder Konzepts durch SchülerInnen wie folgt verstanden werden: „Elemente des Vorwissens müssen so miteinander verknüpft werden, dass - in mehrschichtigen Verdichtungsprozessen - eine fachlich passende kognitive Struktur konstruiert wird, die mit einer fachlich adäquaten Repräsentation vergegenwärtigt werden kann“ (Drollinger-Vetter, 2011, S. 186). Weiter bezeichnet Verstehen den Aufbau eines beweglichen, semantischen Netzwerkes bestehend aus Elementen und Verknüpfungen (Drollinger-Vetter, 2011, S. 197f). Dieser Prozess der Verdichtung kann durch das Verstehensmodell eines Konzepts nach Drollinger-Vetter (2011) in Abbildung 2.1 modelliert werden.

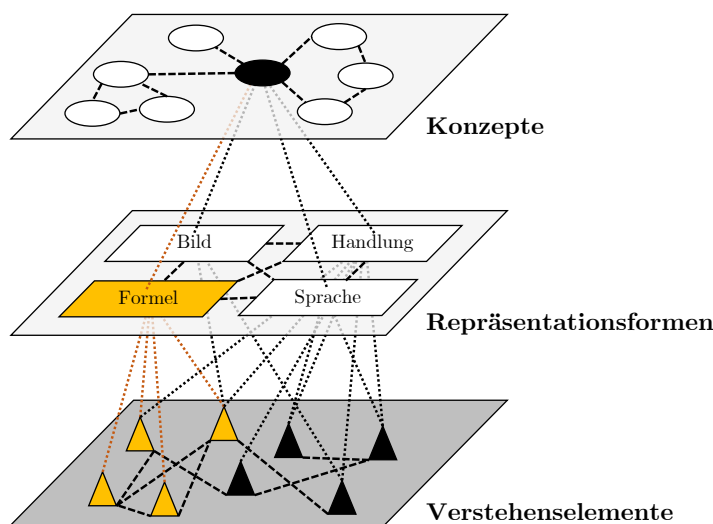


Abbildung 2.1: Verstehensmodell eines Konzepts (vgl. Drollinger-Vetter, 2011, S. 190) mit Elementarisierung (orange)

Der Verdichtungsprozess zum Verstehen eines Konzepts verläuft über die drei Ebenen der Verstehenselemente, Repräsentationsformen und Konzepte. Die niedrigsten Ebene bilden die Verstehenselemente. Diese bezeichnen die Teilelemente eines Konzepts, welche verstanden sein müssen, um dieses als Ganzes verstehen zu können (Drollinger-Vetter, 2011, S. 198). Die Verstehenselemente werden in Form von verschiedenen Repräsentationsformen verdichtet, welche sich schließlich zu vollständigen Konzepten verdichten lassen; von der anderen Perspektive aus kann das Modell auch so verstanden werden, dass sich ein Konzept in mehrere Repräsentationsformen auffalten lässt, welche ihrerseits in die Verstehenselemente aufgefaltet werden (Drollinger-Vetter, 2011, S. 191). Zwischen den Elementen

einer Ebene existieren Verknüpfungen, welche sich im Grad der Verdichtung voneinander unterscheiden (Drollinger-Vetter, 2011, S. 188):

- Die einzelnen Verstehenselemente sich nicht trennscharf und können nach Drollinger-Vetter (2011, S. 200) miteinander verknüpft sein oder aufeinander aufbauen, indem die Verstehenselemente selbst eine hierarchische Struktur aufweisen, die in Form von Unterebene dargestellt werden kann (siehe z.B. Zindel, 2020, S. 4). Somit kann auch ein bereits bestehendes Konzept wieder ein Verstehenselement eines übergeordneten Konzepts bilden (Zindel, 2020, S. 4f). Drollinger-Vetter (2011, S. 201) weist zusätzlich darauf hin, dass die Verstehenselemente nicht als eine inhaltliche Aufteilung des Lernstoffes in kleinere Einheiten verstanden werden darf, sondern als kognitive Struktur im Sinne des Auffaltens und Verdichtens.
- Auch auf der Ebene der Repräsentationsformen existieren Verknüpfungen, indem die verschiedenen Repräsentationen jeweils in eine andere überführt werden können.
- Abschließend existieren auch auf der Ebene des zu verstehenden Konzepts (siehe Abb. 2.1 schwarzer Kreis) Verknüpfungen zu anderen Konzepten.

Anhand des oben vorgestellten Verstehensmodells kann nun der Prozess der Elementarisierung modelliert werden. Betrachtet man das Verstehensmodell aus der Sicht eines Experten, der über die vollumfängliche fachliche Perspektive verfügt, kann ein Konzept in jede fachliche Repräsentation und die dazugehörigen Verstehenselemente sowie Verknüpfungen aufgefaltet werden (vgl. Drollinger-Vetter, 2011, S. 191). Der Prozess der Elementarisierung lässt sich nun so modellieren, dass auf den drei Ebenen des Verstehensmodells jeweils eine Auswahl von Konzepten, Repräsentationsformen und Verstehenselementen verbunden mit den dazugehörigen Verknüpfungen im Sinne der inhaltlichen Elementarisierung getroffen wird sowie eine Vereinfachung dieser Elemente auf den drei verschiedenen Ebenen in Form der didaktischen Reduktion vorgenommen wird. Die Reihenfolge, in der die verschiedenen Elemente anschließend miteinander verknüpft werden, entspricht der methodischen Elementarisierung, wobei die Wahl der Reihenfolge nicht im Verstehensmodell visualisiert ist. Die begriffliche Elementarisierung lässt sich abschließend im Verstehensmodell so beschreiben, dass es Verknüpfungen zwischen den Elementen der verschiedenen Ebenen über ein einzelnes Konzept hinaus existieren, welche in übergeordneten Leitideen münden. In dem sich so ergebenden reduzierten Verstehensmodell aus der Sicht von SchülerInnen können, unter Berücksichtigung der fachlichen Relevanz, zum Verstehen eines Konzepts einzelne Repräsentationsformen oder Verstehenselemente unvollständig sein beziehungsweise auch komplett fehlen. Dieser Prozess wurde in Abbildung 2.1 durch das orange Einfärben von Elementen visualisiert. Entsprechend existiert zu einem Konzept nicht nur eine einzelne Elementarisierung, sondern es sind immer mehrere abhängig von der Einschränkung der Repräsentationsformen und Verstehenselementen sowie der Reihenfolge der Elemente möglich.

Zusammenfassend wird in dieser Arbeit bei der Beschreibung von Elementarisierungen zwischen den drei Ebenen der Konzepte, Repräsentationsformen und Verstehenselemente differenziert.

## 2.2 Modell der didaktischen Rekonstruktion

Das Modell der didaktischen Rekonstruktion (vgl. Kattmann et al., 1997, siehe Abbildung 2.2), bildet ein theoretisches Konzept für die Strukturierung und Modellierung von Forschungs- und Planungsprozessen.

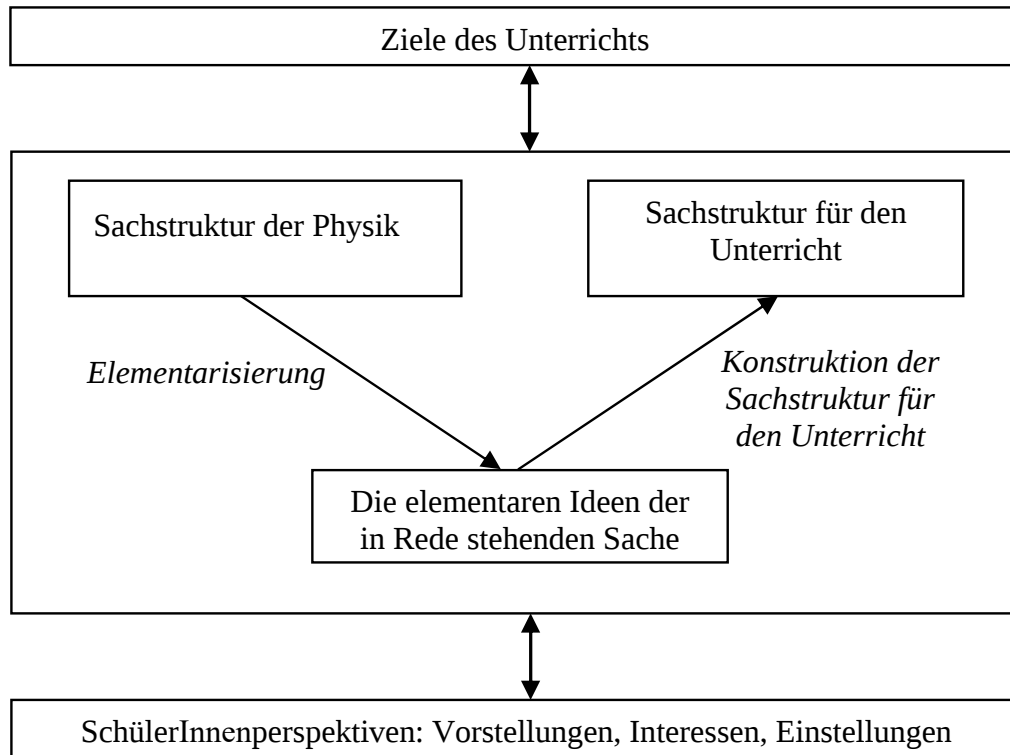


Abbildung 2.2: Modell der didaktischen Rekonstruktion (Duit, 2010, S. 2)

Die didaktische Rekonstruktion hat das Ziel die Sachstruktur der Physik in eine Sachstruktur für den Unterricht zu überführen. Dieser Übergang ist nicht direkt, sondern verläuft über „die elementaren Ideen der in Rede stehenden Sache“ (Duit, 2010, S. 3). Hiermit ist das Ergebnis der Elementarisierung auf inhaltlicher, begrifflicher und methodischer Ebene in Verbindung mit der didaktischen Reduktion gemeint, aus dem schließlich die Sachstruktur für den Unterricht konstruiert wird. Mit der Sachstruktur der Physik sind an dieser Stelle nicht nur Begriffe und Prinzipien der Fachphysik gemeint, sondern auch Denk- und Arbeitsweisen sowie Vorstellungen über die Natur der Naturwissenschaften verbunden mit naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnungsprozessen (Duit, 2010, S. 3). Der Prozess der didaktischen Rekonstruktion ist eng vernetzt mit der didaktischen Analyse nach Klafki (1969), indem sowohl die Ziele des Unterrichts als auch die SchülerInnenperspektive in Form von Vorstellungen, Interessen und Einstellungen bei der didaktischen Rekonstruktion berücksichtigt werden müssen (Duit, 2010, S.2f). Es handelt sich im Rahmen der didaktischen Rekonstruktion um ein iteratives Vorgehen, in dem abwechselnd die Ziele, die Sachstruktur und die SchülerInnenperspektive in den Blick genommen werden, um schließlich eine Kohärenz zwischen den Bereichen herzustellen.

Kattmann et al. (1997) formulieren für den Prozess der didaktischen Rekonstruktion drei Teilaufgaben, welche als fachdidaktisches Triplet bestehend aus der fachlichen Klärung, der Erfassung von SchülerInnenperspektiven und der didaktischen Strukturierung eng aufeinander abgestimmt und wechselseitig voneinander abhängig sind (siehe Abb. 2.3). Mit den Begriffen der fachlichen Klärung und dem Erfassen der SchülerInnenperspektiven werden wie bei der Elementarisierung die Kriterien der Fach- und SchülerInnengerechtigkeit für die didaktische Rekonstruktion gefordert. Jede der drei Teilaufgaben ist mit den anderen verknüpft: Die didaktische Strukturierung setzt die Frage nach den Fachinhalten und die Berücksichtigung der SchülerInnenperspektive beispielsweise in der Form von SchülerInnenvorstellungen zu einem Thema voraus und erwächst aus dem wechselseitigen Vergleich zwischen diesen beiden Perspektiven. Auf der anderen Seite beeinflusst eine didaktische Strukturierung die beiden anderen Teilbereiche, indem durch die Vermittlungsabsicht hinter der didaktischen Rekonstruktion eine Eingrenzung von möglichen Fachinhalten und SchülerInnenvorstellungen vorgenommen wird (Kattmann et al., 1997, S. 5).

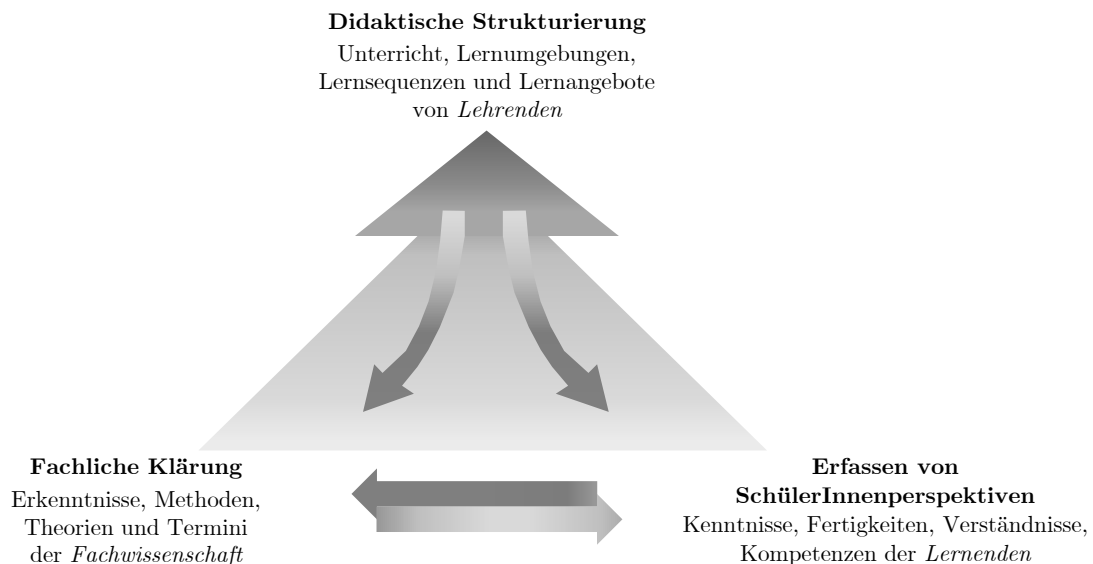


Abbildung 2.3: Das fachdidaktische Triplet: Das Beziehungsgefüge der drei Teilaufgaben im Modell der didaktischen Rekonstruktion nach Kattmann et al. (1997)

In dieser Arbeit wird der Begriff Elementarisierung wie in dem Modell nach Duit (2010) (siehe Abb. 2.2) als Teilprozess im Rahmen des übergeordneten Modells der didaktischen Rekonstruktion verstanden, welcher wiederum verschiedene Aspekte umfasst. Der komplette Prozess von der Sachstruktur der Physik hin zur Sachstruktur des Unterrichts, in Verbindung mit der Kohärenz zwischen den Zielen des Unterrichts, der Sachstruktur und der SchülerInnenperspektive, wird in dieser Arbeit als didaktische Rekonstruktion verstanden.

Um verschiedene Elementarisierung der Mechanik betrachten zu können, ist es demnach erforderlich den Ausgangspunkt - also die Sachstruktur der Physik - zu kennen, welche im nächsten Kapitel zusammengefasst wird.



## 3 Fachliche Grundlage der Mechanik

Im Folgenden wird die fachliche Grundlage (Sachstruktur der Physik) für die Mechanik vorgestellt. Diese teilt sich auf in die Kinematik eines Massenpunktes und die drei Newton'schen Axiome, welche die Grundlage der Dynamik bilden. Dies ist gerade beim Vergleich verschiedener Elementarisierungen hinsichtlich der didaktischen Reduktion und fachlichen Relevanz der Inhalte notwendig, um Aussagen über den Grad der Vereinfachung und eine Bewertung des Kriteriums der Fachgerechtigkeit einer Elementarisierung tätigen zu können. Die fachliche Darstellung ist auch Voraussetzung, um die im folgenden Kapitel aufgeführten SchülerInnenvorstellungen zur Mechanik verstehen zu können, da diese sich zum Teil grundlegend von fachlich korrekten Darstellung unterscheiden.

### 3.1 Kinematik eines Massenpunktes

Die räumliche Ausdehnung eines Körpers kann bei geeigneten Problemstellungen (z.B. Translationsbewegungen) vernachlässigt werden, so dass man sich die Masse  $m$  eines Körpers auf einen Punkt konzentriert vorstellen kann. Der Körper wird dann als Massenpunkt bezeichnet. Alle Körper im Verlauf dieser Arbeit werden als Massenpunkte betrachtet. Die Lage eines Massenpunktes mit der Masse  $m$  im Raum wird in einem Koordinatensystem beschrieben. In dieser Arbeit werden hierzu ausschließlich kartesischen Koordinaten  $\{x, y, z\}$  verwendet. Der Ortsvektor  $\vec{r} = \{x, y, z\}$  fasst diese Koordinaten zusammen. Die Bewegung des Massenpunktes im Raum wird durch die Abhängigkeit der Koordinaten von der Zeit  $t$  dargestellt. Damit ergibt sich die Funktion  $\vec{r}(t)$  als Bahnkurve des Massenpunktes (Demtröder, 2015, S. 38):

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Die mittlere Geschwindigkeit (Durchschnittsgeschwindigkeit)  $\langle \vec{v} \rangle$  eines Massenpunktes auf der Strecke zweier Punkte der Bahnkurve  $\vec{r}(t_1)$  und  $\vec{r}(t_2)$  ist definiert durch:

$$\langle \vec{v} \rangle = \langle \vec{v}(t_1, t_2) \rangle = \frac{\vec{r}(t_1) - \vec{r}(t_2)}{t_1 - t_2} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Durch Grenzwertbildung  $\Delta t \rightarrow 0$  wird die Momentangeschwindigkeit eines Massenpunktes zur Zeit  $t$  definiert:

$$\vec{v}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{r}(t + \Delta t) - \vec{r}(t)}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \dot{\vec{r}}(t) \quad (3.3)$$

Die Bestimmung der Ortsfunktion  $\vec{r}(t)$  bei einer gegebenen Geschwindigkeitsfunktion  $\vec{v}(t)$  ergibt sich allgemein durch Integration zu:

$$\vec{r}(t) = \vec{r}(t_0) + \int_{t_0}^t \vec{v}(\tau) d\tau \quad (3.4)$$

Einen Spezialfall bilden Bewegungen, bei denen die Geschwindigkeit konstant bleibt. In diesem Fall kann die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  vor das Integral gezogen und direkt die analytische Lösung  $\vec{v} \cdot (t - t_0)$  für das Integral angegeben werden. „Eine Bewegung, bei der die Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung konstant bleibt, heißt gleichförmig-geradlinige Bewegung“ (Demtröder, 2015, S. 39).

Die mittlere Beschleunigung (Durchschnittsbeschleunigung)  $\langle \vec{a} \rangle$  eines Massenpunktes bei einer Geschwindigkeitsänderung von  $\vec{v}(t_1)$  auf  $\vec{v}(t_2)$  ist definiert durch:

$$\langle \vec{a} \rangle = \langle \vec{a}(t_1, t_2) \rangle = \frac{\vec{v}(t_1) - \vec{v}(t_2)}{t_1 - t_2} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (3.5)$$

Durch Grenzwertbildung  $\Delta t \rightarrow 0$  wird die Momentanbeschleunigung eines Massenpunktes zur Zeit  $t$  definiert:

$$\vec{a}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{v}(t + \Delta t) - \vec{v}(t)}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = \dot{\vec{v}}(t) = \ddot{\vec{r}}(t) \quad (3.6)$$

Die Bestimmung der Geschwindigkeitsfunktion  $\vec{v}(t)$  bei einer gegebenen Beschleunigungsfunktion  $\vec{a}(t)$  ergibt sich allgemein durch Integration zu:

$$\vec{v}(t) = \vec{v}(t_0) + \int_{t_0}^t \vec{a}(\tau) d\tau \quad (3.7)$$

Auch Bewegungen mit konstanter Beschleunigung bilden einen Spezialfall, weil die Beschleunigung  $\vec{a}$  vor das Integral gezogen werden kann und direkt die analytische Lösung  $\vec{a} \cdot (t - t_0)$  für das Integral angegeben werden kann.

Eine Bewegung, bei der die Beschleunigung nach Betrag und Richtung konstant bleibt, heißt gleichförmig beschleunigte Bewegung (vgl. Demtröder, 2015, S. 41).

Damit sind die notwendigen Begrifflichkeiten der Kinematik definiert und es wird durch die zusätzliche Betrachtung von Kräften auf einen Massenpunkt zur Dynamik übergegangen.

## 3.2 Dynamik: Die drei Newton'schen Axiome

Die Grundlage für die Dynamik bilden die drei Newton'schen Axiome in Verbindung mit dem Superpositionsprinzip.

### Erstes Axiom: Trägheitsgesetz

„Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig gradlinigen Bewegung, solange keine (resultierende) Kraft auf ihn wirkt“ (Demtröder, 2015, S. 49).

Das erste Newton'sche Axiom kann auch über den Impuls formuliert werden. Der Impuls  $\vec{p}$  als Produkt aus Geschwindigkeit  $\vec{v}$  und der Masse  $m$  ist ein Maß für den Bewegungszustand eines Körpers:

$$\vec{p} = m\vec{v} \quad (3.8)$$

Das erste Newton'sche Axiom für den Impuls eines Körpers lautet:

Der Impuls eines freien Massenpunktes (Teilchens) ist zeitlich konstant (vgl. Demtröder, 2015, S. 49).

Das erste Newton'sche Axiom kann darüber hinaus als die Definition für Inertialsysteme interpretiert werden. Demnach gibt es Koordinatensysteme, in denen ein Körper, auf den keine (resultierende) Kraft wirkt, im Zustand der Ruhe oder der gleichförmig gradlinigen Bewegungen verharrt; diese heißen Inertialsysteme (IS) (vgl. Heintze, 2014, S. 30).

### Zweites Axiom: Aktionsprinzip

Mit der obigen Formulierung kann die Impulsänderung eines Körpers über eine Zeit  $t$  auf eine Wechselwirkung mit einem anderen Körper (oder einem Kraftfeld) zurückgeführt werden. Die Ursache dieser Impulsänderung eines Körpers wird als die auf ihn wirkende Kraft  $\vec{F}$  definiert (Demtröder, 2015, S. 49f). Die Änderung des Impulses ist proportional zum Betrag der wirkenden Kraft und geschieht in die gleiche Richtung. Damit ergibt sich die Funktion  $\vec{F}(t)$  als Ableitung der Impulsfunktion  $\vec{p}(t)$  nach der Zeit:

$$\vec{F}(t) = \frac{d\vec{p}(t)}{dt} = \dot{\vec{p}}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{p}(t + \Delta t) - \vec{p}(t)}{\Delta t} \quad (3.9)$$

Das erste Newton'sche Axiom kann als Spezialfall des zweiten Axioms für den Fall einer verschwindenden resultierenden Kraft formuliert werden. Wenn keine (resultierende) Kraft auf einen Körper wirkt, ergibt sich die Impulsänderung zu Null.

$$\vec{F}(t) = \vec{0} = \frac{d\vec{p}(t)}{dt} \quad (3.10)$$

Die obige Formulierung des zweiten Newton'schen Axioms gilt allgemein auch für den Fall von zeitlich veränderlichen Massen  $m = m(t)$ . Somit gilt sie auch bezogen auf die relativistische Massenzunahme eines Körpers mit der Masse  $m_0$ , der sich mit einer Geschwindigkeit  $\vec{v}(t)$  bewegt, in der speziellen Relativitätstheorie:

$$m(t) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{(v(t))^2}{c_0^2}}} \quad (3.11)$$

Durch Vernachlässigung der relativistischen Massenzunahme ( $v \ll c$ ) und generell dem Spezialfall, dass sich die Masse eines Körpers über die Zeit nicht ändert ( $m \neq m(t)$ ), ergibt sich das zweite Newton'sche Axiom zu:

$$\vec{F}(t) = \dot{\vec{p}}(t) = \frac{d}{dt}(m\vec{v})(t) \stackrel{\text{wenn } m \neq m(t)}{=} m \frac{d\vec{v}(t)}{dt} = m\dot{\vec{v}}(t) = m\vec{a}(t) \quad (3.12)$$

### Drittes Axiom: Reaktionsprinzip

Gegeben sind zwei Körper, die nur miteinander aber nicht mit anderen Körpern wechselwirken. Sei  $\vec{F}_{1 \rightarrow 2}$  ( $\vec{F}_{2 \rightarrow 1}$ ) die Kraft des Körpers 1 (2) auf den Körper 2 (1), dann gilt (vgl. Demtröder, 2015, S. 50):

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1} \quad (3.13)$$

Dies bedeutet also, dass Kräfte immer paarweise auftreten. Der Fall, dass nur ein Körper eine Kraft auf einen anderen ausübt, existiert nicht. Man bezeichnet diese Paare auch als Newton'sche Kräftepaare. Die beiden Kräfte greifen dabei an unterschiedlichen Körpern, nämlich am jeweiligen Wechselwirkungspartner, an.

Zusätzlich sollte betont werden, dass es sich bei den Newton'schen Kräftepaaren immer um dieselbe Art von Kraft ( $A$ ) handelt. Die Art der Kraft kann zur besseren Visualisierung in der obigen Darstellung ergänzt werden:

$$\vec{F}_A^{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_A^{2 \rightarrow 1} \quad (3.14)$$

Auch das dritte Axiom kann aus der allgemeinen Formulierung des zweiten Axioms hergeleitet werden. In einem abgeschlossenen System, in dem zwei Körper mit den Massen  $m_1$  und  $m_2$  miteinander wechselwirken, aber ansonsten keine Wechselwirkung nach außen haben, bleibt der Gesamtimpuls des Systems erhalten (Demtröder, 2015, S. 50):

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \text{const.} \quad (3.15)$$

Daraus folgt durch Ableitung nach der Zeit:

$$\frac{d\vec{p}_1}{dt} + \frac{d\vec{p}_2}{dt} = \vec{0} \Rightarrow \vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \quad (3.16)$$

## Superpositionsprinzip

Ergänzend zu den drei Newton'schen Axiomen ist das Superpositionsprinzip, also das Prinzip zur ungestörten Überlagerung, von Kräften relevant. „Greifen an einem Punkt mehrere Kräfte an, so ist die Gesamtkraft (resultierende Kraft) die Vektorsumme der Einzelkräfte [...]“ (Demtröder, 2015, S. 45). Es gilt also:

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i \quad (3.17)$$

Mit der Kinematik des Massepunktes und den drei Newton'schen Axiomen verbunden mit dem Superpositionsprinzip kann die gesamte Mechanik der Sekundarstufe I erklärt werden.



## 4 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung in zwei Bereichen gegeben. Begonnen wird mit SchülerInnenvorstellungen zum Zusammenhang von Kraft und Bewegung, welche oft im Widerspruch zur Sachstruktur der Physik stehen. Auf Grundlage dieser SchülerInnenvorstellungen können unter anderem die verschiedenen Elementarisierungen der Mechanik begründet (Kap. 4.2.3) und darüber hinaus einen Eindruck von den aktuellen Problemstellungen des Mechanikunterrichts in der Sekundarstufe I und II gegeben werden. Im Anschluss folgt eine Zusammenfassung verschiedener Elementarisierungen zum Themengebiet Kraft und Bewegung, genauer zu einem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept, sowie von fachdidaktischen Studien dazu. Dabei wird zunächst ein Überblick über die bisherigen Studien gegeben, indem jeweils die leitende Fragestellung, das Design (Instrumente und Stichprobe) und die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst werden. Anschließend werden die in den Studien untersuchten Elementarisierungen mit den fachdidaktischen Begründungen erläutert. Im letzten Teil des Kapitels werden Einschränkungen aus den bisherigen Vergleichsstudien herausgearbeitet, um später in Kapitel 5 zunächst offen gebliebene Fragen aufzeigen zu können und im Anschluss die Forschungsfragen dieser Arbeit zu motivieren.

### 4.1 SchülerInnenvorstellungen in der Mechanik

Es wird in dieser Arbeit bewusst von SchülerInnenvorstellungen und nicht von den in der Literatur synonym verwendeten Begriffen wie Fehlvorstellungen, Alltagsvorstellungen, Präkonzepten, etc. (vgl. Schecker et al., 2018, S. 11f) gesprochen. Dies soll zusätzlich durch folgendes Zitat verdeutlicht werden:

„Es handelt sich ja eben *nicht* um ‚Fehlvorstellungen‘, sondern um Interpretationen, die dem Wahrnehmungsvorgang prinzipiell gerecht werden. Es gilt also, den Schülerinnen und Schülern bewusst zu machen, dass die physikalische Sichtweise sich grundlegend von der alltäglichen unterscheiden kann, dass aber beide Erklärungsweisen (je nach Erkenntnisabsicht) der Wirklichkeit angemessen sind. Erst diese Einsicht liefert die Kriterien dafür, zu entscheiden, in welchen Zusammenhängen die jeweilige Erklärungsweise angebracht ist“ (Muckenfuß, 1995, S. 306).

SchülerInnenvorstellungen können einerseits aus vorunterrichtlichen Erfahrungen im Alltag und andererseits durch die mehr oder weniger günstige Darstellung der Sachverhalte

im Unterricht selbst entstehen.

Die Aufstellung der SchülerInnenvorstellung erfolgt getrennt nach Kinematik und Dynamik, wobei die SchülerInnenvorstellung aus dem Buch von Schecker et al. (2018, S. 65ff) entnommen wurden, da dieses Werk eine umfassende Zusammenfassung der Forschung im Zeitraum der 1970er Jahre bis 2018 im deutschen und auch internationalem Raum gibt.

#### 4.1.1 SchülerInnenvorstellungen in der Kinematik

- **Geschwindigkeit ist Schnelligkeit:**

Die Geschwindigkeit wird von SchülerInnen in der Regel auf eine positive Betragsgröße (Tempo) reduziert, welche ein Maß dafür ist, wie schnell oder langsam sich ein Körper bewegt. Die Richtung der Bewegung wird entweder gar nicht oder als separate Information betrachtet. Zudem kann es dazu kommen, dass SchülerInnen die Richtung mit dem Ziel der Bewegung vermischen oder gleichsetzen. Auch die Angabe eines Vorzeichen wird mehr als Zusatzinformation und nicht als Bestandteil der Geschwindigkeit aufgefasst. Eine „negative“ Geschwindigkeit ist für SchülerInnen nicht vorstellbar. Eine problematische Folgerung aus dieser Auffassung der Geschwindigkeit zeigt sich bei Kreisbewegungen, da es sich demnach um eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit handelt und damit der Körper nicht beschleunigt wird.

- **Für einen Zeitpunkt kann man keine Geschwindigkeit bestimmen:**

Der Begriff der Momentangeschwindigkeit als Grenzwert für immer kleiner werdende Zeitintervalle stellt für SchülerInnen eine Schwierigkeiten dar, weil zu einem Zeitpunkt keine Strecke zurückgelegt werden kann. Einem Zeitpunkt kann demnach keine Geschwindigkeit zugeordnet werden.

- **Große Beschleunigung heißt hohes Tempo:**

Die Beschleunigung wird in der Alltagssprache nicht als Quotient aus Geschwindigkeitsänderung und der dafür benötigter Zeit angegeben. Stattdessen werden beide Angaben separat gemacht (zum Beispiel ein Auto beschleunigt von 0 auf 100 km/h in 2.8 s). Für den Vergleich von Größenordnungen bezüglich der Beschleunigung wird in erster Linie die Bilanz zwischen den Beträgen von Anfangs- und der Endgeschwindigkeit betrachtet. Dies hat zur Folge, dass eine große Beschleunigung mit einem großen Endgeschwindigkeitsbetrag assoziiert wird. Die Tatsache, dass sich bei einer kleinen Geschwindigkeitsänderung in einem entsprechend kleinen Zeitintervall vergleichbare Größenordnungen von Beschleunigungen ergeben können wie bei großen Geschwindigkeitsänderung, ist den SchülerInnen oft nicht klar.

- **Beschleunigung ist Schnellerwerden:**

Der Begriff der Beschleunigung wird im alltäglichen Sprachgebrauch lediglich mit einem „Schnellerwerden“ in Verbindung gebracht. Eine negative Beschleunigung (Vorzeichen auch hier als Richtungsangabe bei eindimensionalen Bewegungen) erscheint hingegen SchülerInnen meist unlogisch.

- **Beschleunigung ist Tempoänderung:**

Eine weitere Lernschwierigkeit besteht darin, dass die Beschleunigung lediglich mit der Änderung des Geschwindigkeitsbetrages nicht aber mit einer Richtungsänderung in Verbindung gebracht wird. Wie schon bei der Geschwindigkeit wird die Beschleunigung nicht als vektorielle Größe mit Richtung und Betrag aufgefasst. Reduziert auf eine Dimension bedeutet somit eine positive Beschleunigung immer ein „Schnellerwerden“ und eine negative immer ein „Langsamerwerden“. Das Vorzeichen hängt aber in der Regel vom gewählten Koordinatensystem ab, zudem wird bei dieser Betrachtungsweise das Zeitintervall außer Acht gelassen, was ebenfalls abhängig von der Situation ein negatives Vorzeichen annehmen kann. Physikalisch betrachtet ist auch die Änderung der Richtung bei konstantem Geschwindigkeitsbetrag eine beschleunigte Bewegung.

- **Zu einem Zeitpunkt kann keine Beschleunigung vorliegen:**

Durch die Reduktion auf eine Bilanzgröße ist es für SchülerInnen in der Regel schwer die Beschleunigung auf einem Zeitpunkt (zum Beispiel höchster Punkt beim senkrechten Wurf) zu beziehen. Zu einem Zeitpunkt liegt keinen Anfangs- und Endgeschwindigkeit vor, wodurch eine Angabe der Beschleunigung nicht möglich ist. Damit ergibt sich für SchülerInnen die Beschleunigung zu einer ähnlichen Größe wie die Geschwindigkeit, wodurch es zu einer Vermischung dieser Begrifflichkeiten und von verschiedenen Bewegungsarten kommt.

- **Die Bewegungsform prägt sich dem bewegenden Objekt ein:**

Wenn sich ein Körper im Kreis bewegt, dann prägt sich die Art von Bewegung nach Vorstellung der SchülerInnen im Körper ein, so dass er sich auch weiterhin auf einer Kreisbahn bewegt, obwohl andere oder keine äußere Kräfte auf ihn wirken. Dies ist verbunden mit der Vorstellung einer im Körper gespeicherten „inneren Kraft“ die den aktuellen Bewegungszustand aufrechterhält.

### 4.1.2 SchülerInnenvorstellungen in der Dynamik

- **Kraft ist eine universelle Wirkungsfähigkeit:**

Eines der wesentlichen Konzepte des Physikunterrichts ist der Kraftbegriff verbunden mit den drei Newton'schen Axiomen. Der Kraftbegriff ist als solcher stark geprägt von der Alltagssprache der SchülerInnen und wird mit einer allgemeinen Wirkungsfähigkeit in Verbindung gebracht. „Kraft“ wird von SchülerInnen als Clusterbegriff für verschiedenen physikalische Konzepte, wie zum Beispiel Kraft, Energie oder Impuls verwendet, ohne dass zwischen diesen verschiedenen physikalischen Größen hinreichend differenziert wird. Diese Vermischung von Begrifflichkeiten äußert sich daher auch in vielen der noch folgenden SchülerInnenvorstellungen zum Kraftbegriff.

- **Trägheit lässt sich überwinden:**

Die Trägheit wird von den SchülerInnen als etwas verstanden, was man überwinden kann. Ist die Kraft auf einen Körper groß genug, wird die Trägheit überwunden und der Körper setzt sich in Bewegung. Diese Vorstellung ergibt sich beispielsweise aus Erfahrungen der SchülerInnen mit dem Übergang von der Haft- zur Gleitreibung.

- **Das Beharrungsprinzip gilt nur für Spezialfälle (Erstes Axiom):**

Durch die verkürzte Formulierung des ersten Newton'schen Axiom, ein Körper ändere seinen Bewegungszustand nicht, solange keine äußere Kraft auf ihn wirke, wird dies von SchülerInnen als die Abwesenheit jeglicher Kraft interpretiert. Damit gilt das erste Newton'sche Axiom aus der Sicht der SchülerInnen nur im absoluten Spezialfall von vollständig verschwindenden äußeren Einflüssen auf einen Körper, welcher aber in der Alltagswelt der SchülerInnen nie erfüllt ist. Das Beharrungsprinzip wird darüber hinaus zusätzlich auf den Spezialfall reduziert, dass ein Körper in Ruhe verweilt, solange gar keine Kraft auf ihn wirkt.

- **Ein bewegter Körper hat Kraft:**

Der Begriff Kraft wird von SchülerInnen eher mit der Geschwindigkeit als der Geschwindigkeitsänderung oder Beschleunigung in Verbindung gebracht. Ein Aspekt dieser Vorstellung äußert sich darin, dass SchülerInnen meinen, Kraft würde von einem Körper mitgeführt werden. Dabei ist die Kraft des Körpers umso größer, je größer seine Geschwindigkeit ist. Der Körper erhält eine Kraft, oft von den SchülerInnen als Schwung, Wucht oder Bewegungskraft bezeichnet, und überträgt diese beim Wechselwirken mit einem anderen Körper. Dies entspricht dem physikalischen Konzept des Impulses. Verbunden ist dies meist mit einer Antriebsvorstellung der Kraft. Der Körper braucht die in ihm gespeicherte Kraft auf beziehungsweise diese kann durch von außen wirkende Kräfte auch wieder ausgeglichen oder verbraucht werden. Ist die Kraft des Körpers aufgebraucht, kommt er zum Stillstand.

- **Je schwerer, desto stärker:**

Ergänzend zur eben genannten Vorstellung wird von SchülerInnen in der Regel auch eine größere Masse mit einer größeren im Körper gespeicherten Kraft assoziiert. Dies führt zu einer falschen Vorstellung des dritten Newton'schen Axiom. Stoßen zum Beispiel ein LKW und ein PKW zusammen, übt der LKW aufgrund seiner Masse in der Vorstellung der SchülerInnen eine größere Kraft auf dem PKW aus als andersherum. Physikalisch korrekt wäre, dass die Kraft in beiden Fällen gleich ist, unterschiedlich ist nur die Beschleunigung der beiden Fahrzeuge.

- **Zur Aufrechterhaltung der Bewegung bedarf es einer Kraft in Bewegungsrichtung:**

Die Antriebsvorstellung einer Kraft führt bei SchülerInnen meist zu der Folgerung, für eine konstante Geschwindigkeit wäre auch eine entsprechende konstante Antriebskraft notwendig, also eine resultierende Kraft in Bewegungsrichtung. Stellt man SchülerInnen die Aufgabe an die Bahnkurve einer Bewegung (zum Beispiel ein Ball, der sich von links nach rechts bewegt und mehrmals auf dem Boden auf-

schlägt) die wirkenden Kräfte in Form von Kraftpfeilen einzuzeichnen, werden oftmals Geschwindigkeitspfeile statt Kraftpfeilen eingezeichnet. Die Pfeile zeigen immer in Richtung der Bewegung entlang der Bahnkurve.

- **Die stärkere Kraft gewinnt:**

Wirken mehrere Kräfte auf einen Körper so gewinnt die stärkste der einwirkenden Kräfte. Bei der obigen Vorstellung wird in diesem Fall auch die Antriebskraft miteinbezogen, so dass in dem obigen Beispiel die stärkste Kraft die Bewegung des Balls bestimmt.

- **$F = m \cdot a$  ist eine von vielen Kraftformeln (Zweites Axiom):**

Nach dieser SchülerInnenvorstellung handelt es sich bei der Bewegungsgleichung  $F = m \cdot a$  nicht um die fundamentale Grundgleichung der Mechanik, sondern um eine Kraftformel von Vielen, vergleichsweise mit der Federspannkraft oder der Erdanziehungskraft. Diese Formel ist entsprechend aus Sicht der SchülerInnen nur anzuwenden, wenn in einer Situation auch eine Beschleunigung vorliegt.

- **Kraft und Gegenkraft greifen am gleichen Körper an (Drittes Axiom):**

Eine SchülerInnenvorstellung zum dritten Newton'schen Axiom besteht in der Vermischung von Newton'schen Kräftepaaren mit sich aufhebenden Kräften im Gleichgewicht. Für die SchülerInnen greifen Kraft und Gegenkraft am gleichen Körper an und heben sich gegenseitig auf. Zwar hat das Newton'sche Kräftepaar auch den gleichen Betrag bei unterschiedlichen Vorzeichen, diese Kräfte greifen allerdings an unterschiedlichen Körpern an.

- **Nur aktive Körper können Kräfte ausüben, passive leisten Widerstand:**

Nur aktive Körper (z.B. Lebewesen, Maschinen oder gespannte Federn) können Kräfte auf andere Körper ausüben. Der passive Körper leistet hingegen Widerstand in Form seiner Trägheit.

- **Bei Kreisbewegungen wirkt die Zentrifugalkraft:**

Bei den SchülerInnenvorstellungen in der Kinematik wurde bereits auf den Trugschluss von SchülerInnen hingewiesen, bei einer Kreisbewegung handele es sich um keine beschleunigte Bewegung. Aus der Alltagswelt kennen die SchülerInnen in der Regel aber auch den Begriff der Zentrifugalkraft, die bei einer Kreisbewegung wirkt. Damit würde es sich aber bei der Kreisbewegung um eine beschleunigte Bewegung handeln. Dies wird damit kompensiert, dass mit Hilfe der Zentripetalkraft ein Kräftegleichgewicht zwischen Zentrifugal- und Zentripetalkraft angenommen wird, wodurch sich die resultierende Kraft wieder zu Null ergibt. So findet man beispielsweise die SchülerInnenlösung, dass bei der Planetenbewegung ein Kräftegleichgewicht zwischen der Gravitationskraft (als Zentripetalkraft) und der Zentrifugalkraft vorliegt.

## 4.2 Evaluationsstudien zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept

### 4.2.1 Überblick über die bisherigen Evaluationsstudien

Ein Überblick über die bisherigen Evaluationsstudien zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept kann Tabelle 4.1 entnommen werden. Die Tabelle gibt dabei nicht die historische Abfolge der Studien wieder, sondern unterscheidet zwischen den verschiedenen Elementarisierungen für die Sekundarstufe I und II. Die Arbeit von Amenda (2017) ist nicht dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept zuzuordnen, da sich diese auf die Kinematik beschränkt, wobei vorwiegend eindimensionale Bewegungen behandelt wurden. In der Übersicht ist diese dennoch zu nennen, weil hier ein weiterer Ansatz zur Kinematik vorgestellt wird, welcher zum einen Bestandteile der Elementarisierungen aus den vorausgegangenen Arbeiten nutzt und zum anderen in Bezug auf die empirische Studie in dieser Arbeit weitere Erkenntnisse zum Effekt der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen liefert.

Tabelle 4.1: Überblick über die bisherigen Evaluationsstudien

| <b>Zweidimensional-dynamisches Mechanikkonzept in der Sekundarstufe I</b>     |                                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Jung et al. (1977)                                                            | Evaluationsstudie zur Einführung des zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzepts in den Klassen 3-6 |
| Wodzinski (1996)                                                              | Akzeptanzbefragungsstudie                                                                            |
| Tobias (2010)                                                                 | Evaluationsstudie mit „konventionellem“ Unterricht als Vergleichsgruppe                              |
| <b>Zweidimensional-dynamisches Mechanikkonzept in der Sekundarstufe II</b>    |                                                                                                      |
| Jung & Callsen (1976)                                                         | Evaluationsstudie mit „konventionellem“ Unterricht als Vergleichsgruppe                              |
| Wilhelm (2005)                                                                | Evaluationsstudie mit „konventionellem“ Unterricht als Vergleichsgruppe                              |
| <b>Konsequenter vektorieller Ansatz in der Kinematik der Sekundarstufe II</b> |                                                                                                      |
| Amenda (2017)                                                                 | Evaluationsstudie mit skalarem Ansatz als Vergleichsgruppe sowie Erprobung im Unterricht             |

Für die Zusammenfassung der Studien wird jeweils auf die leitende Fragestellung, das Studiendesign verbunden mit der erhobenen Stichprobe und den eingesetzten Testinstrumenten sowie auf die wesentlichen Ergebnisse eingegangen. Ein Überblick über die in den Zusammenfassungen genannten Elementarisierungen wird in Kapitel 4.2.2 gegeben.

### **Zusammenfassung von Jung et al. (1977)**

Jung et al. (1977) verfolgten in ihrer Arbeit die Fragestellung, inwiefern auch schon in den frühen 3. bis 6. Klassenstufen kinematisch-dynamische Begriffe in der Art der Elementarisierung von Jung et al. (Kap. 4.2.2.1) gelernt werden können, welche ursprünglich für die Sekundarstufe II entwickelt wurde.

Die empirische Studie fand in einem Prä-/Posttest-Design statt. Erhoben wurden dabei Daten von SchülerInnen aus der 3. bis zur 6. Jahrgangsstufe. Für die Auswertung wurden nur Testpersonen berücksichtigt, die auch an beiden Testungen teilgenommen haben, wodurch sich eine Stichprobe im Umfang von 473 SchülerInnen ergab. Der Prä- und Posttest bestand bis auf geringe Abänderungen aus den gleichen Aufgaben. Bei dem Test handelte es sich um einen Mechaniktest, welcher aus 21 Items bestand. Für den Vergleich der Klassen wurden in den Analysen nicht der Lernzuwachs (Differenz zwischen Post- und Prätest), sondern lediglich die Posttestergebnisse betrachtet, da die Einbeziehung der Prätest-Ergebnisse keine weiteren wesentlichen Ergebnisse erbrachte (vgl. Jung et al., 1977, S. 23). Als zusätzliche Variable wurde der Intelligenzquotient der SchülerInnen in drei Bereichen (Raumvorstellung, Denkfähigkeit und Allgemeinbildung) erhoben. Ergänzt wurde die quantitative Erhebung durch Interviews mit ausgewählten Testpersonen.

Sowohl der Mechanikkonzept als auch der Mechaniktest wurden zuvor in einer Vorstudie in vier Klassen erprobt und entsprechend überarbeitet. Dabei habe sich insbesondere gezeigt, dass der Unterricht nach der Elementarisierung von Jung et al. für die untersuchten Klassenstufen zu umfangreich gewesen wäre. Der Unterricht umfasste nach den Änderungen insgesamt 20 Einzelstunden (anstatt zuvor 39 Einzelstunden in der Studie von Jung & Callsen (1976)). Der Unterricht wurde in den Klassen von der Klassenlehrkraft beziehungsweise der Fachlehrkraft erteilt. Die Lehrkräfte erhielten regelmäßig, sowohl vor dem Beginn des Unterrichts als auch begleitend, Schulungen zum Mechanikkonzept. Zusätzlich wurde den Lehrkräften ein LehrerInnenhandbuch sowie Arbeitsblätter zur Verfügung gestellt. In dem LehrerInnenhandbuch wurden für jedes Kapitel entsprechende Lernziele formuliert, der Unterrichtsverlauf beschrieben sowie methodische Hinweise gegeben. Dabei handele es sich, so betonen Jung et al. (1977), nicht um ein vorgegebenes Muster-Curriculum, sondern um ein Vorschlag für eine Reihenplanung, da die Lehrkräfte nach ihren Bedürfnissen und denen der Klasse von den Unterrichtsplänen abweichen durften und sich nicht strikt daran halten mussten. Die SchülerInnen erhielten auf der anderen Seite SchülerInnenhefte, welche als Nachlesewerk dienen sollten.

Die mittlere Punktzahlen der SchülerInnen im Posttest unterschieden sich zwischen den verschiedenen Klassenstufen signifikant. Am besten schnitt die 4. Klassenstufe gefolgt von der 3. und 5. ab. Die mittlere Punktzahl in der 6. Klassenstufe war am geringsten. Die Testergebnisse waren bezogen auf die Gesamtstichprobe bei den Jungen signifikant höher als bei den Mädchen. Dieser Unterschied wurde mit zunehmendem Intelligenzquotienten (IQ) größer. Insgesamt korrelierten Testergebnisse und IQ signifikant positiv miteinander. Die Reihenfolge der Klassenstufen bezüglich der Posttest-Ergebnisse bleibt erhalten, auch wenn die Stichprobe bezüglich der IQ-Werte in IQ-Gruppen ( $IQ > 115$ ,  $115 > IQ > 85$ ,  $IQ < 85$ ) aufgeteilt wurden. Auch bei der Betrachtung der IQ-Subskalen blieben die-

ses Ergebnis bestehen. Zusätzlich zu den bisher vorgestellten Ergebnissen, wurden in der Arbeit noch ein McNemar-Test, eine Item-Analyse (global und differentiell nach Prä- und Posttest) und eine Analyse bezüglich der Trennschärfe und dem Schwierigkeitsindex der Items durchgeführt, sowie die Interviews ausgewertet. Diese Ergebnisse deckten sich in vielen Teilen mit den bisher vorgestellten Befunden der Varianzanalysen. Da diese Auswertungen sehr spezifisch und detailliert auf einzelne Klassen, Items oder Interviewabschnitte eingehen, wird an dieser Stelle auf eine Zusammenfassung verzichtet und auf den Originaltext verwiesen. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Schlussfolgerungen, welche Jung et al. (1977) aus den Ergebnissen der empirischen Studie ziehen.

Mit dem Mechanikunterricht erst in der Mittelstufe zu beginnen, sei nach Jung et al. (1977) zu spät. Schon in der Grundschule könne mit einer propädeutischen Mechanik über einen dynamischen Zugang begonnen werden. Die günstigste Klassenstufe, um die Begrifflichkeiten der Newton'schen Mechanik einzuführen, stelle die 4. Klasse dar. Wenn die Mechanik nicht in dieser Art in der Grundschule eingeführt wird, führe dies in den folgenden Klassenstufen zu großen Lernschwierigkeiten in der Newton'schen Mechanik. Die Studie habe gezeigt, dass eine kompakte Einführung der Mechanik in einem Schuljahr viel zu umfangreich sei und dass es besser wäre, die Inhalte zeitlich über mehrere Schuljahre zu verteilen. Die einzelnen Abschnitte des Mechanikunterrichts sollen dabei nicht isoliert, sondern überlappend und sukzessiv auf die Klassenstufen verteilt werden.

### **Zusammenfassung von Wodzinski (1996)**

Die Zielsetzung der Akzeptanzbefragungsstudie (Wodzinski, 1995, 1996) zur Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner (Kap. 4.2.2.2) lässt sich in drei Ebenen gliedern. Zum einen sollte die Umsetzbarkeit und Wirksamkeit der Unterrichtskonzeption überprüft werden. Zum anderen sollten Lernschwierigkeiten und SchülerInnenvorstellungen sowie deren Entwicklung in Wechselwirkung mit dem Unterrichtskonzept beschrieben werden. Im letzten Schritt sollte schließlich allgemein der Lernprozesses der SchülerInnen im Laufe des Unterrichts untersucht werden.

Das Design der Studie bestand aus einer Sequenz an Akzeptanzbefragungen (siehe z.B. Jung, 1992). Bei dieser Art von Befragung erhalten die SchülerInnen zu Beginn ein Informationsangebot von ca. 5 bis 10 Minuten, welches durch Experimente, Demonstrationen oder Computersimulationen unterstützt werden kann. Anschließend werden die SchülerInnen um eine Stellungnahme zu den erhaltenden Informationen gebeten, in der es um eine Bewertung der Verständlichkeit des Informationsangebots geht. Der Inhalt wird stark reduziert, um das Informationsangebot möglichst kompakt zu konzentrieren. Es folgt eine Zusammenfassung des Informationsangebots in eigenen Worten durch die SchülerInnen. Anwendungs- und Übungsaufgaben in unterschiedlichen Schwierigkeiten sowie weitere Verständnis- und Akzeptanzfragen schließen sich an.

An der Akzeptanzbefragung nahmen 12 SchülerInnen eines Frankfurter Gymnasiums teil. Die befragten SchülerInnen befanden sich bezogen auf die Klassenstufe im Übergang von der 8. zur 9. Klasse. Der Umfang der Hauptbefragung bestand für jeden Schüler/jede Schülerin aus vier Sitzungen, welche aus mehreren thematischen Blöcken aufgebaut wa-

ren. Die Sitzungen dauerten jeweils zwischen 30 bis 90 Minuten. In der ersten Sitzung wurde von den SchülerInnen ein Fragebogen zu demografischen Daten, zum Interesse im Fach Physik innerhalb und außerhalb der Schule und zum Vorwissen im Bereich der Mechanik ausgefüllt. Die Befragung wurde in zwei verschiedenen Varianten durchgeführt, um Unterschiede bezogen auf die Behandlung der Newton'schen Bewegungsgleichung an ein- oder zweidimensionalen Bewegungen untersuchen zu können. Die vierte Sitzung entsprach nicht dem Schema der Akzeptanzbefragung, sondern bestand aus einem schriftlichen Test zur vektoriellen Bestimmung der Zusatzgeschwindigkeit und einem schriftlichen Verständnistest. Zusätzlich zur Hauptbefragung fanden weitere ergänzende Befragungen mit SchülerInnen statt, auf die hier aber nicht weiter eingegangen wird.

Die Studie habe nach Wodzinski (1996) gezeigt, dass das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept für erfolgreichen Unterricht in der Sekundarstufe I geeignet sei, gerade im Hinblick auf die aus der Forschung bekannten Lernschwierigkeiten. Ausschlaggebend für den Lernerfolg des Unterrichtskonzepts sei der Aufbau eines klaren begrifflichen Rahmens von Einwirkung und Bewegungsänderung, wodurch typische SchülerInnenvorstellungen aufgrund von Alltagserfahrungen vermieden würden. Bedeutend für den begrifflichen Rahmen seien drei Elemente der Elementarisierung, auf die auch bei der Entscheidung für eine eindimensionale Dynamik nicht verzichtet werden könne. Dazu zähle die Einführung von Geschwindigkeitspfeilen, der senkrechte Stoß mit dem Zusammenhang von Kraft und Bewegungsänderung sowie die anschließende Einführung der Kraft verbunden mit der Newton'schen Bewegungsgleichung. Die Studie zeige weiter, dass die zweidimensionale Dynamik nicht schwieriger sei als die eindimensionale, wobei im zweidimensionalen Fall mehr Unterrichtszeit notwendig sei. Notwendig für das vollständige Verständnis des Zusatzgeschwindigkeitskonzepts sei die Newton'sche Bewegungsgleichung, welche als Hauptziel des Unterrichts angesehen werden solle. Die Newton'sche Bewegungsgleichung in der Produktform  $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$  sei für die SchülerInnen plausibel und einleuchtend gewesen und die SchülerInnen hätten die Anwendung als besonders interessant angesehen.

#### **Zusammenfassung von Tobias (2010)**

Die empirische Evaluationsstudie zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept für die Sekundarstufe I nach der Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner (Kap. 4.2.2.2) fand in einem Prä-/Post- und Follow-Up-Test-Design kombiniert mit dem Vergleich der Treatmentgruppe zu „konventionell“ unterrichteten Klassen (Treatment- und Kontrollgruppendedesign) statt (Tobias, 2010; Wilhelm et al., 2011). Das Forschungsprojekt hatte im Sinne eines Design-Based-Research Projektes die übergeordnete Zielsetzung einen ausgearbeiteten zweidimensional-dynamischen Mechaniklehrgang für die Sekundarstufe I bezogen auf die Umsetzbarkeit und die Lernwirksamkeit im Unterricht zu erproben, um im nächsten Schritt auf Grundlage dieser Erkenntnisse Rückschlüsse auf mögliche Verbesserungen oder Änderungen ziehen zu können.

In der Hauptstudie unterrichteten zehn Lehrkräfte in zwei aufeinander folgenden Jahren zunächst in der Kontrollgruppe 14 Klassen mit 358 SchülerInnen (im Sommer 2008) und im darauffolgenden Jahr in der Treatmentgruppe 13 Klassen mit 367 SchülerInnen (im

Sommer 2009). Zwischen den beiden Erhebungen fand darüber hinaus eine Vorstudie mit 12 Lehrkräften und 17 Klassen (Winter 2008/09) statt. An die Hauptstudie schloss sich ein Jahr später eine Nachfolgestudie mit einer Überarbeitung des Mechaniklehrgangs anhand der Befunde an, in welcher acht weitere Lehrkräfte eine Stichprobe von 237 SchülerInnen in einem Prä-/Posttest-Design in Kontroll- und Treatmentgruppe (Schuljahr 2008/09 bzw. 2009/10) unterrichteten.

Die Lehrkräfte nahmen zur Vorbereitung an einer Schulung teil, in der ihnen knapp die wesentliche Inhalte des zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzepts vorgestellt und das Unterrichtsmaterial (SchülerInnenhefte, Arbeitsblätter, Filme und Simulationen (Rachel, o. D.)) zur Verfügung gestellt wurden. Vorgaben für den Unterricht wie beispielsweise Unterrichtsverlaufspläne gab es nicht. Auch wurden den Lehrkräften keine Vorgaben bezüglich der Methoden oder dem Einsatz von Medien gemacht. Die Elementarisierungen von Treatment- und Kontrollgruppe unterscheiden sich damit in der Studie potenziell in allen in Kapitel 2.1 genannten Aspekten und Ebenen, da für den Unterricht in der Kontrollgruppe keine Vorgaben gemacht wurden.

Als quantitative Instrumente wurden sowohl in der Vor- als auch in der Hauptstudie von den Lehrkräften Unterrichtstagebücher geführt. Des Weiteren wurde ein zu allen Testzeitpunkten identischer Test (Prä, Post und Follow-Up) zur Messung von kognitiven und nicht-kognitiven Variablen eingesetzt. Erfasst wurde das Mechanikwissen der SchülerInnen, das fachspezifischen Selbstkonzept, das Interesse am Physikunterricht und die Selbstwirksamkeitserwartung. Außerdem wurde ein kognitiver Fähigkeiten-Test (KFT) mit der Subskala zum räumlichen Vorstellungsvermögen eingesetzt. Der Test zum Mechanikwissen enthielt sowohl für beide Gruppen vergleichbare Aufgaben als auch welche, die eine der beiden Gruppen bevorzugten, um mögliche Transferleistungen messen zu können. Als qualitative Erhebungsinstrumente wurden in der Hauptstudie Leitfadenterviews mit Lehrenden und Lernenden durchgeführt sowie Unterrichtsvideos zu einer Kernstunde des Mechaniklehrgangs (Einführung der Newton'schen Bewegungsgleichung) aufgenommen. Die Auswertung der Interviews erfolgte qualitativ quantifizierend durch die Bildung von Kategoriensystemen. Für die Auswertung der Unterrichtsvideos wurden Strukturdiagramme (für Strukturdiagramme siehe Müller, 2004) erstellt.

In den LehrerInneninterviews habe sich nach Tobias (2010) gezeigt, dass der Lehrgang von einer Mehrheit der Lehrkräfte positiv bewertet würde und auf eine große Akzeptanz stoße. Insgesamt habe der Unterricht nach dem zweidimensional-dynamischen Mechaniklehrgang zu einem signifikant besseren Lernzuwachs bei den SchülerInnen geführt als in der Kontrollgruppe, wobei bei beiden Gruppen ein höchst signifikanter Lernzuwachs vorläge. Für einen besseren Überblick über die vorliegenden Effektstärken bei den Ergebnisse zum Mechaniktest werden im Folgenden nur die für beide Gruppe vergleichbaren Aufgaben betrachtet. Innerhalb der Kontrollgruppe erreichten die SchülerInnen einen Lernzuwachs mit einem Effekt von  $d = 0.77$  und innerhalb der Treatmentgruppe mit einem Effekt von  $d = 1.37$ . Die Effektstärke beim Unterschied zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe lag im Posttest<sup>2</sup> bei  $d = 0.54$  und im zeitverzögerten Posttest bei  $d = 0.44$  zu Gunsten

---

<sup>2</sup>In der Hauptstudie wurden lediglich Unterschiede in den Posttestergebnissen und nicht im Lernzuwachs betrachtet.

der Treatmentgruppe. Alle Effektstärken liegen von der Größenordnung her nach Hattie (2009) oberhalb eines LehrerInneneffekts.

Der zweidimensional-dynamische Mechaniklehrgang wurde im Anschluss an die Hauptstudie nach dem Design-Based-Research Ansatz überarbeitet, indem Anpassungen an der Strukturierung der Themen und am Material vorgenommen wurden, und in einer Nachfolgestudie erneut in einer Kombination aus einem Prä-/Posttest-Design mit Kontroll- und Treatmentgruppe erprobt. In der Kontrollgruppe ergab sich bei den vergleichbaren Aufgaben erneut ein Lernzuwachs mit einer Effektstärke von  $d = 0.75$  und in der Treatmentgruppe von  $d = 1.61$ . Auch hier lag der Unterschied im Lernzuwachs zwischen den beiden Gruppen in der Nachfolgestudie bei einer Effektstärke von  $d = 0.89$  zu Gunsten der Treatmentgruppe. Erneut liegen alle Effektstärken von der Größenordnung her oberhalb eines LehrerInneneffekts.

#### **Zusammenfassung von Jung & Callsen (1976)**

In der Studie von Jung & Callsen (1976) wurde die Lernwirksamkeit durch den Unterricht nach der Elementarisierung von Jung et al. (Kap. 4.2.2.1) mit der nach „konventionellem“ Mechanikunterricht in der Sekundarstufe II verglichen.

Die Erhebung fand in einem Prä-/Posttest-Design in zwei 11. Klassen eines sprachlichen Zweigs eines Gymnasiums statt. Die Stichprobe umfasste insgesamt 41 SchülerInnen. Der Prä- und Posttest zur Erhebung des Fachwissens bestand zu beiden Zeitpunkten aus den gleichen Aufgaben. Zusätzlich wurde ein weiterer Zusatzposttest mit anderen Aufgaben als im Haupttest durchgeführt, um ein vom Vorwissen der SchülerInnen unabhängiges Ergebnis zu erhalten. Der Unterricht wurde in beiden Klassen von der gleichen Lehrkraft erteilt, welche einer der beiden Autoren dieser Studie war. Eine Klasse wurde als Treatmentgruppe über den Zugang der Elementarisierung nach Jung et al. unterrichtet, die anderer fungierte als Kontrollgruppe und wurde nach einem aus dem Schulbuch adaptierten Lehrgang unterrichtet. Die Elementarisierungen von Treatment- und Kontrollgruppe unterscheiden sich damit auch in dieser Studie in allen Aspekten und Ebenen aus Kapitel 2.1. Die Verteilung auf die Treatment- beziehungsweise auf die Kontrollgruppe erfolgte auf Grundlage der zuvor erhobenen Prätestergebnisse. In diesem Fall bildet die Klasse mit den geringeren durchschnittlichen Leistungen die Treatmentgruppe. Der Unterricht umfasste in beiden Klassen inklusive Testungen 39 Einzelstunden. Für den Vergleich der beiden Klassen wurden die Mittelwerte des Lernzuwachses (Differenz zwischen Post- und Prätest-Ergebnissen) sowie die Ergebnisse des Zusatztests betrachtet.

Bezogen auf den Lernzuwachs erzielten die SchülerInnen der Treatmentgruppe einen höchst signifikant größeren Lernzuwachs als die SchülerInnen der Kontrollgruppe bei einer sehr großen Effektstärke ( $d = 2.24$ ). Auch die Ergebnisse des Zusatztest fielen in der Treatmentgruppe signifikant besser aus bei Effektstärke von ( $d = 0.63$ ). Die Effektstärken liegen nach Hattie (2009) oberhalb eines LehrerInneneffekts.

## Zusammenfassung von Wilhelm (2005)

Die Evaluationsstudie von Wilhelm (2005) bestand im Wesentlichen aus zwei Teilen. Im ersten Teil wurde durch Befragungen die Akzeptanz der Lehrkräfte sowie die Durchführbarkeit eines zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzepts in der Sekundarstufe II nach der Elementarisierung von Wilhelm (Kap. 4.2.2.3) erhoben. Im zweiten Teil wurde in einem Treatment- und Kontrollgruppen-Design die Entwicklung von SchülerInnenvorstellungen und die Lernwirksamkeit in der Treatmentgruppe<sup>3</sup> mit der in „konventionell“ unterrichteten Klassen verglichen.

Für die Evaluation des Mechaniklehrgangs unterrichteten 13 LehrerInnen in 17 Klassen nach dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept. Die Lehrkräfte nahmen dazu vor der Durchführung des Unterrichts sowie begleitende an LehrerInnenfortbildungen teil, in denen zum einen die vorgenommene Elementarisierung auf Grundlage von bekannten SchülerInnenvorstellungen begründet wurde. Zum anderen bekamen die Lehrkräfte einen umfassenden Überblick über die zur Verfügung gestellten Materialien. Für die Durchführung erhielten die Lehrkräfte sehr detaillierte Beschreibungen der Unterrichtsverläufe. Es wurde aber betont, dass es sich bei diesen lediglich um Vorschläge handele, es durfte also methodisch davon abgewichen werden, solange die Sachstruktur beibehalten wurde. Als weitere Materialien wurden Erarbeitungs- und Übungsaufgaben, Software zur Messwerterfassung mit ikonischer Darstellung der Messwerte in Simulationen (PAKMA) und entsprechende Experimentiermaterialien zur Verfügung gestellt. Bei den Erhebungsinstrumenten handelte es sich um verschiedene Tests mit Aufgaben zur Mechanik wie zum Beispiel dem Force Concept Inventory (FCI) (Hestenes et al., 1992). Für die Kontrollgruppe der Studie wurden die in der Treatmentgruppe eingesetzten Tests und Aufgaben in Klassen vor und im Anschluss an „konventionellen“ Mechanikunterricht gestellt. Die „Kontrollgruppe“ bestand dabei genauer aus einer Vielzahl von verschiedenen Kontrollgruppen, in denen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (1988, 1994, 1997, 2003/04) die entsprechenden Test eingesetzt wurden. Eine Beschreibung der Stichprobengröße und Stichprobenanteile an den Testungen gestaltet sich entsprechend unübersichtlich. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle darauf verzichtet und bei Interesse zum Nachlesen auf Wilhelm (2005) verwiesen. Die Elementarisierungen in der Treatment- und Kontrollgruppe unterscheiden sich also potenziell in allen in Kapitel 2.1 genannten Aspekten und Ebenen, da nichts über den Unterricht in der Kontrollgruppe bekannt ist.

Die Befragung zur Akzeptanz und Durchführbarkeit sei nach Wilhelm (2005) sehr positiv ausgefallen. Das vorgestellte Unterrichtskonzept wurde als inhaltlich geschlossen und mit einem gut erkennbaren roten Faden beschrieben. Der Einsatz von ikonischen Repräsentationen und die Einführung von kinematischen Größen anhand von zweidimensionalen Bewegungen führe zu einem besseren Verständnis des Beschleunigungsbegriff und vermei-

<sup>3</sup>Wilhelm (2005) spricht bei der Zielsetzung der Studie auch davon, die Veränderungen der SchülerInnenvorstellungen der Treatmentgruppe in einem Prä-/Posttest-Design zu untersuchen, allerdings finden sich hierzu keine statistischen Auswertungen wie beispielsweise t-Tests, die eine Veränderung der SchülerInnenvorstellung vom Prä- zum Postzeitpunkt belegen könnten, weshalb diese Ergebnisse hier nicht aufgeführt werden. Der Fokus der Analysen lag auf dem Vergleich zwischen der Treatment- und der Kontrollgruppe.

de SchülerInnenvorstellungen, welche durch Reduktionen auf eindimensionale Spezialfälle entstehen. Auch in der Dynamik würden die SchülerInnen mit dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept ein besseres Verständnis für den physikalischen Kraftbegriff zeigen. Durch die Rechnerunterstützung bei den Versuchen könnten wesentlich komplexere Experimente durchgeführt werden, in denen gleichzeitig mehrere Kräfte wie auch die Reibung auf einen Körper wirken. Dadurch käme es zu einer aktiveren Auseinandersetzung mit dem Thema. Insgesamt könne die graphische Modellbildung am Computer für SchülerInnen eine Verständnishilfe im Unterricht darstellen. Für eine Einordnung der Effektstärken folgt exemplarisch für die eingesetzten Testinstrumente ein Überblick über die Ergebnisse aus dem FCI. In diesem Test erzielten die SchülerInnen der Treatmentgruppe im Mittel hoch signifikant bessere Ergebnisse als in der Kontrollgruppe bei einer Effektstärke von  $d = 0.77$ . Auch der relative Zugewinn war in der Treatmentgruppe hoch signifikant höher ( $d = 0.66$ ). Dabei wurde der größte relative Zugewinn in der Subskala zum dritten Newton'schen Axiom erreicht. Die größte Effektstärke ergab sich mit einem Wert von  $d = 0.77$  hingegen in der Subskala „Kraftverständnis“.

### **Zusammenfassung von Amenda (2017)**

In der Evaluationsstudie von Amenda (2017) wurde ein konsequenter vektorieller Ansatz der Kinematik in der Sekundarstufe II untersucht.

Unter dem *konsequenten vektoriellen Ansatz* wird in diesem Fall die konsequente mathematische Schreibweise von vektoriellen Größen in Spaltenvektoren verstanden. Bewegt sich also beispielsweise ein Körper lediglich in  $x$ -Richtung mit einem Geschwindigkeitsbetrag von  $v_x = 10$  m/s wird dennoch die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  mit ihrer  $y$ - und  $z$ -Komponente als Spaltenvektor dargestellt:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (4.1)$$

Gleiches gilt für den Ort und für die Beschleunigung eines Körpers.

Die übergeordnete Fragestellung der Studie bestand darin, ob der konsequente vektorielle Ansatz zu einer höheren Lernwirksamkeit führt als der herkömmliche skalare Schulunterricht und ob der konsequente vektorielle Ansatz im regulärem Schulunterricht durchführbar sei. Dieser Fragestellung wurde in drei Teilstudien nachgegangen.

In der ersten Vergleichsstudie wurden zwei 12. Klassen ( $n = 54$ ) einer Fachoberschule von Amenda nach dem konsequenten vektoriellen Ansatz und nach einem vergleichbaren skalaren Ansatz unterrichtet. Für beide Zugänge wurden zuvor Unterrichtsskripte angefertigt, welche sich in der inhaltlichen Elementarisierung sowie in der didaktische Reduktion jedoch nicht in der methodischen Elementarisierung unterschieden. In beiden Unterrichtsskripten wurde die Kinematik anhand von eindimensionalen Bewegungen behandelt. Für den vektoriellen Ansatz wurde bei den Bewegungen zusätzlich auch eine  $y$ -Komponente ungleich Null angegeben, welche in der zeitlichen Entwicklung aber konstant gehalten

wurde. Einen Unterschied der beiden Ansätze im Sinne der inhaltlichen Elementarisierung findet sich zum einen auf der Ebene der Repräsentationsformen durch die unterschiedliche mathematische Darstellung von Größen und des Weiteren auf der konzeptionellen Ebene beziehungsweise auf der Ebene der Verstehenselemente in der Differenzierung zwischen den Begriffen Ort und Weg sowie zwischen der Geschwindigkeit und dem Tempo. Während im skalaren Ansatz Ort und Weg das Gleiche bezeichnen und die Geschwindigkeit gleichbedeutend mit dem Betrag (Tempo) ist, wird im vektoriellen Ansatz betont, dass zwischen Ort und Weg sowie der Geschwindigkeit als Vektor mit einer Richtung und dem Tempo als Betragsgröße unterschieden werden muss.

Beide Klassen erhielten im Vorfeld der Studie Unterricht zu Vektoren im Mathematikunterricht. Ansonsten wurde versucht, alle weiteren Aspekte auch bezogen auf das den SchülerInnen zur Verfügung gestellte Material, wie eine Formelsammlung, in den beiden Treatmentklassen gleichzuhalten. Die Unterrichtssequenz umfasste für beiden Gruppen zwei 90 Minuten-Stunden. Die Klassenverbände wurden für die Durchführung der Interventionen aufgelöst und es fand eine Neubildung der Treatmentklassen mit Hilfe eines Einstufungstests statt. Als Instrumente wurden in der empirischen Erhebung ein Leistungstest eingesetzt sowie Leitfadenterviews durchgeführt. Der Leistungstest war an den Lernzielen der Unterrichtsreihen orientiert und wurde vor der Haupterhebung pilotiert. Er umfasst 5 Aufgaben mit insgesamt 31 Items in offenen und geschlossenen Antwortformaten.

Beide Treatmentklassen (skalar und vektoriell) unterschieden sich bezüglich der Ergebnisse im Leistungstest nicht signifikant voneinander ( $d = 0.44$ ). Der mathematisch anspruchsvollere vektorielle Ansatz führe laut Amenda (2017) zu gleich guten Ergebnissen wie der skalare Ansatz und sei grundsätzlich bezogen auf die Stichprobe der Vergleichsstudie unterrichtbar. Es zeige sich darüber hinaus, dass starke SchülerInnen schon nach dieser kurzen Interventionszeit den vektoriellen Ansatz bei unbekannten Problemstellungen verwenden würden. Das Unterrichtsskript zum vektoriellen Ansatz wurde anschließend durch zwei umfassende Übungsaufgaben erweitert, zusätzlich wurde die Formelsammlung überarbeitet.

Dieses veränderte Unterrichtsskript wurde erneut in einer zweiten Teilstudie mit zwei 12. Klassen der Fachoberschule ( $n = 48$ ) im Prä/Posttest-Design evaluiert, deren Klassenverband aber diesmal nicht aufgelöst wurde. Ergänzend zu den Leistungstests aus der ersten Vorstudie wurde ein kognitiver Fähigkeitentest durchgeführt und eine Klassenarbeit ausgewertet, die nach dem Posttest geschrieben wurde.

Nach der Intervention erreichten die SchülerInnen im Posttest höchst signifikant bessere Ergebnisse als im Prätest bei einer Effektstärke von  $d = 1.2$ . Der Effekt geht demnach nach Hattie (2009) über einen LehrerInneneffekt hinaus. Vergleicht man allerdings die Lernzuwächse zwischen den beiden Klassen, unterschieden sich diese signifikant voneinander, was sich auch im Vergleich der Klassenarbeitsergebnisse zeigte. Amenda (2017) folgert daraus, dass sich der mathematisch anspruchsvolle konsequente vektorielle Ansatz lernwirksam in der vorliegenden Stichprobe unterrichten ließe.

Für die dritte Teilstudie wurden das Unterrichtsskript, die Materialien und der Test erneut überarbeitet. Diesmal wurden zwei 12. Klassen ( $n = 31$ ) von anderen Lehrkräften als

dem Autor der Studie unterrichtet. Die Klassenarbeit wurde unverändert übernommen. Die SchülerInnen erzielten im Posttest nach der Intervention höchst signifikant bessere Ergebnisse als im Prätest bei einer Effektstärke von  $d = 1.4$ , also erneut oberhalb eines LehrerInneneffekts. Die beiden Klassen unterschieden sich hinsichtlich der Lernzuwächse nicht signifikant voneinander, wohingegen beim Vergleich der Ergebnisse in den Klassenarbeiten ein signifikanter Unterschied vorlag. Die Lernzuwächse waren mit denen aus der zweiten Teilstudie vergleichbar und unterschieden sich nicht signifikant. Aus diesen Ergebnissen folgert Amenda (2017) schließlich, dass der konsequente vektorielle Ansatz auch unter Feldbedingungen lernwirksam unterrichtet werden könne.

### 4.2.2 Elementarisierungen der Mechanik

Die Elementarisierung der Kinematik und Dynamik von Jung et al. für die Sekundarstufe II (Jung, 1977a, 1977b; Jung & Callsen, 1976; Jung et al., 1977) beziehungsweise für die Sekundarstufe I (Jung, 1980) bildet die Grundlage für das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept. Die Elementarisierungen von Wodzinski & Wiesner (1994a, 1994b, 1994c) für die Sekundarstufe I und Wilhelm (2005) für die Sekundarstufe II bauen auf den Ideen dieser Arbeiten auf. Aus diesem Grund wird die Elementarisierung von Jung et al. zunächst ausführlich dargestellt und bei der Vorstellung der weiteren Elementarisierungen anschließend darauf eingegangen, welche Veränderungen, Ergänzungen und Überarbeitungen vorgenommen wurden.

#### 4.2.2.1 Elementarisierung von Jung et al.

Die Grundgedanken in der Elementarisierung von Jung et al. beruhen inhaltlich auf der Vermeidung der Größen Beschleunigung und Kraft, weil diese zu komplexe Konstrukte darstellen und zu sehr alltagssprachlich vorbelastet seien (siehe Kap. 4.2.3). Dadurch wird es erforderlich, eine andere Form der Newton'schen Bewegungsgleichung als die klassische Form  $F = m \cdot a$  einzuführen, welche ohne die Begriffe der Kraft und Beschleunigung formuliert werden kann. Anstelle der Beschleunigung wird die Geschwindigkeitsänderung betrachtet, was sich wiederum auf die Behandlung der Geschwindigkeit auswirkt. Die hier vorgestellte Elementarisierung wurde ursprünglich für die Sekundarstufe II entwickelt, im Verlauf der Studie von Jung et al. (1977) wurde diese aber zusätzlich in der Grundschule beziehungsweise in der Unterstufe erprobt.

#### Geschwindigkeit

Um deutlich machen zu können, dass die Geschwindigkeitsänderung nicht immer in Richtung der Geschwindigkeit erfolgt, werden diese als vektorielle Größen mit Richtung und Betrag eingeführt. Der Geschwindigkeitsbetrag wird durch Begriffe wie Schnelligkeit oder Tempo von der Geschwindigkeit als Vektor abgrenzt und anhand eines Tachometers eingeführt. In Beispielen, wie einer Kurvenfahrt mit einem Fahrzeug, wird gezeigt, dass auch

die Angabe der Richtung notwendig ist. Die Bewegungsrichtung wird zweidimensional behandelt, indem speziell das Ein- und Ausfahren bei einer Kurve betrachtet wird, da sich hier nicht nur der Betrag, sondern auch die Richtung ändert. Anhand dieser Kurvenfahrt kann die momentane Richtung des Körpers als Tangente an der Bahnkurve definiert werden. Die Geschwindigkeit wird nun durch Geschwindigkeitspfeile als Repräsentationsform dargestellt, indem die Länge des Pfeils den Betrag repräsentiert, die Richtung des Geschwindigkeitspfeils entspricht der momentanen Bewegungsrichtung.

### Zusatzgeschwindigkeit

Jung et al. betrachten dann die Abhängigkeit der zuvor definierten Geschwindigkeit von verschiedenen Bezugssystemen. Dazu wird die Bewegung eines Körpers auf einem Versuchstisch betrachtet, welcher sich ebenfalls mit einer bestimmten Geschwindigkeit bewegt. Die resultierende Geschwindigkeit des Körpers wird nun von zwei BeobachterInnen bestimmt. BeobachterIn A bewegt sich mit dem Bezugssystem des Tisches mit und stellt die Geschwindigkeit  $\vec{v}_A$  fest. BeobachterIn B bewegt sich nicht mit und erhält die Geschwindigkeit  $\vec{v}_B$ , da zusätzlich zu  $\vec{v}_A$  noch die Geschwindigkeit des Tisches  $\vec{v}_{AB}$  dazukommt. Diese wird als Zusatzgeschwindigkeit bezeichnet. Die Beziehungen zwischen den verschiedenen Geschwindigkeiten kann mit Hilfe von Geschwindigkeitspfeilen als Repräsentationsform nachvollzogen werden. Diese Zerlegung von Geschwindigkeiten in zwei Komponenten wird anschließend verallgemeinert, so dass zu einer Geschwindigkeit immer eine weitere dazu addiert werden kann „als ob“ die Unterlage des Körpers sich ebenfalls mit einer Geschwindigkeit bewegen würde. Die erste Anwendung bildet der elastische Stoß an einer Wand (siehe Abbildung 4.1).

Der Körper hat vor dem Stoß eine Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_1$  und eine Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_2$  nach dem Stoß. Es ist also so, „als ob“ sich die Unterlage mit einer Zusatzgeschwindigkeit von  $\vec{v}_3$  bewegt. Dieser Prozess der Reflexion wird vorerst als momentane Änderung der Geschwindigkeit aufgefasst. Genauer betrachtet handelt es sich allerdings nicht um eine momentane Änderung, sondern um eine Kurve, weshalb das Konzept der Zusatzgeschwindigkeit im nächsten Schritt auf das Ein- und Ausfahren einer Kurve bezogen wird. Das einfachste Beispiel bildet die Thematisierung der Zusatzgeschwindigkeit an einer Kreislinie, da hier die Zusatzgeschwindigkeit immer in die Mitte des Kreises zeigt.

### Exkurs: Beschleunigung

In der sich an die Kinematik anschließenden Dynamik verzichten Jung et al. auf den Begriff der Beschleunigung. Stattdessen werden Stöße und Stoßfolgen betrachtet und dabei von beschleunigten Bewegungen gesprochen. Es kann aber dennoch der Vollständigkeit halber die folgende Definition des Beschleunigungsbegriffs vorgenommen werden, um an dieser Stelle die Anschlussfähigkeit der Elementarisierung deutlich zu machen. Die Änderung der Geschwindigkeit oder anders gesagt die Zusatzgeschwindigkeit kann über eine Zeit

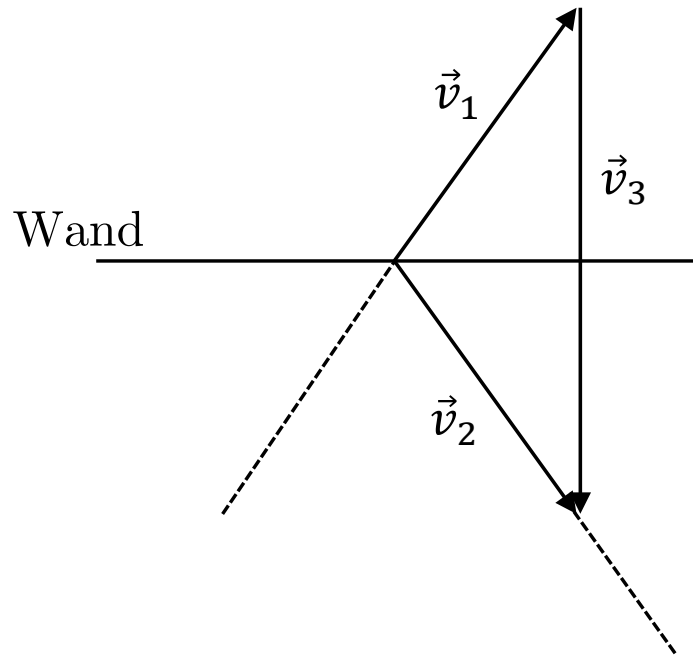


Abbildung 4.1: Reflexion an einer Wand (vgl. Jung &amp; Callsen, 1976, S. 234)

$\Delta t$  schneller oder langsamer erfolgen. Erreicht man die gleiche Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  schneller in einer kürzeren Zeit  $\Delta t$ , sagt man die Beschleunigung war größer:

$$\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = (\text{Durchschnitts-}) \text{ Beschleunigung} \quad (4.2)$$

Bezogen auf die Kreisbahn kann nun die Beschleunigung quantitativ betrachtet und vom Betrag approximiert werden. Ersetzt man den Kreisbogen durch eine Sehne und betrachte anschließend die Proportionen in ähnlichen Dreiecken kann man zeigen, dass:

$$\frac{\Delta v}{v} \approx \frac{v \cdot \Delta t}{r} \quad (4.3)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta v}{\Delta t} \approx \frac{v^2}{r} \quad (4.4)$$

Jung & Callsen (1976, S. 235) weisen schließlich darauf hin, dass der relative Fehler dieser Approximation beliebig klein wird.

### Dynamik über Stöße und Stoßfolgen

Mit dem Übergang zur Dynamik wird immer mehr zur Repräsentation durch Formeln anstatt durch Pfeilbilder übergegangen. Der Begriff des Stoßes wird zu Beginn nicht formal definiert, stattdessen wird zunächst an die Alltagserfahrung der SchülerInnen angeknüpft. Anhand von Beispielen kann gezeigt werden, dass die Stoßrichtung die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit vorgibt. Des Weiteren wird als Maß für die Stärke (Betrag) des Stoßes

das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit herangezogen. Je stärker der Stoß, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit. Damit ergibt sich:

$$\text{Stoß} \sim \Delta \vec{v} \quad (4.5)$$

Die Zusatzgeschwindigkeit, die ein Körper durch einen Stoß erhält, hängt aber nicht nur von der Stoßrichtung und dem Betrag ab, sondern auch von einer Eigenschaft des Körpers, nämlich der Masse  $m$  (hier auch als Trägheit bezeichnet). Bei einem gleichen Stoß erhält man im Falle eines Körpers mit doppelter Masse nur das halbe Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$ . Weitere Einflussgrößen gibt es nicht. Als Spezialfall eines Stoßprozesses wird im Folgenden der zentrale, vollelastische Stoß zwischen zwei Körpern betrachtet. An diesem Fall kann anschaulich gezeigt werden, dass beide Körper einen Stoß mit dem gleichen Betrag in entgegengesetzte Richtungen erfahren. Dies muss nun von der Lehrkraft verallgemeinert werden, was auf die Impulserhaltung führt<sup>4</sup>. Damit kann schließlich das Massenverhältnis bei bekannten Zusatzgeschwindigkeiten zum Beispiel beim vollelastischen Stoß zwischen zwei Körpern durch folgende Gleichung bestimmt werden:

$$m_1 \cdot \Delta \vec{v}_1 + m_2 \cdot \Delta \vec{v}_2 = 0 \quad (4.6)$$

Es folgt die exakte Definition des Stoßbegriffs<sup>5</sup>, indem dieser als Produkt aus der Masse  $m$  des gestoßenen Körpers und der sich daraus ergebenden Zusatzgeschwindigkeit definiert wird:

$$\overrightarrow{\text{Stoß}} = m \cdot \Delta \vec{v} \quad (4.7)$$

Anschließend werden Stoßfolgen behandelt. Eine beschleunigte Bewegung, also eine Bewegung, bei der sich die Geschwindigkeit ändert, kann so aufgefasst werden, dass nacheinander regelmäßig mehrere Stöße auf einen Körper wirken. Diese Stöße können langsam oder schnell aufeinander folgen, wodurch sich eine Abhängigkeit vom dazugehörigen Zeitintervall  $\Delta t$  ergibt:

$$\text{Stoßrate} = \frac{\overrightarrow{\sum \text{Stöße}}}{\Delta t} = \frac{\sum m \cdot \Delta \vec{v}}{\Delta t} \quad (4.8)$$

Die Stoßrate wird in Newton (N) gemessen. Der Kraftbegriff wird bewusst nicht eingeführt. Es bleibt die Behandlung von „Dauerkraften“ wie der Gravitationskraft oder von Zugkräfte. Um den Begriff der Kraft auch hier zu vermeiden, kann beispielsweise vom Gravitationsgesetz gesprochen werden. Dauerkraften lassen sich mit Hilfe einer genügend hohen Stoßfrequenz beliebig genau approximieren (Jung & Callsen, 1976, S. 236). Betrachtet man nun als abschließendes Beispiel den freien Fall erhält man bei einer konstanten

<sup>4</sup>Jung & Callsen (1976, S. 236) betonen hier, dass der historische Prozess hinter der Impulserhaltung stark abgekürzt wird, indem dieses Gesetz von der Lehrkraft vorgegeben wird. Möglich wäre aber an dieser Stelle einen Einblick zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn zu geben und zu erörtern, wie die Frage der empirischen Gültigkeit der Impulserhaltung beantwortet werden kann.

<sup>5</sup>Das Produkt  $m \cdot \Delta \vec{v}$  wird von Jung (1977b, S. 180) auch als Impulsmasse bezeichnet.

Stoßrate den Zusammenhang, dass  $\Delta v \sim \Delta t$  ist. In beliebig gewählten gleichen Zeitintervallen nimmt die Geschwindigkeit also um einen festen Betrag zu (Jung & Callsen, 1976, S. 236). Der Begriff der (Erd-)Beschleunigung ist für diesen Vorgang nicht notwendig.

### 4.2.2.2 Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner

Die hier vorgestellte Elementarisierung geht ursprünglich auf die Arbeiten von Wodzinski & Wiesner (1994a, 1994b, 1994c) zurück, welche ihrerseits auf einen Vorschlag der Elementarisierung nach Jung (1980) aufbauen. Das Mechanikkonzept wurde anschließend für die 7. Jahrgangsstufe des Gymnasiums in Bayern umgesetzt (Waltner et al., 2010). In der Evaluationsstudie von Tobias (2010) erhielten die Lehrkräfte Unterrichtsmaterial in Form von SchülerInnenheften mit dem Titel *Einführung in die Mechanik* (Tobias, 2010, S. 73ff). Dieses Material wurde im Anschluss an die Hauptstudie nochmals im Sinne des Design-Based-Research Ansatzes überarbeitet (Hopf et al., 2012). Zusätzlich erschienen zwei LehrerInnenhandbücher zum Mechaniklehrgang (Wiesner et al., 2011; Wilhelm et al., 2013). Die Vorstellung der Elementarisierung bezieht sich hier auf die aktuellste Ausarbeitung in den SchülerInnenheften beziehungsweise in den LehrerInnenhandbüchern, wobei an dieser Stelle lediglich die Veränderungen gegenüber der Elementarisierung von Jung et al. thematisiert werden.

### Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen

Die Elementarisierung von Jung et al. (Kap. 4.2.2.1) startet in der Kinematik mit der Definition der Geschwindigkeit. In der Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner wird hingegen mit ein Konzept zur Beschreibung von Bewegungen verbunden mit dem Aufbau einer Repräsentationsform für Bewegungen in Form von Stroboskopbildern<sup>6</sup> begonnen. Das Konzept zur Beschreibung einer Bewegung wird darüber eingeführt, dass man zu bestimmten Zeitpunkten festlegen muss, wo sich ein Gegenstand gerade befindet. Dabei müssen sowohl der Zeitpunkt der Messung als auch der Ort des Gegenstandes möglichst genau bestimmt werden. Die Bewegung kann dabei umso genauer beschrieben werden, je näher die Zeitpunkte der Messung zusammen liegen und umso präziser die Orte des Gegenstands und die Zeitpunkte bestimmt werden (vgl. Hopf et al., 2012, S. 2).

Für die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen wird anschließend die Repräsentationsform der Stroboskopbilder eingeführt, welche sich durch die gesamte Elementarisierung zieht und in der Folge durch ikonische Repräsentationen in Form von Vektorpfeilen erweitert wird. Man erhält ein Stroboskopbild, indem in gleichen Zeitabständen  $\Delta t$  nacheinander Bilder von einem Objekt gemacht werden, wobei die Kameraposition unverändert bleibt. Werden diese Bilder übereinandergelegt, erhält man ein Stroboskopbild. Die Zeit

---

<sup>6</sup>Ursprünglich wurde in den Arbeiten von Wodzinski & Wiesner (1994a, 1994c) zuerst die Beschreibung von Bewegungen durch die Angabe von Richtung und Tempo behandelt und erst im Nachhinein die Darstellung von Bewegungen mit Hilfe von Stroboskopbildern genannt. Beide Arten der Strukturierung beschreiben einen in sich stringenten Verlauf, so dass an dieser Stelle keine Aussage über eine potenziell bessere Abfolge der Themen gemacht werden kann.



Abbildung 4.2: Stroboskopbild eines Fußballs, zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunde (Hopf et al., 2012, S. 3)

$\Delta t$ , welche zwischen den einzelnen Bildaufnahmen vergangen ist, wird unter dem entsprechenden Stroboskopbild angegeben. Die Bilder können darüber hinaus für einen besseren Überblick über die Bewegung durchnummeriert werden. In Abbildung 4.2 ist als Beispiel das Stroboskopbild eines Fußballs abgebildet. Es werden von Beginn an zweidimensionale Bewegungen betrachtet und eindimensionale lediglich als Spezialfall thematisiert.

Anhand der zweidimensionalen Stroboskopbilder können nun Eigenschaften von Bewegung diskutiert werden, die sich aus den Stroboskopbildern entnehmen lassen. Durch die Abstände zwischen den einzelnen Bildern in einem Stroboskopbild können halb-qualitative Aussagen über das Tempo (Geschwindigkeitsbetrag) eines Gegenstands gemacht werden. Es gilt dabei, dass der Abstand zwischen zwei Bildern eines sich bewegenden Gegenstands umso größer ist, je größer der Betrag der Durchschnittsgeschwindigkeit ist, die der Gegenstand zwischen den beiden Bildern hatte. Entsprechend ist der Betrag der Durchschnittsgeschwindigkeit umso kleiner, je kleiner die Abstände zwischen den Bildern sind. Um später eine klare Begriffsbezeichnung zu ermöglichen, wird hier zunächst anschaulich mit den Formulierungen „schneller“ oder „langsamer“ gearbeitet. Es gibt aber auch Eigenschaften der Bewegung, über die man anhand der Stroboskopbilder keine direkte Aussage machen kann. Wenn die einzelnen Bilder nicht durchnummeriert sind, kann beispielsweise keine direkte Aussage darüber gemacht werden, an welchem Bildrand die Bewegung angefangen hat. Hierzu sind genauere Analysen des Bewegungsablaufes nötig, wobei eine eindeutige Aussage nicht immer möglich ist. Ebenso wenig können genaue Aussagen über die Bewegung zwischen den dargestellten Zeitpunkten gemacht werden, da nur diskrete Informationen durch die gezeigten Bilder vorliegen. So kann zum Beispiel im Stroboskopbild des Fußballs in Abbildung 4.2 keine eindeutige Aussage über den genauen Zeitpunkt des Aufpralls gemacht werden. Dieser kann lediglich eingegrenzt werden.

### **Geschwindigkeit**

Die Geschwindigkeit wird analog zur Elementarisierung von Jung et al. als vektorielle Größe mit Richtung und Betrag eingeführt. Der Betrag wird auch hier als Tempo bezeichnet, um diesen von der vektoriellen Größe der Geschwindigkeit abzugrenzen. Eine Erweiterung bildet an dieser Stelle die Abgrenzung zwischen dem Begriff der Richtung und dem des Ziels. Zwei Gegenstände mit der gleichen Bewegungsrichtung haben nicht unbedingt dasselbe Ziel. Umgekehrt können sich zwei Gegenstände aus unterschiedlichen Richtungen auf dasselbe Ziel zubewegen.

Das Konzept der Geschwindigkeit wird anschließend auf die Repräsentationsform von Bewegungen durch Stroboskopbilder übertragen. Dazu wurde bereits zuvor erläutert, wie zwischen zwei Punkten im Stroboskopbild das Tempo eines Körpers bestimmt werden kann. Die Richtung erhält man nun dadurch, dass man eine Verbindungslinie zwischen den beiden Punkten im Stroboskopbild zieht, zwischen denen auch das Tempo bestimmt wurde. Der Pfeilfuß des Geschwindigkeitspfeils beginnt zwischen den beiden Punkten und zeigt in Richtung der Verbindungslinie. Als letzter Schritt wird die Länge des Geschwindigkeitspfeils anhand eines festgelegten Maßstabs skaliert. Diese Konstruktion liefert dann die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen zwei Punkten.

Die Konstruktion von Durchschnittsgeschwindigkeitspfeilen in Stroboskopbildern ist für den weiteren Verlauf der Elementarisierung allerdings nicht relevant, stattdessen werden Momentangeschwindigkeitspfeile betrachtet, welche nicht unmittelbar aus den Stroboskopbildern konstruiert werden können. Im Material (Hopf et al., 2012, S. 8) wird der Übergang von Durchschnitts- zu Momentangeschwindigkeitspfeilen gar nicht thematisiert. In der ersten, ursprünglichen Fassung (Wodzinski & Wiesner, 1994a) hingegen wurde noch Wert auf eine konsequente Unterscheidung zwischen den beiden Begrifflichkeiten gelegt. Im Weiteren sind mit der Bezeichnung Geschwindigkeitspfeilen immer Momentangeschwindigkeitspfeile gemeint. In Abbildung 4.3 ist als Beispiel das Stroboskopbild des Fußballs aus Abbildung 4.2 mit eingezeichneten Momentangeschwindigkeitspfeilen gezeigt.

### **Die Zusatzgeschwindigkeit**

In der Elementarisierung nach Wodzinski & Wiesner wird analog wie bei Jung et al. auf den Begriff der Beschleunigung verzichtet, da dieser für SchülerInnen der Sekundarstufe I nur schwer zugänglich sei (Tobias, 2010). Stattdessen werden in der Kinematik nur Vorgänge der Geschwindigkeitsänderung in Folge von Stoßprozessen betrachtet und das Konzept der Zusatzgeschwindigkeit eingeführt.

Zur Einführung der Zusatzgeschwindigkeit wird hier allerdings nicht wie bei Jung et al. ein Wechsel zwischen Bezugssystemen anhand eines Förderband-Effekts betrachtet. Stattdessen erfolgt die Einführung über zwei Versuche. Im ersten Versuch wird eine Kugel aus der Ruhe heraus in ein Tor gestoßen. Beim zweiten Versuch bewegt sich die Kugel zuvor schon von links nach rechts und erfährt dann senkrecht zur Bewegungsrichtung einen Stoß in Richtung des Tores. Beim ersten Versuch geht die Kugel ins Tor, beim zweiten Versuch

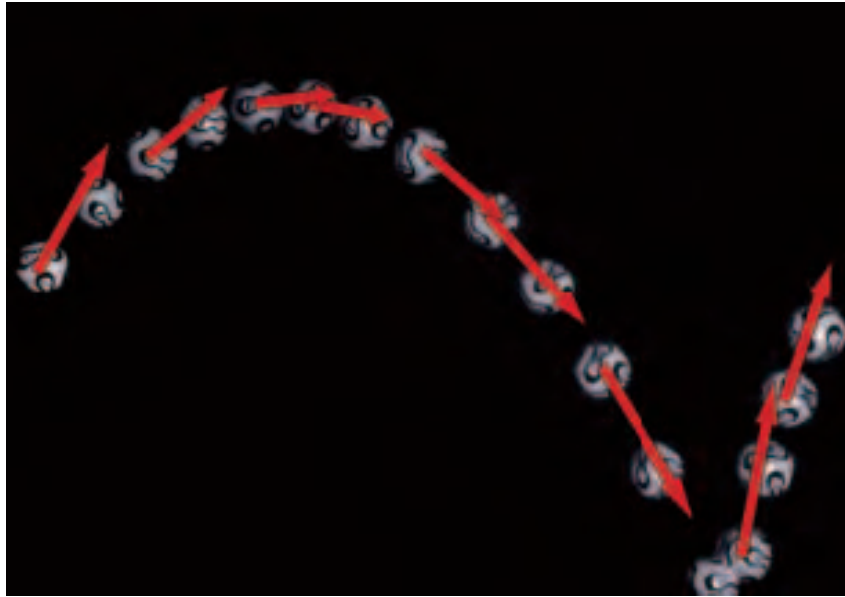


Abbildung 4.3: Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Fußballs (Hopf et al., 2012, S. 8)

verfehlt die Kugel das Tor und geht rechts vorbei. Der Ausgang des zweiten Versuchs wird als Grundlage für die folgenden Diskussion verwendet. Die Kugel im zweiten Versuch führt zwei Bewegungen gleichzeitig aus. Sie behält die Bewegung in der Anfangsrichtung und führt eine zusätzliche Bewegung in Stoßrichtung aus. Die Geschwindigkeit vor dem Stoß wird als Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  und die Geschwindigkeit nach dem Stoß als Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$  bezeichnet. Durch den Stoß hat die Kugel eine Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  erhalten. Der dazugehörige Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit zeigt in die gleiche Richtung wie der Stoß (Hopf et al., 2012, S. 10f). Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  verbindet dann die Pfeilspitze der Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  mit der Pfeilspitze der Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$ . In Abbildung 4.4 sind die entsprechenden Geschwindigkeiten für den zweiten Versuch mit dem Torstoß eingezeichnet.

### Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

Zentrales Element der Elementarisierung nach Wodzinski & Wiesner bildet die Newton'sche Bewegungsgleichung. Zur Herleitung werden zunächst nacheinander die Einflussfaktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  thematisiert (Einwirkung, Einwirkungsdauer und Masse), um diese im Anschluss in der Newton'schen Bewegungsgleichung zusammenzufassen. Dieses Vorgehen beinhaltet insbesondere die Einführung des Kraftbegriffs, welcher in der Elementarisierung nach Jung et al. bewusst vermieden wurde.

Der Zusammenhang zwischen einer Einwirkung und der Zusatzgeschwindigkeit wird durch die Erweiterung des prototypischen Kugelstoßversuchs (Abb. 4.4) motiviert, indem in einem zweiten Schritt ungefähr doppelt so stark gegen die Kugel gestoßen wird. Als Beobachtung kann festgestellt werden, dass das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit bei einer

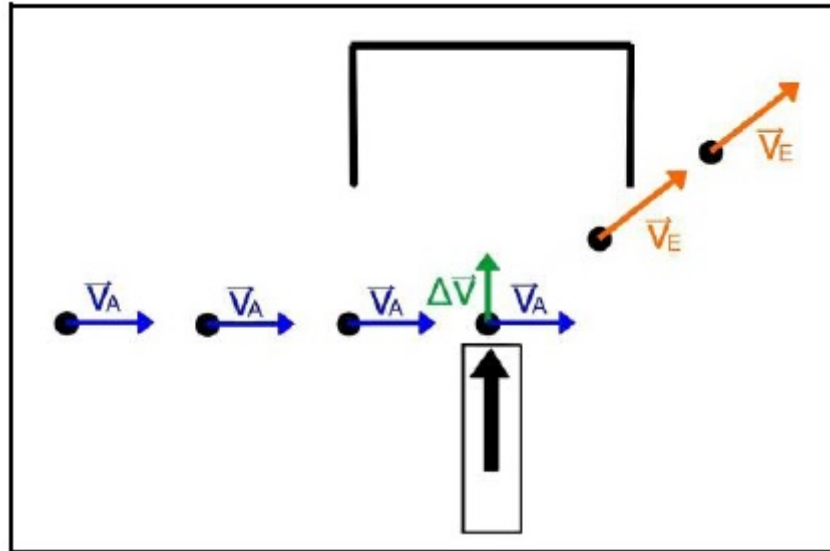


Abbildung 4.4: Die Zusatzgeschwindigkeit (Hopf et al., 2012, S. 11)

stärkeren Einwirkung größer ist. Dies kann verallgemeinert werden und es wird der Begriff der Einwirkungsstärke eingebracht. Analog kann formuliert werden, dass bei größerer Einwirkungsstärke der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger ist (Hopf et al., 2012, S.17). Der Begriff der Einwirkung lässt sich weiter präzisieren, indem der physikalische Kraftbegriff eingeführt wird. Die Kraft  $\vec{F}$  wird, wie die Geschwindigkeit, als vektorielle Größe mit Richtung und Betrag eingeführt, welche die Größen Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtung zusammenfasst. Die Einheit der Kraft wird an dieser Stelle noch nicht thematisiert. Damit ergibt sich der Zusammenhang zwischen einer Einwirkung und der Zusatzgeschwindigkeit dazu, dass je größer die Einwirkungsstärke einer Kraft ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$ , beziehungsweise desto länger ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit. Dies gilt nur unter der Voraussetzung, dass die Einwirkungsdauer der Kraft und die Masse des Körpers gleich bleiben.

Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe der Computersimulation „Bewegung nach Kraftstoß“ (Rachel, o. D.) veranschaulicht werden. In der Simulation erfährt eine Kugel, wie schon zuvor bei der Zusatzgeschwindigkeit (Abb. 4.4) einen Stoß senkrecht zur Bewegungsrichtung, wenn sie eine gespannte Feder passiert. Oberhalb dieser Kugel bewegt sich eine weitere Kugel mit der gleichen Anfangsgeschwindigkeit. Die Bewegung wird als Stroboskopbild dargestellt, wobei im Zentrum der Kugel automatisch die Geschwindigkeitspfeile eingezeichnet werden können. Durch das unterschiedliche Spannen der Feder kann die Einwirkungsstärke der Kraft auf die Kugel variiert werden. Je mehr die Feder gespannt wird, desto größer ist die Einwirkungsstärke auf die Kugel. In Abbildung 4.5 sind exemplarisch die Stroboskopbilder aus der Simulation für zwei verschiedene Federspannungen dargestellt.

Im unteren Fall ist die Feder doppelt so stark gespannt wie im ersten Bild und wirkt damit auch mit der doppelten Einwirkungsstärke auf die Kugel ein. Als Resultat ist das

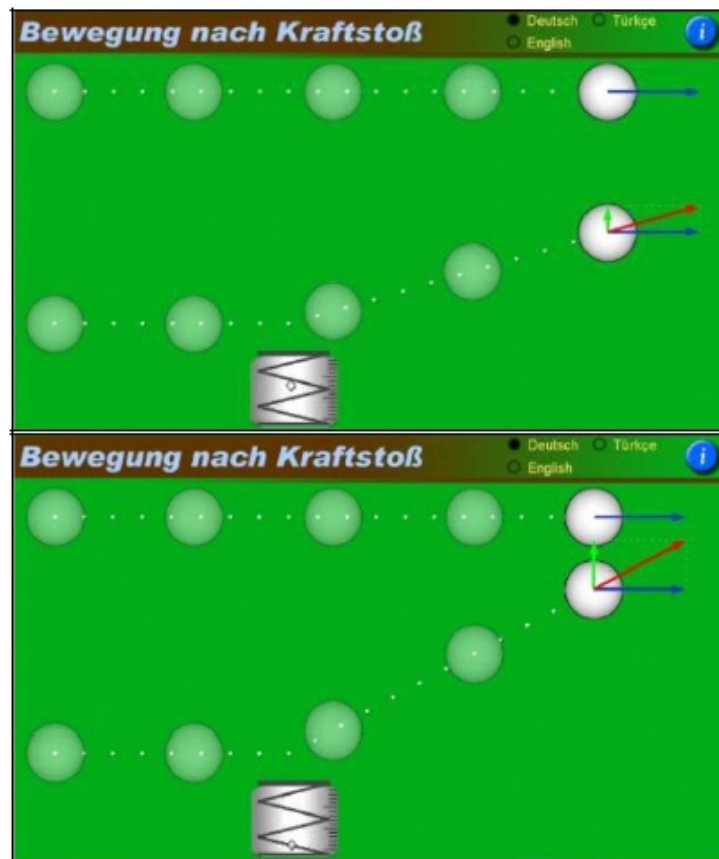


Abbildung 4.5: Simulation zu Kraft und Bewegung: Zusammenhang zwischen Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit (Hopf et al., 2012, S. 18)

Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, welche die Kugel durch den Stoß erhält, auch doppelt so groß (grüner Pfeil).

### Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit

Zur Einführung der Einwirkungsdauer wird erneut der Kugelstoßversuchs durchgeführt, in dem sich eine Kugel mit einer Anfangsgeschwindigkeit von links nach rechts bewegt. In diesem Fall erfährt die Kugel allerdings keinen Stoß senkrecht zur Bewegungsrichtung, sondern es wird mit Hilfe eines Föhne eine Kraft mit konstanter Einwirkungsstärke auf die Kugel ausgeübt. In einem zweiten Schritt werden zwei Föhne nebeneinander gelegt, um so die Zeit, in der die Kraft auf die Kugel ausgeübt wird, zu verdoppeln. Die Zeit, in der eine Kraft auf einen Körper ausgeübt wird, wird als Einwirkungsdauer bezeichnet. Analog zur Einwirkungsstärke ergibt sich der allgemeine Zusammenhang, dass je länger die Einwirkungsdauer einer Kraft auf einen Körper ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$ , die der Körper dabei erhält (Hopf et al., 2012, S. 18), vorausgesetzt die Kraft und die Masse bleiben gleich. Die Einwirkungsdauer wird mit dem Formelzeichen  $\Delta t$  bezeichnet. Auch dieser Zusammenhang kann mit Hilfe der Simulation „Bewegung nach Kraftstoß“ (Rachel, o. D.) veranschaulicht. Anstatt dieses Mal über die

Feder einen Stoß auf die Kugel auszuüben, wird mit einem Ventilator eine Kraft auf die Kugel ausgeübt. Durch die Breite des Ventilators kann die Einwirkungsdauer der Kraft auf die Kugel variiert werden.

### Masse und Zusatzgeschwindigkeit

Auch bei der Thematisierung des letzten Einflussfaktors auf die Zusatzgeschwindigkeit, der Masse, wird mit dem Kugelstoßversuchen begonnen allerdings dieses Mal mit einer leichten und einer schwereren Kugel. Als Beobachtung kann festgestellt werden, dass das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit umso größer wird, je leichter der Körper ist. Bei einem schwereren Körper ist entsprechend das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit kleiner bei gleicher Einwirkungsstärke und Einwirkungsdauer. Diese Eigenschaft des Körpers wird anschließend als Masse  $m$  definiert und die zugehörige Einheit  $1\text{ kg}$  angegeben. Daraus ergibt sich die Verallgemeinerung, dass je größer die Masse eines Körpers ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$ , die der Körper dabei erhält, vorausgesetzt die Kraft und die Einwirkungsdauer bleiben konstant (Hopf et al., 2012, S. 19).

Erneut wird auch dieser letzte Zusammenhang anhand der Simulation „Bewegung nach Kraftstoß“ (Rachel, o. D.) vertieft.

Damit wurden alle Zusammenhänge zwischen den Einflussfaktoren und der Zusatzgeschwindigkeit thematisiert. Diese werden schließlich in der Form der Newton'schen Bewegungsgleichung zusammengeführt.

### Newton'sche Bewegungsgleichung

Alle bisher thematisierten Einflussfaktoren, also Einwirkungsstärke, -richtung, -dauer und die Masse, werden in Form der Newton'schen Bewegungsgleichung (NBG) zusammengefasst:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta\vec{v} \quad (4.9)$$

Die Herleitung wird im Folgendem erläutert (Hopf et al., 2012, S. 20):

1. Wenn auf einen Körper eine Kraft  $\vec{F}$  ausgeübt wird, erhält dieser eine Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$ .
2. Die Richtung der Kraft und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich.
3. Je größer die Einwirkungsstärke der Kraft  $\vec{F}$  ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  (bei jeweils gleicher Einwirkungsdauer und Masse).
4. Je länger die Einwirkungsdauer  $\Delta t$  ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  (bei jeweils gleicher Kraft und Masse).
5. Je größer die Masse  $m$  des Körpers ist, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  (bei jeweils gleicher Kraft und Einwirkungsdauer).

Die Gleichung wird hier als qualitativer Zusammenhang zwischen den Größen eingeführt und soll nicht durch Umstellen und dem Einsetzen von Werten in die Gleichung für quantitative Berechnung verwendet werden. Die Maßeinheit einer Kraft wird als Newton (N) definiert und kann mit Hilfe der bereits bekannten Einheiten ausgedrückt werden:

$$1 \text{ N} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s} \quad (4.10)$$

$$\Rightarrow 1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} \quad (4.11)$$

#### 4.2.2.3 Elementarisierung von Wilhelm

Im Folgenden wird die Elementarisierung von Wilhelm für die Sekundarstufe II vorgestellt. Im Unterschied zur Sekundarstufe I wird der Beschleunigungsbegriff behandelt und entsprechend die Newton'sche Bewegungsgleichung in einer anderen Form ( $\vec{a} = \sum \vec{F}/m$ ) eingeführt. Gleich bleibt die Betonung von zweidimensionalen Bewegungen sowie des Richtungscharakters von vektoriellen Größen (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Kraft) und die Einführung der Geschwindigkeitsänderung<sup>7</sup>  $\Delta\vec{v}$ , auch wenn sich das Vorgehen durch den Einsatz von Computersimulationen wie PAKMA (siehe z.B. Reusch et al., 2000) teilweise von den Vorarbeiten unterscheidet. Man kann das Konzept für die Sekundarstufe II als eine Erweiterung des Mechanikkonzepts für die Sekundarstufe I auffassen (vgl. Wilhelm, 2005, S. 114).

#### Geschwindigkeit

Als Prototyp für eine geeignete Darstellung einer Bewegung wird die Bahnkurve einer PC-Maus auf einem Bildschirm aufgenommen. Im nächsten Schritt werden für festgelegten Zeitpunkte in gleichen Abständen  $\Delta t$  auf der Bahnkurve Ortsvektoren  $\vec{x}$  bezüglich eines zuvor festgelegten Bezugssystems bestimmt. Auf diese Art und Weise erhält man eine ähnliche Repräsentationsform von Bewegungen wie die Stroboskopbilder aus der Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner mit dem Unterschied, dass hier zusätzlich Ortsvektoren eingezeichnet werden und damit die Repräsentationsform erweitert wird.

Durch diese Ortsvektoren kann die Änderung des Ortes in einem Zeitintervall  $\Delta t$  durch die Betrachtung der Ortsänderung  $\Delta\vec{x}$  visualisiert werden. Eine entsprechende Konstruktion ist in Abbildung 4.6 gezeigt. Die Ortsänderung erhält man über die Differenz der Ortsvektoren zum Anfang ( $\vec{x}_{\text{alt}}$ ) und zum Ende ( $\vec{x}_{\text{neu}}$ ) des betrachteten Zeitintervalls:

$$\Delta\vec{x} = \vec{x}_{\text{neu}} - \vec{x}_{\text{alt}} \quad (4.12)$$

<sup>7</sup>Es wird an dieser Stelle bewusst ein anderer Begriff gewählt, da in der Elementarisierung für die Sekundarstufe II  $\Delta\vec{v}$  zwar auch eine eigenständige Größe darstellt, aber nur einen Übergang zum Begriff der Beschleunigung bildet.

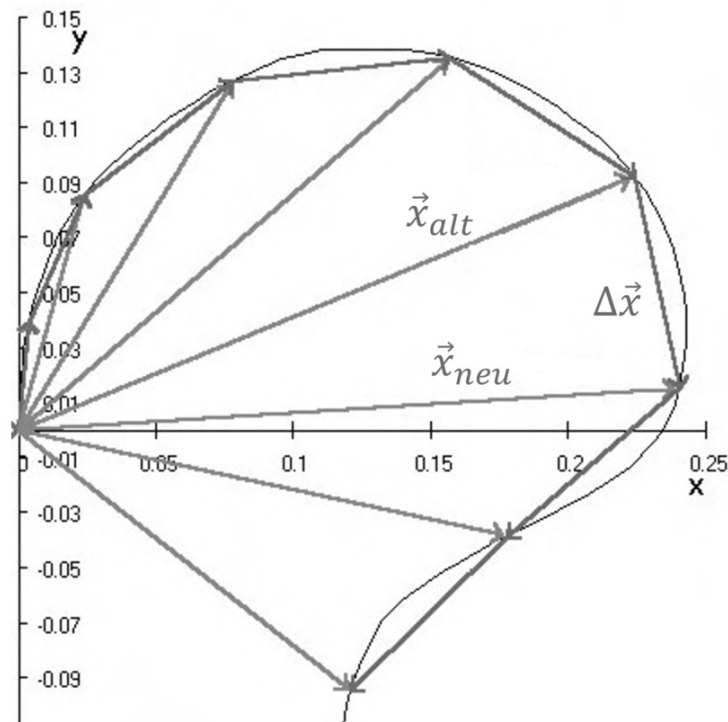


Abbildung 4.6: Konstruktionsbeispiel zum Änderungsvektor ( $\Delta t = 0,25$  s) (vgl. Wilhelm, 2005, S. 90)

Wird nun der Änderungsvektor  $\Delta \vec{x}$  durch die Zeit  $\Delta t$  dividiert, erhält man den Vektor der Durchschnittsgeschwindigkeit:

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} \quad (4.13)$$

Der entsprechende Pfeil wird so eingezeichnet, dass der Pfeilfuß auf der Bahnkurve in etwa zwischen den beiden Punkten beginnt, zwischen denen die Durchschnittsgeschwindigkeit bestimmt wurde. Ein Vektor für die Momentangeschwindigkeit kann näherungsweise für kleine Zeitintervalle  $\Delta t$  bestimmt werden.

## Beschleunigung

Für die Behandlung des Beschleunigungsbegriffs wird zunächst der Vektor der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta \vec{v}$  in einem Zeitintervall  $\Delta t$  analog zum Ortsänderungsvektor eingeführt. Bei zwei gegebenen Geschwindigkeitsvektoren zum Anfang ( $\vec{v}_{alt}$ ) und zum Ende ( $\vec{v}_{neu}$ ) des Zeitintervalls ergibt sich der Vektor der Geschwindigkeitsänderung zu:

$$\Delta \vec{v} = \vec{v}_{neu} - \vec{v}_{alt} \quad (4.14)$$

Wird dieser Vektor  $\Delta\vec{v}$  durch die Zeit  $\Delta t$  dividiert, erhält man den Vektor der Durchschnittsbeschleunigung:

$$\vec{a} = \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (4.15)$$

Analog zur Durchschnittsgeschwindigkeit wird der Pfeilfuß der Durchschnittsbeschleunigung auf die Bahnkurve zwischen die beiden Punkte gesetzt, zwischen denen die Beschleunigung bestimmt wurde. In Abbildung 4.7 sind exemplarisch für eine gegebene Bahnkurve Durchschnittsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen eingezeichnet.

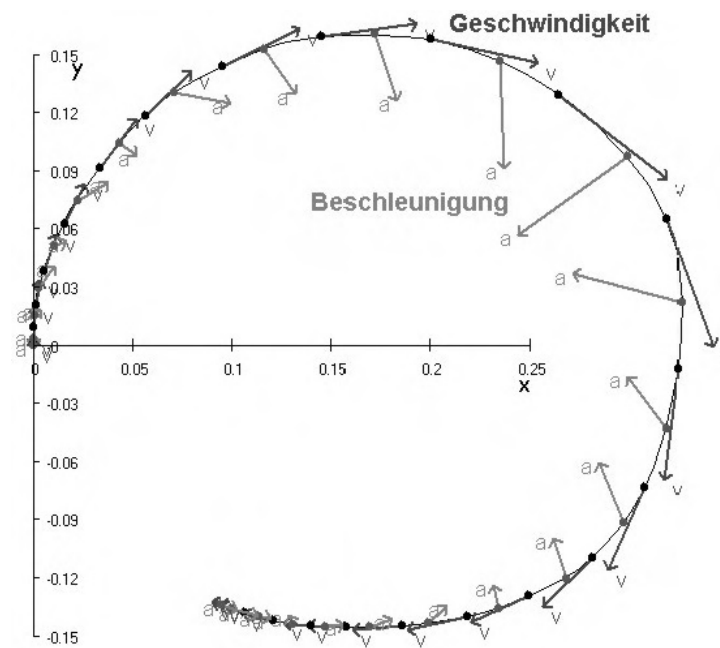


Abbildung 4.7: Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Bewegung (Wilhelm, 2005, S. 93)

Eine Möglichkeit der visuellen Darstellung von Geschwindigkeiten und Beschleunigung besteht durch die Computersoftware PAKMA (Reusch et al., 2000), welche automatisch entsprechende Pfeile bei einer vorgegebenen Bahnkurve (Messwerte für Ort und Zeit) zum Beispiel aus einem Video darstellen kann. Werden die Messwerte direkt mit einer geeigneten Software aufgenommen, können mit PAKMA ebenfalls Geschwindigkeiten und Beschleunigungen direkt konstruiert werden (siehe Abb. 4.7). Hierbei ist auch eine entsprechende Näherung für Momentangeschwindigkeiten und -beschleunigungen bei der Wahl von geeigneten Zeitintervallen  $\Delta t$  möglich. Es folgt die Elementarisierung des zweiten Newton'schen Axioms.

### Das zweite Newton'sche Axiom

Zur Einführung der Dynamik wird von der Betrachtung im Zweidimensionalen abgewichen und zu einem „konventionellen“ Zugang übergegangen. Es wird ein Versuch durchgeführt, in dem ein an einem Faden hängendes Massestück über eine Umlenkrolle einen Gleiter auf einer Luftkissenbahn zieht. Die Definition der Kraft als vektorielle Größe aus dem „konventionellen“ Mechanikunterricht der Sekundarstufe I wird als bekannt vorausgesetzt. Mit Hilfe von Lichtschranken können Werte für die mittlere Beschleunigung des Gleiters gemessen werden. Man erhält schließlich den Zusammenhang, dass bei konstanter Gesamtmasse (Gleiter und Massestück) die Beschleunigung proportional zur Zugkraft durch das Massestück ist. Umgekehrt erhält man, dass bei konstanter Zugkraft die Beschleunigung proportional zur Gesamtmasse ist. Daraus wird die Gleichung für das zweite Newton'sche Axiom (an dieser Stelle zunächst nur für Betragsgrößen) abgeleitet, welche allerdings nicht in der „konventionellen“ Form, sondern gemäß des Ursache-Wirkungskonzept (vgl. Wilhelm, 2005, S. 110) formuliert wird:

$$a = \frac{F}{m} \quad (4.16)$$

Im nächsten Schritt muss die entsprechende Proportionalität für vektorielle Größen gezeigt werden. Hierzu wird ein Versuch mit einer kippbaren Luftkissenbahn durchgeführt. Aus der Neigung der Luftkissenbahn kann die resultierende Hangabtriebskraft auf einen Gleiter variiert werden. Nun wird mit Hilfe einer Messapparatur zu jedem Zeitpunkt die Beschleunigung des Gleiters und die Hangabtriebskraft gemessen und beides in einer Animation auf einem Computer dargestellt. Man kann zeigen, dass die Pfeile von Beschleunigung und Kraft stets in die gleiche Richtung zeigen und das gleiche Längenverhältnis aufweisen. Es gilt daher, dass  $\vec{a} \sim \vec{F}$ .

Bei dem oben beschriebenen Versuch wirkt (für die SchülerInnen vereinfacht gesagt) nur die Hangabtriebskraft auf den Gleiter. Durch Hinzunahme von weiteren Kräften, wie zum Beispiel der Reibung, kann die Proportionalität der Beschleunigung zu einer Summe von Kräften gezeigt werden, wodurch sich schließlich eine allgemeinere Form des zweiten Newton'schen Axioms ergibt:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \quad (4.17)$$

Die Elementarisierung von Wilhelm verfolgt zusammenfassend eine Kombination von Elementen des zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzepts mit Elementen des „konventionellen“ eindimensionalen Schulunterrichts. Dabei werden wesentliche Ideen der Elementarisierungen von Jung et al. bzw. Wodzinski & Wiesner aufgegeben wie zum Beispiel das Weglassen der Beschleunigung oder die Betrachtung von Stoßprozessen statt konstanten Kräften.

### 4.2.3 Begründungen der Elementarisierungen

Die didaktischen Überlegungen und Begründungen in diesem Abschnitt sind nicht nur aus den empirischen Studien (Jung et al., 1977; Tobias, 2010; Wilhelm, 2005), sondern auch aus aktuelleren Veröffentlichungen zu Elementarisierungen und SchülerInnenvorstellungen in der Mechanik entnommen oder beziehen sich auf diese (siehe z.B. Schecker et al., 2018; Wilhelm, 2016, 2018). Die Begründungen hinter den drei Elementarisierungen werden hier zusammenhängend dargestellt, da die Elementarisierungen stellenweise aufeinander aufbauen, wodurch es auch zu Überschneidungen in den Begründungen kommt. Die Argumente beziehen sich daher, wenn nicht anders angegeben, auf alle Elementarisierungen. Auf Abweichungen zwischen den verschiedenen Argumentationen wird stets gesondert eingegangen.

Jung et al. (1977, S. 9) betonen, dass die Geschwindigkeit als isolierter Begriff keine entscheidende Bedeutung für das Verständnis der Newton'schen Mechanik habe. Viel entscheidender sei nach Jung et al. (1977, S. 9) das Konzept der Geschwindigkeitsänderung, denn dieses liefere die Verknüpfung der Kinematik mit der Dynamik, indem die Geschwindigkeitsänderung mit Impulsänderungen oder Krafteinwirkungen in Verbindung gebracht würde. Ein adäquates Verständnis der Geschwindigkeitsänderung setze in dem Sinne aber auch die vollständige Behandlung der Geschwindigkeit voraus. Es sei notwendig, die Geschwindigkeit als vektorielle Größe mit Richtung und Betrag einzuführen, da ansonsten eine bloße Richtungsänderung bei konstantem Betrag nicht als Geschwindigkeitsänderung verstanden werden könne. Diese Einführung sollte darüber hinaus direkt anhand von zweidimensionalen Bewegungen erfolgen.

Wilhelm (2005, S. 88) schreibt dazu, dass „[s]owohl die Reduktion auf eindimensionale Betrachtungen, als auch [...] die Reduktion des Vektorcharakters nur auf das Vorzeichen nicht zur Überwindung von Fehlvorstellungen geeignet [ist]“. Bei eindimensionalen Bewegungen, die im Ursprung beginnen, gibt es keine klare Unterscheidung zwischen den Größen Ort (Punkt in einem Bezugssystem), Ortsverschiebung (Verschiebungsvektor des Ortes), Strecke (Abstand zwischen zwei Orten), Weg (Bahnkurve) und der Weglänge (Länge der Bahnkurve), da alle Größen im Prinzip das Gleiche beschreiben und auch, bei der Reduktion der vektoriellen Größen auf ihren Betrag, den gleichen Zahlenwert annehmen. Durch die Überbetonung von eindimensionalen Bewegungen im Anfangsunterricht, die im Ursprung beginnen, komme es daher zu einer inkonsistenten Darstellung der Kinematik und bei den SchülerInnen nicht zu einer ausdifferenzierten Begriffsbildung. Betrachtet man zum Beispiel eine Kurvenfahrt im Zweidimensionalen, welche nicht im Ursprung beginnt, bezeichnen alle oben genannten Größen etwas Unterschiedliches. Darüber hinaus verwenden viele Schulbücher für alle Größen synonym das Formelzeichen  $s$ . Die in Schulbüchern verwendete Darstellungsform von Bewegung durch  $s(t)$ -Diagramme weist die gleichen Schwierigkeiten auf, da auch hier die Größe  $s$  nicht eindeutig definiert ist. Darüber hinaus kann die Darstellungsform des  $s(t)$ -Diagramms meist nur für eindimensionale Bewegungen verwendet werden, da keine Möglichkeit einer Richtungsinformation bei mehrdimensionalen Bewegungen besteht (vgl. Wilhelm, 2018, S. 5f).

Wird die vektorielle Größe der Geschwindigkeit auf eine skalare Größe oder noch weiter auf

eine positive Betragsgröße reduziert, können sich dadurch Lernschwierigkeiten (siehe Kap. 4.1.1) für die SchülerInnen gerade in Bezug auf zweidimensionale Bewegungen ergeben. Eine gleichförmige Kreisbewegung hätte bei der Reduktion auf eine positive Betragsgröße eine konstante Geschwindigkeit, womit es sich nicht um eine beschleunigte Bewegung handeln würde. Daraus könnten SchülerInnen weiter folgern, dass bei einer Kreisbewegung keine resultierende Kraft auf einen Körper wirken müsse (siehe z.B. Schecker et al., 2018). Wilhelm (2018, S. 12) nennt als weiteren Aspekt dieses Beispiels, dass im Falle einer gleichmäßigen Kreisbewegung sich die Durchschnittsgeschwindigkeit bei einer kompletten Umrundung zu Null ergebe, das Durchschnittstempo bleibe hingegen zu jedem Zeitpunkt konstant ungleich Null. Auch die Reduktion der Geschwindigkeit auf eine skalare Größe mit Vorzeichen ist nicht in der Lage zweidimensionale Bewegungen wie die gerade genannte Kreisbewegung zu beschreiben, da nur zwei Möglichkeiten der Richtungsangabe bestehen. Darüber hinaus würde das Vorzeichen der Geschwindigkeit als Richtungsinformation bei eindimensionalen Bewegung mehr als Zusatz und nicht als Bestandteil der Geschwindigkeit verstanden (vgl. Schecker et al., 2018; Wilhelm, 2005). Daher wird im zweidimensional dynamischen Mechanikkonzept die Geschwindigkeit als Vektor mit dem Tempo als Betrag eingeführt. „[Die] Vorstellung der Schüler[Innen] von der Geschwindigkeit als skalare Größe wird im Unterrichtskonzept nicht als falsch bezeichnet, sondern [...] umgedeutet [...]“ (Wilhelm, 2005, S. 88). Die Darstellung der Geschwindigkeit erfolgt mit Hilfe von ikonischen Repräsentationen in Form von Vektorpfeilen. Die Beschreibung durch  $v(t)$ -Diagramme ist auch hier gerade in Bezug auf zweidimensionale Bewegungen nicht geeignet, da zum einen die Geschwindigkeit wieder auf eine skalare Größe reduziert wird und zum anderen lediglich durch verschiedene Vorzeichen eine Information über die Richtung der Bewegung abgebildet werden kann.

Problematisch würde der fehlende Richtungsaspekt auch später bei der Behandlung der Dynamik, denn „[o]hne den vektoriellen Geschwindigkeitsbegriff gibt es keine einheitliche dynamische Beschreibung der Phänomene [...]“ (Jung et al., 1977, S. 10). Aus diesem Grund plädieren Jung et al. (1977) dafür, den Geschwindigkeitsbegriff von Beginn des Mechanikunterrichts oder sogar schon in der Grundschule als gerichtete Größe einzuführen, damit es schon früh zu einer Abgrenzung zwischen der Alltagssprache der SchülerInnen und den physikalischen Begriffen kommen könne.

Der Begriff der Beschleunigung wird in den Elementarisierungen von Jung et al. sowie von Wodzinski & Wiesner vollständig vermieden, da die Beschleunigung als zweite Ableitung für SchülerInnen nur schwer verständlich sei (vgl. z.B. Jung et al., 1977). Stattdessen wird die Geschwindigkeitsänderung als eigenständige Größe eingeführt, welche als Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  bezeichnet wird.

Die Zusatzgeschwindigkeit wird in der Elementarisierung von Jung et al. zunächst über den „Förderband-Effekt“ eingeführt, da die Veränderung von Geschwindigkeit durch Förderbänder unmittelbar in Experimenten gezeigt werden könne (Jung et al., 1977, S. 12). In der Weiterentwicklung der Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner wird die Zusatzgeschwindigkeit hingegen anhand von Stoßprozessen senkrecht zur Bewegungsrichtung eingeführt. „Die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta\vec{v}$  in einem Zeitintervall  $\Delta t$  ist besonders einfach zu verstehen, wenn man eine zweidimensionale Bewegung hat, die abschnittsweise

linear ist und nur durch eine sehr kurze Einwirkung, auch Stoß genannt, verändert wird [...]“ (Wilhelm, 2016, S. 23). In diesem Fall kann zum Zeitpunkt der Einwirkung der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  aus denen der Anfangs- und Endgeschwindigkeit konstruiert werden.

Im Unterrichtskonzept zur Sekundarstufe II nach Wilhelm werden keine Stöße betrachtet und die Beschleunigung als Geschwindigkeitsänderung  $\Delta \vec{v}$  in einem Zeitintervall  $\Delta t$  explizit behandelt. Aber auch hier ist die Beschleunigung ein Vektor mit Richtung und Betrag. Würde hingegen die Beschleunigung als skalare Größe eingeführt werden, ergeben sich erneut mögliche Lernschwierigkeiten (siehe Kap. 4.1.1) für die SchülerInnen gerade bei der Reduktion auf eindimensionale Bewegungen, welche bei einer Anfangsgeschwindigkeit von Null beginnen.

Die Behandlung der Dynamik solle nach Jung et al. (1977, S. 10) thematisch direkt an die Kinematik anschließen und nicht isoliert behandelt werden, weil ansonsten keine adäquate Verknüpfung zu den Größen der Kinematik möglich sei. Wird der Kraftbegriff an statischen Situationen eingeführt, können dadurch bekannte Lernschwierigkeiten (siehe Kap. 4.1.2) bei SchülerInnen entstehen oder bereits bestehende verstärkt werden. In der Statik ist ein Kräftegleichgewicht gleichbedeutend mit einem ruhenden Körper, der Fall einer konstanten Geschwindigkeit bei einer verschwindenden resultierenden Kraft wird nicht thematisiert. Daher könnte von den SchülerInnen gefolgert werden, dass für eine Geschwindigkeit ungleich Null immer eine resultierende Kraft auf den Körper wirken muss. Wirkt nun eine resultierende Kraft auf einen sich zuvor in Ruhe befindlichen Körper, indem der Betrag einer wirkenden Kraft erhöht wird, bewegt sich der Körper augenblicklich in die Richtung der größeren Kraft. Anders formuliert, die Bewegung läuft in diesem Fall immer in Kraftrichtung ab (vgl. Tobias, 2010, S. 68) und nicht die Bewegungsänderung. Das Wechselwirkungsprinzip muss in der Statik nicht beachtet werden, da stets nur ein Körper betrachtet wird, stattdessen könne die Beschränkung auf die Statik zur Vermischungen zwischen dem Wechselwirkungsprinzip und zwei sich aufhebenden Kräften im Kräftegleichgewicht führen (vgl. z.B. Schecker et al., 2018; Wilhelm, 2018). Auch die Vorstellung der Trägheit als am gleichen Körper angreifenden Gegenkraft kann durch die Statik unterstützt werden (vgl. Wilhelm, 2018). Des Weiteren spielt die Dauer einer Krafteinwirkung bei statischen Situationen keine Rolle, weil sich stets alle angreifenden Kräfte im Gleichgewicht befinden. Tobias (2010, S. 68) betont außerdem, dass es sich bei Statik um einen Spezialfall der Dynamik handle und es sehr schwer sei, durch Verallgemeinerungen vom statischen Sonderfall zur Dynamik überzugehen. Hingegen bereite der umgekehrte Weg weniger Schwierigkeiten (Tobias, 2010, S. 68).

Ab diesem Punkt laufen die Argumentationen hinter den verschiedenen Elementarisierungen erneut auseinander, da in der Elementarisierung von Jung et al. der Kraftbegriff vermieden wird und stattdessen die Größen Stoß und Stoßrate eingeführt werden. Es wird daher zunächst die Argumentation für die Elementarisierung von Jung et al. zu Ende geführt und im Anschluss auf die weiteren Elementarisierungen eingegangen.

Die Verknüpfung zwischen Kinematik und Dynamik solle nach Jung et al. (1977, S. 10f) über die Geschwindigkeitsänderung gehen und nicht über die Beschleunigung. Aus der Geschwindigkeitsänderung könne das Konzept des Stoßes erarbeitet werden, was intuitiv

leichter zugänglich sei als das Kraftkonzept (Jung et al., 1977, S. 13). Eine Kraft beziehe sich meist auf einen momentanen Zustand  $\vec{F} = \vec{p}$ , im Alltag hingegen seien Phänomene relevant bei den es um einen Unterschied zwischen einem Anfangs- und einem Endzustand gehe. Hier sei es einfacher, über Stöße beziehungsweise über Stoßraten in einem Zeitintervall  $\Delta t$  zu argumentieren. Der Begriff der Kraft sei darüber hinaus aus der Alltagssprache stark geprägt und würde von SchülerInnen in der Regel mehr mit der Muskelkraft oder einer generellen Wirkfähigkeit assoziiert statt mit einer Wechselwirkung. Das Konzept des Stoßes läge damit näher an dem Konzept, was SchülerInnen fälschlicherweise unter einer Kraft im Physikunterricht verstehen. Daraus folgern Jung & Callsen (1976) & Jung et al. (1977), dass der Kraftbegriff im Unterricht gar nicht und wenn überhaupt als Hilfsgröße eingeführt werden sollte, sondern vielmehr der Fokus auf die Behandlung von Stößen und Stoßraten gelegt werden sollte.

In der Elementarisierung von Wodzinski & Wiesner wird die Verbindung zwischen der Kinematik und Dynamik zwar auch über die Geschwindigkeitsänderung hergestellt mit dem Unterschied, dass hier die Behandlung der Dynamik mit der Thematisierung des Kraftkonzepts beginnt und in der Formulierung der Newton'schen Bewegungsgleichung mündet. Die Newton'sche Bewegungsgleichung stelle in der heutigen Zeit keinen Zusammenhang mehr dar, der im Unterricht empirisch bewiesen werden muss, sondern vielmehr die Definition des Kraftbegriffs (vgl. Wilhelm, 2016, S. 3f). Deshalb genüge es, das zweite Newton'sche Axiom im Unterricht mitzuteilen und mit vielen Beispielen plausibel zu machen (vgl. Wilhelm, 2016, S. 3f). Für das zweite Newton'sche Axiom wurde für die Sekundarstufe I die Form einer Produktgleichung gewählt, da so qualitative Aussagen einfacher getätigt werden könnten als in einer Quotientengleichung (vgl. Tobias, 2010). Außerdem kommt in dieser elementarisierten Form der Beschleunigungsbegriff nicht vor. Ein weiterer Vorteil in der Darstellung als Produktgleichung liegt darin, dass so eine Trennung zwischen dem Akteur und dem Objekt entsteht. Die beiden Größen  $\vec{F}$  und  $\Delta t$  auf der linken Seite beziehen sich auf die Ursache der Bewegungsänderung. Auf der rechten Seite zeigt sich die Wirkung. Die beiden Größen  $m$  und  $\Delta \vec{v}$  beziehen sich auf das Objekt, auf das eine Kraft ausgeübt wird:

$$\underbrace{\vec{F} \cdot \Delta t}_{\text{Akteur}} = \underbrace{m \cdot \Delta \vec{v}}_{\text{Objekt}} \quad (4.18)$$

Außerdem liefere diese Form der Newton'schen Bewegungsgleichung den Trägheitssatz als unmittelbare Anwendung (Tobias, 2010, S. 69). Wenn keine resultierende Kraft auf einen Körper wirkt, erhält dieser entsprechend auch keine Zusatzgeschwindigkeit.

Auch die Elementarisierung für die Sekundarstufe II von Wilhelm weicht an dieser Stelle von der Argumentation ab, da hier der Kraftbegriff aus der Sekundarstufe I als bekannt vorausgesetzt wird und mit der Beschleunigung anstatt mit der Geschwindigkeitsänderung in Verbindung gebracht wird. Wilhelm (2005, S. 114) führt die Newton'sche Bewegungsgleichung daher in ihrer klassischen Form ein, plädiert allerdings dafür, in der Gleichung

die Beschleunigung in Abhängigkeit der Summe aller angreifenden Kräfte darzustellen, um so einen allgemeineren Zusammenhang zu erhalten:

$$\vec{a} = \frac{\sum \vec{F}}{m} \quad (4.19)$$

#### 4.2.4 Einschränkungen der bisherigen Studien

In diesem Abschnitt werden die Einschränkungen der bisherigen Studien aus den bestehenden Arbeiten, in denen eine Treatmentgruppe im Vergleich zu einer Kontrollgruppe evaluiert wurde, herausgearbeitet, um anschließend aufbauend auf diesen Einschränkungen auf offen gebliebene Fragen in der fachdidaktischen Forschung schließen zu können.

##### 4.2.4.1 Einschränkungen in Tobias (2010)

In der Vergleichsstudie von Tobias (2010) unterrichteten die teilnehmenden Lehrkräfte zunächst ohne weitere Vorgaben in der Kontrollgruppe „konventionell“, das heißt lediglich gebunden an den bayrischen Lehrplan, nach einem zugelassenen Schulbuch. Anschließend erhielten die gleichen Lehrkräfte für den Unterricht in der Treatmentgruppe im folgenden Schuljahr umfangreiches Material zum zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept in Form von SchülerInnenheften (Hopf et al., 2012), Arbeitsblättern, Bildern, Filmen und Simulationen (Rachel, o. D.). Außerdem erhielten die Lehrkräfte eine, wie Tobias (2010) betont, kurze Fortbildung zum neuen Mechanikkonzept. Allein diese zusätzlichen Materialien könnten zum besseren Lernzuwachs der SchülerInnen unabhängig von der Elementarisierung beigetragen haben. Die SchülerInnenheften legen im Gegensatz zu Schulbüchern eine besondere Unterrichtsstruktur nahe, indem nach der Einführung eines neuen Konzepts dieses zunächst umfangreich an Beispielen angewendet und anschließend an Aufgaben geübt wird. Schon das Angebot an Beispielen und Übungsaufgaben kann eine Veränderung der Unterrichtsgestaltung durch die Lehrkräfte bewirkt haben. Auch die Simulationen können durch die anschauliche Darstellung von Bewegung in Stroboskopbildern und die ikonischen Repräsentationen in Form von Geschwindigkeitspfeilen erheblich zum Lernzuwachs beigetragen haben. Bedingt durch das Studiendesign kann aber auch ein Neuheitseffekt seitens der Lehrkräfte vorliegen, da die Lehrkräfte sich mit dem neuen Material viel intensiver auseinandersetzen mussten und möglicherweise auch den Anspruch hatten, den Unterricht in der Treatmentgruppe besser vorzubereiten und durchzuführen als in der Kontrollgruppe. Bei dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept handelt es sich, wie die Bezeichnung schon nahelegt, um einen dynamischen Zugang zum Kraftbegriff, indem dieser über Bewegungsänderungen eingeführt wird. Eine Alternative wäre der Zugang über die Statik, indem der Kraftbegriff anhand des Hooke'schen Gesetzes eingeführt wird. Tobias (2010) hat ausgehend von einer Schulbuchanalyse die Sachstruktur von „konventionellem“ Mechanikunterricht rekonstruiert und dieser die des zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzepts gegenübergestellt, um die Strukturgleichheit der beiden Zugänge bezüglich der Themen im Sinne einer methodi-

schen Elementarisierung aufzuzeigen (Tobias, 2010, S. 116). Kontrolliert werden sollte die Einhaltung dieser Struktur durch von den Lehrkräften geführte Unterrichtstagebücher. Berichtet wurde allerdings für die Kontrollgruppe nur der Umfang an Unterrichtsstunden, wobei Stunden zum Hooke'schen Gesetz separat aufgeführt wurden, nicht aber wie die Strukturtreue der Lehrkräfte anhand der Unterrichtstagebücher belegt wurde. Hierzu schreibt die Autorin, dass alle Unterrichtstagebücher eine Einführung der Kraft über die Wirkung (Verformung und Beschleunigung) zeigen würden (Tobias, 2010, S. 176), dass es aber in der Kontrollgruppe keine Variation der Sachstruktur gegeben habe (Tobias, 2010, S. 186). Wenn man sich nun die Aufstellung der Unterrichtsstunden mit den separat aufgeführten Stunden zum Hooke'schen Gesetz anschaut, fällt auf, dass es hier zwischen den Lehrkräften durchaus Unterschiede gab. Einige Lehrkräfte haben keine und andere bis zu drei Unterrichtsstunden auf dieses Thema verwendet, was bedeutet, dass auch statische Zugänge zum Kraftbegriff möglich waren, in denen zuerst die Wirkung als Verformung und erst später als Beschleunigung eingeführt wurde. In diesem Fall kann daher nicht von einer Strukturgleichheit der beiden Zugänge gesprochen werden, was zu einer weiteren unabhängigen Variablen in Form der methodischen Elementarisierung zwischen der Treatment- und der Kontrollgruppe in der Studie von Tobias (2010) führt, welche den besseren Lernzuwachs der Treatmentgruppe bewirkt haben könnte.

Auch bezogen auf den bei Tobias (2010) eingesetzten Fachwissenstest gibt es Einschränkungen. Vorab sollten die Anforderungen an ein Erhebungsinstrument sein, dass dieses weder die Kontroll- noch die Treatmentgruppe bevorzugt, also gleich viele Aufgaben enthält, welche entweder für die eine oder für die andere Gruppe potenziell einfacher zu lösen sind. Die Aufgaben des Fachwissenstests wurden zum einen anhand eines Expertenratings (Tobias, 2010, S. 120) in drei Gruppen aufgeteilt (vergleichbare Aufgaben sowie Aufgaben zum „konventionellen“ Unterricht oder zum zweidimensional-dynamischen Konzept), zum anderen wurden die vergleichbaren Aufgaben in ein- oder zweidimensionale Aufgaben aufteilt. Es bleibt an dieser Stelle offen, woraus sich die Expertengruppe zusammengesetzt hat und welche Kriterien für die Einordnung vorgenommen wurden. Die Einteilung durch das Expertenrating kann nämlich kritisch gesehen werden. Unter den als vergleichbar eingestuften Aufgaben finden sich welche, die insbesondere Darstellungsformen wie Stroboskopbilder oder die Darstellung von Geschwindigkeitspfeilen enthalten. Diese Arten der Darstellung waren möglicherweise den SchülerInnen der Kontrollgruppe gar nicht oder nur eingeschränkt bekannt, wodurch diese bei den entsprechenden Aufgaben benachteiligt wurden. Des Weiteren ist auch eine Aufgabe zum senkrechten Stoß auf eine waagerechte Bewegung enthalten. Dies bildet ein Schlüsselement des zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept und bevorzugt damit die SchülerInnen der Treatmentgruppe. Es sind auch Aufgaben enthalten, welche für das zweidimensional-dynamische Mechanikkonzept spezifische Fachbegriffe wie Tempo oder Zusatzgeschwindigkeit enthalten. Auch wenn diese Aufgaben im Expertenrating dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept zugeordnet wurden, können diese von der Kontrollgruppe potenziell gar nicht gelöst werden. Auf der anderen Seite kann so auch ein größerer Lernzuwachs erzeugt werden, da die Fachbegriffe auch der Treatmentgruppe beim Prätest nicht bekannt waren. Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Treatmentgruppe durch den Test wegen den verwen-

deten Darstellungsformen und Fachbegriffen bevorzugt wurde und demnach allein darauf der besseren Lernzuwachs dieser SchülerInnen zurückzuführen sein könnte.

#### **4.2.4.2 Einschränkungen in Jung & Callsen (1976)**

Die Studie von Jung & Callsen (1976) wurde mit einer eher kleinen Stichprobe von zwei Klassen durchgeführt, wobei die Klasse der Treatment- und Kontrollgruppe von einem der beiden Autoren unterrichtet wurden. Dies betrifft die Durchführungsobjektivität der Studie. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass dem neuen Konzept (wenn auch möglicherweise unbewusst) mehr Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Des Weiteren kann aufgrund der kleinen Stichprobe von einer Klasse pro Gruppe ein Klasseneffekt ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Es wird in der Studie nicht berichtet, in welchem Umfang Material für die beiden Treatmentgruppe zur Verfügung gestellt wurde oder wie der Unterricht insgesamt gerade in Bezug auf die Strukturgleichheit aufgebaut war. Über die eingesetzten Testinstrumente ist nichts bekannt. Die Autoren schreiben selbst: „Allerdings ist durch die Ergebnisse dieses einfachen Versuchs nicht gesichert, daß dafür allein das Lehrverfahren verantwortlich ist. Andere Variable könnten in erheblichem Umfang am Ergebnis beteiligt sein“ (Jung & Callsen, 1976, S. 233).

#### **4.2.4.3 Einschränkungen in Wilhelm (2005)**

Bei der in der Studie von Wilhelm (2005) betrachteten „Kontrollgruppe“ handelt es sich nicht um eine klassische Kontrollgruppe im Sinne einer Evaluationsstudie im Treatment- und Kontrollgruppen-Design. Die Daten der Kontrollgruppe stammen von bereits bestehenden Erhebungen der eingesetzten Testinstrumente in „konventionell“ unterrichteten Klassen. Dabei ist nichts über die Rahmenbedingungen des „konventionellen“ Mechanikunterrichts in den Kontrollgruppen bekannt, wobei sich die Erhebungen auch über einen großen Zeitraum von 1994 bis 2003 erstreckten. Es liegt also eine womöglich sehr heterogene Kontrollgruppe vor, was verallgemeinerbare Aussagen über die Ergebnisse der Studie erschwert. Wilhelm (2005, S. 139) schreibt dazu, „[...]dass] nicht erforscht werden [sollte], was ‚konventioneller‘ Unterricht bedeutet und inwieweit der Unterricht in den Kontrollklassen ‚konventionell‘ war“. Zusätzlich wurden über die Jahre Anpassungen und Formulierungsänderungen an den Testaufgaben vorgenommen, was wiederum eine Verallgemeinerung der Erkenntnis erschwert. Auch auswertungstheoretisch ergeben sich Einschränkungen, da bei den Erhebungen der Kontrollgruppen teilweise nur Mittelwerte aber keine Varianzen (siehe Wilhelm, 2005, S. 88) oder nur Posttest-Daten (siehe Wilhelm, 2005, S. 176ff) angegeben beziehungsweise erfasst wurden. Infolgedessen wurden für Vergleiche zwischen Kontroll- und Treatmentgruppe die Prätest-Ergebnisse und Varianzen der Treatmentgruppe als auch für die Kontrollgruppe geltend angenommen. Diese Annahmen reduzieren die Belastbarkeit der daraus gewonnen Ergebnisse erheblich. Des Weiteren finden sich bei Wilhelm (2005) keine statistischen Auswertungen, die Veränderungen zwischen den Prä- und Postzeitpunkten also einen Lernzuwachs innerhalb der

Gruppen belegen. In der Auswertung wurden stets nur die Ergebnisse der Treatment- und Kontrollgruppe verglichen. Es kann daher statistisch nicht belegt werden, dass der Lehrgang überhaupt zu einem signifikanten Lernzuwachs bei den SchülerInnen geführt hat.

„Da in dem Unterrichtskonzept mehrere Ideen umgesetzt wurden und zusätzlich ein Lehrer[Innen]training stattfand, können die positiven Ergebnisse nicht einer einzelnen Unterrichtsvariable zugeschrieben werden.“ (Wilhelm, 2005, S. 259). Mit den „mehreren Ideen“ sind die Veränderung der Elementarisierung, Unterrichtsstrategien, Medien und dem Einsatz von ikonischen Repräsentationen in der Treatment- gegenüber der Kontrollgruppe gemeint. Die Lehrkräfte erhielten Fortbildungen zum neuen Unterrichtskonzept und umfassendes Material (ausführliche Unterrichtsverlaufspläne, Videos, Arbeitsblätter, Simulationen, Software zur Messwerterfassung und zum Teil Hardware zur Durchführung von Experimenten) für den Unterricht. Neben der Elementarisierung wurden in dem Mechaniklehrgang auch neue Unterrichtsstrategien umgesetzt, welche zum Teil auch erst durch den Einsatz der Messwerterfassung am Computer und durch die Darstellung mit Hilfe von ikonischen Repräsentationen möglich waren (vgl. Wilhelm, 2005, S. 2).

Bezüglich der eingesetzten Testinstrumente fehlt bei Wilhelm (2005) die Diskussion, inwiefern diese einen fairen Vergleich zwischen der Kontroll- und der Treatmentgruppe ermöglicht haben oder ob eine der beiden Gruppen durch die Aufgaben bevorzugt wurde. Auffällig wird eine Bevorzugung der Treatmentgruppe insbesondere bei der Aufgabe, wo Beschleunigungspfeile an eine Kurvenfahrt eines Autos gezeichnet werden sollten (siehe Wilhelm, 2005, S. 161f), da die Darstellung von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen mit Hilfe von Vektorpfeilen im „konventionellen“ Unterricht meist nicht thematisiert wird. Die Effektstärke fällt entsprechend mit  $d = 2.95$  zugunsten der Treatmentgruppe sehr groß aus.

#### 4.2.4.4 Einschränkungen in Amenda (2017)

In der Vergleichsstudie von Amenda (2017) wurde versucht den Einschränkungen der bisher diskutierten Studien durch eine stark kontrollierte Laborbedingung zu begegnen. Die Studie wurde allerdings nur mit einer sehr kleinen Stichprobe von zwei Klassen durchgeführt. Es wurden komplett analog verlaufende Unterrichtsskripte angefertigt, wodurch die methodische Elementarisierung konstant gehalten wurde. Des Weiteren waren die Ausgangsbedingungen vergleichbar, beide Treatmentklassen (skalarer und konsequenter vektorieller Ansatz) erhielten den gleichen Umfang an Material und wurden vom Autor unterrichtet. Somit können die Ergebnisse auf die einzigen bestehenden Unterschiede zwischen den Treatments nämlich auf die inhaltliche Elementarisierung und die didaktische Reduktion zurückgeführt werden. Bei dem Vergleich der beiden Elementarisierungen sollte allerdings betont werden, dass sich diese im Wesentlichen in der Ebene der mathematischen Repräsentation und nicht auf der Ebene der Konzepte voneinander unterscheiden. Es existieren allerdings auch in diesem Fall Einschränkungen bezogen auf die eingesetzten Aufgaben als Testinstrumente. Die Aufgaben sind bezogen auf die Wahl der Begrifflichkeiten nicht von beiden Treatmentgruppen in gleicher Weise lösbar. Es werden Begriffe wie

Ort oder Tempo verwendet, welche nur für den konsequent vektoriellen Ansatz definiert sind nicht aber für den skalaren. Bei beiden Ansätzen wurden zunächst nur eindimensionale Bewegungen behandelt, in den Aufgaben werden zum Teil hingegen zweidimensionale Bewegung thematisiert, bei denen es notwendig ist, die Geschwindigkeit als gerichtete Größe aufzufassen. Die SchülerInnen des skalaren Ansatzes verfügen zwar aus dem Mathematikunterricht über die notwendigen mathematischen Fähigkeiten in der Vektorrechnung, es kann an dieser Stelle aber nicht erwartet werden, dass diese auf die Physik übertragen werden, gerade weil dort die Geschwindigkeit als Skalar eingeführt wird. Entsprechend wird durch den Test der konsequente vektorielle Ansatz bevorzugt.

Insgesamt kann man aus den Einschränkungen der bisherigen Studien folgern, dass es notwendig ist, für die Validität eine klare Qualitätssicherung bei der Planung des Studiendesign vorliegen zu haben. Amenda (2017) hat dies stellenweise durch das Konstanthalten der methodischen Elementarisierung und der sonstigen Rahmenbedingungen sichergestellt, wobei immer noch einige Punkte in Bezug auf die Validität, zum Beispiel beim eingesetzten Testinstrument, offen bleiben. In dieser Arbeit werden die Ideen aus dem Studiendesign von Amenda (2017) aufgegriffen, erweitert und das Studiendesign anhand einer Validierungslogik (siehe Kap. 6.4.2) geplant.

## 5 Offene Fragen der bisherigen Forschung und Entwicklung der Forschungsfragen

In diesem Teil der Arbeit werden zunächst die offen gebliebene Fragen bezogen auf die bisherige fachdidaktischen Forschung diskutiert, um im Anschluss aufbauend darauf die Forschungsfragen dieser Arbeit zu formulieren.

### 5.1 Offene Fragen

Betrachtet man die Forschung auf dem Gebiet von Elementarisierungen der Mechanik, gerade unter einem historischen Gesichtspunkt, fällt auf, dass stets eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Unterrichtskonzepte stattgefunden hat. Die Elementarisierungen unterscheiden sich zum einen in jedem Fall vom „konventionellen“ Mechanikunterricht aber auch untereinander. So wurde zum Beispiel in den Arbeiten von Jung & Callsen (1976) & Jung et al. (1977) der Kraftbegriff bewusst nur als Hilfsgröße verwendet, wohingegen dieser bei Wodzinski & Wiesner (1994a, 1994b, 1994c) wieder essenzieller Bestandteil der Dynamik ist. Ein Vergleich zwischen diesen beiden Elementarisierungen existiert bisher nicht. Auch die zur Verfügung gestellten Materialien und Medien wurden für jede Studie neu entwickelt. Bei diesen ganzen Veränderungen und Unterschieden zwischen den Elementarisierungen gerade im Hinblick auf den „konventionellen“ Mechanikunterricht, welcher in vielen Studien als Kontrollgruppe diente (Jung & Callsen, 1976; Tobias, 2010; Wilhelm, 2005), bleibt offen, welche Veränderungen nun zum besseren Lernzuwachs der SchülerInnen beigetragen haben. Auch bleibt in vielen Punkten ungeklärt, was in den Studien unter „konventionellem“ Mechanikunterricht verstanden wird. In der Studie von Tobias (2010) wurde zumindest mit Hilfe von Schulbuchanalysen die Sachstruktur von „konventionellem“ Mechanikunterricht herausgearbeitet und die Einhaltung dieser durch Unterrichtstagebücher festgehalten. Wie die Umsetzung der Sachstruktur im konkreten Unterricht aussah, bleibt allerdings unklar.

Im Fokus der Betrachtung steht stets die Elementarisierung der Kinematik und Dynamik, welche nach den Argumentationen der AutorInnen einen wesentlichen Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen haben soll. Dies wird durch Untersuchung untermauert, welche auch jeweils nur die Lernwirksamkeit in den unteren Klassenstufen (Jung et al., 1977) oder die Akzeptanz (Wodzinski, 1996) der Mechanikzugänge ohne Vergleich zu

anderen untersucht haben<sup>8</sup>, die allesamt positive Ergebnisse liefern. Durch die Vielzahl an Veränderungen können aber dennoch die positiven Effekte der Mechanikzugänge im Vergleich zum „konventionellen“ Unterricht (Jung & Callsen, 1976; Tobias, 2010; Wilhelm, 2005) nicht allein der Elementarisierung zugeordnet werden.

Zudem wird in den bisherigen Studien der Begriff der Elementarisierung immer als Gesamtkonstrukt aufgefasst und nicht differenziert in verschiedene Aspekte (Bleichroth et al., 1991) oder Ebenen im Sinne des Verstehensmodells von Drollinger-Vetter (2011). Es bleibt also offen, ob nicht einzelne Aspekte einer Elementarisierung und verschiedene Ebene maßgeblich zum besseren Lernzuwachs der SchülerInnen in den Treatmentgruppen beigetragen haben. Das Erkenntnisinteresse in den obigen Studien bezog sich aber auch jeweils auf die Erprobung eines kompletten Lehrgangs, nicht darauf den Erfolg des Unterrichts auf einzelne Variablen wie die Elementarisierung zurückzuführen. Die oben genannten Kritikpunkte gelten nicht für die Vergleichsstudie von Amenda (2017), da hier systematisch versucht wurde, möglichst viele Variablen zwischen der Treatment- und Kontrollgruppe wie die methodische Elementarisierung und die Rahmenbedingungen konstant zu halten.

Eine weitere offene Frage besteht bei allen Studien darin, inwieweit überhaupt ein fairer Vergleich zwischen Treatment- und Kontrollgruppe in Bezug auf das zur Verfügung gestellte Material und die eingesetzten Testinstrumente stattgefunden hat.

## 5.2 Entwicklung der Forschungsfragen

Aufgrund der oben genannten Einschränkungen der bisherigen Forschung soll in der vorliegenden Studie der Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen untersucht werden, wobei versucht wird, alle weiteren Unterrichtsvariablen konstant zu halten. Damit können zum einen die positiven Ergebnisse der bisherigen Arbeiten unter kontrollierten Bedingungen konsolidiert werden, zum anderen liefert diese Arbeit einen Beitrag zur Grundlagenforschung, indem allgemein die Bedeutung der Elementarisierung für den Lernzuwachs von SchülerInnen in den Blick genommen wird. Damit ergibt sich die übergeordnete Fragestellung dieser Studie:

- Welchen Effekt hat die (isolierte) Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen (im Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I)?

Durch die unklare Definition von „konventionellem“ Mechanikunterricht eignet sich dieser im Hinblick auf das obige Vorhaben nicht als Kontrollgruppe, da zu viele Parameter offen bleiben. Es muss daher ein weiteres Mechanikkonzept erstellt werden, welches sich von einem bestehenden, lediglich im Hinblick auf die Elementarisierung unterscheidet.

Zu diesem Zweck wird dem zweidimensional-dynamischen Mechanikkonzept für die Se-

---

<sup>8</sup>Bei Wodzinski (1996) wurde zusätzlich zwischen einer ein- und einer zweidimensionalen Variante der Elementarisierung unterschieden, wobei es zwischen den beiden Varianten auch Überschneidungen in der Wahl der Dimensionen gab. Es handelte sich nicht um einen konsequent ein- bzw. zweidimensionalen Zugang.

kundarstufe I (ab diesem Punkt immer mit *2DD-Mechanikkonzept* abgekürzt) als weitere Treatmentgruppe eine eindimensionale Adaption (abgekürzt *1D-Adaption*) gegenübergestellt, die einen eindimensionalen dynamischen Zugang über Vorgänge mit konstanten Kräften und dem Begriff der Beschleunigung verfolgt, sich also in diesen Punkten nah an der Sachstruktur des „konventionellen“ Unterrichts orientiert. Alle übrigen Merkmale des Konzepts wie die Darstellung von Bewegungen, die Themenstruktur, der Medieneinsatz oder die Darstellung von Vektorpfeile sollen möglichst gleich bleiben. Dies gilt auch für den Umfang des zur Verfügung gestellten Materials.

Im Sinne der in Kapitel 2.1 vorgestellten Unterscheidungen von verschiedenen Aspekten der Elementarisierung und Ebenen, auf denen der Prozess der Elementarisierung stattfindet, werden in dieser Arbeit die Aspekte der inhaltlichen Elementarisierung und der didaktischen Reduktion zwischen den beiden Treatmentgruppen variiert. Die methodische Elementarisierung, also die Reihenfolge der elementaren Lernschritte, soll durch die gleiche Themenstruktur möglichst konstant gehalten werden. Durch das Konstanthalten von Darstellungsformen und Medien wird die Elementarisierung bezogen auf die Ebene der Repräsentationsformen im Verstehensmodell nach Drollinger-Vetter (2011) eingeschränkt, so dass die Elementarisierungen zwischen den beiden Mechanikkonzepten auf der Konzeptebene und der Ebene der Verstehenselemente variieren. Betrachtet man das Verstehensmodell (siehe Abb. 2.1), wird durch das Konstanthalten der Repräsentationsformen die Ebene der Verstehenselemente eingeschränkt, die für das Verstehen der Repräsentationsformen notwendig sind, und ebenso die Ebene der Konzepte, für deren Verständnis die Repräsentationsformen vorausgesetzt sind. Es wird daher möglich direkte Analogien zwischen den Verstehenselementen und Konzepten der beiden Mechanikkonzepte herzustellen. Somit ist es schließlich möglich zwei analog zueinander verlaufende Mechaniklehrgänge im gleichem inhaltlichen Umfang zu konstruieren.

Gerade im Hinblick auf die Ebene der Repräsentationen muss das Unterrichtskonzept für die Vergleichsgruppe jedoch in einigen Aspekten von der Elementarisierung des „konventionellen“ Unterricht abweichen und die Aspekte des 2DD-Mechanikkonzepts übernehmen, andernfalls ist ein Konstanthalten dieser Variablen nicht möglich. Dies wird ausführlich in Kapitel 6.5.1.2 zur Elementarisierung der 1D-Adaption diskutiert.

Auf diese Weise kann zum einen untersucht werden, ob die beiden Elementarisierungen für sich zu einem Lernzuwachs bei den SchülerInnen führen und zum anderen kann ein möglicherweise auftretender Unterschied im Lernzuwachs allein auf die unterschiedlichen Elementarisierungen, genauer auf die unterschiedlichen inhaltlichen Elementarisierungen und didaktischen Reduktion auf Ebene der Konzept und Verstehenselemente, zurückgeführt werden. Aufgrund der Themenvielfalt und der damit verbundenen Unterrichtszeit beschränkt sich diese Studie auf die Behandlung der Kinematik und der Einführung der Newton'schen Bewegungsgleichung. Trägheits- und Wechselwirkungsprinzip sind nicht mehr Teil der Untersuchung. Die Forschungsfragen für diese Studie lauten also:

1. In welchem Umfang führt der Unterricht nach den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) in beiden Treatmentgruppen zu einem Lernzuwachs der SchülerInnen in der Sekundarstufe I?

2. Welche Unterschiede im Lernzuwachs bei den SchülerInnen gibt es zwischen dem Unterricht nach den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) in der Sekundarstufe I, wenn die anderen Gestaltungsmerkmale (methodische Elementarisierung und Repräsentationsformen) kontrolliert werden?

Auf Grundlage der bisherigen Ergebnissen aus der Studie von Tobias (2010), in der eine entsprechende Vergleichsevaluation zwischen dem 2DD-Mechanikkonzept und „konventionellem“ Mechanikunterricht durchgeführt wurde, können zu den oben genannten Forschungsfragen, gerade in Bezug auf die zu erwartenden Effektstärken, Hypothesen formuliert werden. In der Studie erreichten die SchülerInnen, welche nach dem 2DD-Mechanikkonzept unterrichtet wurden, einen Lernzuwachs mit einer Effektstärke von  $d = 1.37 [1.18, 1.56]$ <sup>9</sup>, welcher in der Nachfolgestudie noch weiter steigt  $d = 1.61 [1.29, 1.94]$ . Die Materialien aus der Nachfolgestudie (Hopf et al., 2012) werden in dieser Studie in einer leicht angepasste Version für das Treatment des 2DD-Mechanikkonzepts eingesetzt, weshalb die Effektstärke der Nachfolgestudie von (Tobias, 2010) eine bessere Referenz als die Hauptstudie darstellt. Die „konventionell“ unterrichteten Klassen erreichten im Vergleich dazu niedrigere Effektstärken (Hauptstudie  $d = 0.77 [0.59, 0.95]$ , Nachfolgestudie  $d = 0.75 [0.51, 0.99]$ ).

Der Umfang der Unterrichtseinheiten fällt in dieses Arbeit geringer aus in der Studie von Tobias (2010). Der Unterricht beschränkt sich auf die Kinematik und die Einführung der Newton'schen Bewegungsgleichung. Es ist daher in der Treatmentgruppe eine geringer Effektstärke im Lernzuwachs zu erwarten, welche sich im unteren Bereich der berechneten Konfidenzintervalls aber dennoch oberhalb eines LehrerInneneffekts nach Hattie (2009) befindet. Auch in der Treatmentgruppe zur 1D-Adaption fällt die Unterrichtszeit geringer aus als bei der Kontrollgruppe aus Tobias (2010). Zusätzlich bleibt an dieser Stelle unklar, welche Auswirkungen die Veränderungen in der Elementarisierung der 1D-Adaption auf den Lernzuwachs der SchülerInnen im Vergleich zum „konventionellen“ Mechanikunterricht haben. Diese könnten potenziell zu einer Verbesserung führen, da die Elementarisierungen der beiden Treatmentgruppen weiter angenähert wurden. Lässt man diesen unklaren Effekt außer Acht, läge die Effektstärke, auch wieder orientiert an den unteren Grenzen der Konfidenzintervalle ebenfalls oberhalb eines LehrerInneneffekts. Die Hypothesen zur ersten Forschungsfrage lauten damit:

- 1.1 Der Unterricht nach dem 1D-Mechanikkonzept führt bei den SchülerInnen zu einem Lernzuwachs bei einer Effektstärke in der Größenordnung oberhalb eines LehrerInneneffekts nach Hattie (2009).
- 1.2 Der Unterricht nach der 2DD-Mechanikkonzept führt bei den SchülerInnen zu einem Lernzuwachs bei einer Effektstärke in der Größenordnung oberhalb eines LehrerInneneffekts nach Hattie (2009).

---

<sup>9</sup>Die 95 % Konfidenzintervalle für die Effektstärken wurden nachträglich berechnet und sind nicht in Tobias (2010) enthalten.

Der Unterschied im Lernzuwachs zwischen den Treatment- und Kontrollgruppen in der Studie von Tobias (2010) lag in der Hauptstudie bei  $d = 0.54$   $[0.37, 0.72]$  und in der Nachfolgestudie bei  $d = 0.89$   $[0.62, 1.16]$  zu Gunsten des 2DD-Mechanikkonzepts. Wie oben bereits erwähnt bildet die Nachfolgestudie aufgrund der verwendeten Materialien einen besseren Referenzrahmen für diese Arbeit als die Hauptstudie, wobei auch hier unklar bleibt, wie sich die Veränderungen der Elementarisierung in der 1D-Adaption gegenüber dem „konventionellen“ Mechanikunterricht auf den Lernzuwachs auswirken. Setzt man auch wieder als Erwartung die untere Grenze des Konfidenzintervalls an, läge die vermutete Effektstärke für den Unterschied im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen erneut von der Größenordnung her oberhalb eines LehrerInneneffekts zu Gunsten des 2DD-Mechanikkonzepts, wodurch sich die Hypothese zur zweiten Forschungsfrage ergibt:

2. Der Unterricht nach den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) in der Sekundarstufe I führt zu einem Unterschied im Lernzuwachs der SchülerInnen zu Gunsten des 2DD-Mechanikkonzepts bei einer Effektstärke in der Größenordnung oberhalb eines LehrerInneneffekts nach Hattie (2009), wenn die anderen Gestaltungsmerkmale (methodische Elementarisierung und Repräsentationsformen) kontrolliert werden.



# **Teil II**

## **Empirischer Teil**



## 6 Methode

In diesem Teil der Arbeit wird zunächst das allgemeine Forschungsdesign der Studie mit der erhobenen Stichprobe sowie den eingesetzten Testinstrumenten und erfassten Variablen vorgestellt. Aufbauend darauf wird in Anlehnung an die Arbeit von Dickmann (2016) eine Validierungslogik des Studiendesigns zur Interpretation der Messdaten formuliert, indem detailliert auf die einzelnen Elemente der Studie eingegangen wird und diese besonders in Hinblick auf die Validitätsargumente diskutiert und begründet werden. Im Verlauf dessen werden insbesondere die Elementarisierung der 1D-Adaption, das eingesetzte Material und die verwendeten Instrumente der empirischen Studie vorgestellt. Im Weiteren wird auch auf die Vorstudie zum eingesetzten Fachwissenstest eingegangen.

### 6.1 Forschungsdesign

#### Quasi-experimentelle Feldstudie

Bei der in dieser Arbeit vorliegenden empirischen Studie handelt es sich um eine Evaluationsstudie zur Untersuchung und zum Vergleich von zwei verschiedenen Elementarisierungen. Der Ablauf der Studie inklusive der erfassten Variablen ist in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Als Forschungsdesign wurde mit Hinblick auf die Forschungsfragen (siehe Kap. 5.2) eine quasi-experimentelle Feldstudie in einem Prä-/Posttest-Design mit zwei Treatmentgruppen<sup>10</sup> gewählt (siehe Bortz & Döring, 2006, S. 109ff).

Es wurde sich für eine Feldstudie entschieden, um zum einen zu den bisherigen Evaluationsstudien zum 2DD-Mechanikkonzept (Jung & Callsen, 1976; Tobias, 2010; Wilhelm, 2005) anschlussfähig zu bleiben, da insbesondere die Forschungsfragen auf Kritikpunkten an den bisherigen Arbeiten beruhen. Das Erkenntnisinteresse bezieht sich auf die Wirkung der Mechanikkonzepte im Feld bei einer durchaus breit gestreuten Stichprobe und nicht auf die Wirkung unter kontrollierten Bedingungen. Zum anderen wäre eine Umsetzung dieser Studie unter Laborbedingungen rein aus logistischen Gründen nur mit einer deutlich geringeren Stichprobe möglich gewesen. Die Zusammensetzung der einzelnen Klassen blieb für die Studie erhalten und es wurde auch sonst keine vollständige Randomisierung der Stichprobe (siehe Kap. 6.2) vorgenommen, wodurch sich ein quasi-experimentelles Design ergibt. Die SchülerInnen wurden unter Feldbedingungen, das heißt im klassischen

---

<sup>10</sup>Bei der 1D-Adaption handelt es sich nicht um eine Kontrollgruppe im klassischen Sinne (siehe Bortz & Döring, 2006, S. 113), sondern um eine zweite Treatmentgruppe. Deshalb wird an dieser Stelle auch bewusst nicht von einem Treatment-/Kontrollgruppen-Design gesprochen.

Tabelle 6.1: Ablauf der Studie und erfasste Variablen

| LehrerInnenfortbildung<br>(4 Zeitstunden)         | Prätest                                                                                                                                                                                                                    | Intervention<br>(ca. 7 Wochen à 90 Minuten)                                                                                              | Posttest                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LehrerInnenfortbildung zur<br>ID-Adaption         | Fachwissenstest zu Kraft<br>und Bewegung (aufbauend<br>auf FCI (Hestenes et al.,<br>1992; Alonzo & Steedle,<br>2009, u.a.)<br><br>Interesse im Fach Physik<br>und fachspezifisches<br>Selbstkonzept<br>(Frey et al., 2009) | Unterricht nach der<br>ID-Adaption<br><br>Material:<br>SchülerInnenhefte, Workbooks,<br>Stundenverlaufspläne und<br>Simulationen         | Fachwissenstest zu Kraft<br>und Bewegung (aufbauend<br>auf FCI (Hestenes et al.,<br>1992; Alonzo & Steedle,<br>2009, u.a.)<br><br>Interesse im Fach Physik<br>und fachspezifisches<br>Selbstkonzept<br>(Frey et al., 2009) |
|                                                   |                                                                                                                                                                                                                            | Unterricht nach der<br>2DD-Mechanikkonzept<br><br>Material:<br>SchülerInnenhefte, Workbooks,<br>Stundenverlaufspläne und<br>Simulationen |                                                                                                                                                                                                                            |
| LehrerInnenfortbildung zum<br>2DD-Mechanikkonzept | KFT N-Test 2 (Heller &<br>Perleth, 2000)                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                          | KFT N-Test 2 (Heller &<br>Perleth, 2000)<br><br>Unterrichtszeit und<br>Workbooks (Treatment-<br>Check)                                                                                                                     |

Schulumfeld von den an der Studie teilnehmenden Lehrkräften in Mechanik unterrichtet. Mit Hilfe der Prätest-Daten kann zum einen eine Vergleichbarkeit der beiden Treatmentgruppen bezüglich der erfassten Variablen zum Präzeitpunkt gezeigt werden, zum anderen kann eine Entwicklung zwischen dem Prä- und dem Postzeitpunkt innerhalb der Treatmentgruppen (Forschungsfrage 1) untersucht, sowie ein Vergleich dieser Entwicklungen zwischen den Gruppen (Forschungsfrage 2) durchgeführt werden. Der konkrete Ablauf der Studie wird im Folgenden weiter ausgeführt.

### **Erhebungszeitraum**

Die Studie wurden in zwei Durchgängen im Schuljahr 2019/20 beziehungsweise 2020/21 durchgeführt. Der Startzeitpunkt der Intervention war nicht einheitlich festgelegt und konnte von den Lehrkräften je nach äußeren Faktoren (wie z.B. schulinterne Lehrpläne) frei gewählt werden.

### **LehrerInnenfortbildung und Materialien**

Vor dem Beginn des Mechanikunterrichts erhielten die Lehrkräfte der beiden Treatmentgruppen getrennt voneinander eine LehrerInnenfortbildung im Umfang von vier Zeitstunden zum jeweiligen Mechanikkonzept. In den Fortbildungen wurden die didaktischen Überlegungen hinter den beiden Mechanikkonzepten vorgestellt und begründet, indem auf typische SchülerInnenvorstellungen in der Kinematik und Dynamik sowie auf Kritikpunkte der fachdidaktischen Forschung zum „konventionellen“ Mechanikunterricht eingegangen wurde. Anschließend wurden die Elementarisierung des Mechanikkonzepts sowie alle bereitgestellten Materialien (SchülerInnenhefte, Workbooks, Stundenverlaufspläne und Simulationen) vorgestellt. Auf die Materialien wird bei der Begründung der Validitätsargumente (siehe Kapitel 6.4) genauer eingegangen. Die beiden Unterrichtskonzepte wurden für die Lehrkräfte in beiden Gruppen gleichwertig dargestellt, das heißt bei der Fortbildung sollte keines der beiden Mechanikkonzepte bevorzugt werden, indem eines als besser dargestellt würde als das andere. Die Fortbildungen fanden aus diesem Grund auch getrennt voneinander statt, so dass die teilnehmenden Lehrkräfte nichts von dem anderen Unterrichtskonzept erfahren haben. Damit sollte zusätzlich verhindert werden, dass sich Lehrkräfte im Anschluss an die Fortbildung für ein anderes Unterrichtskonzept, welches ihnen persönlich mehr zusagt, entscheiden oder die didaktischen Ideen der beiden Unterrichtskonzepte miteinander vermischt werden.

### **Durchführung des Unterrichts**

Der Unterricht selbst umfasste für jede Treatmentgruppe sieben geplante Unterrichtseinheiten und sollte nach den bereitgestellten Unterrichtsverlaufsplänen erteilt werden, wobei den Lehrkräften eine feste Lernprozessstruktur sowie verpflichtende Aufgaben in den Workbooks vorgegeben wurden (mehr Informationen unter Kap. 6.4). Die Wahl der

konkreten Unterrichtsmethoden, war den Lehrkräften freigestellt. Insgesamt verlief die gesamte Studie in beiden Treatmentgruppen inklusive der Testungen nach dem gleichen Schema.

### **Anpassungen im Lockdown/Angebot für Distanzlernen**

Bedingt durch den mehrmaligen Lockdown der Corona-Krise (ab dem 15. März 2020 und ab Weihnachten 2020) und den damit verbundenen Schulschließungen musste in einigen Klassen der Unterricht online weitergeführt werden. Als Unterstützung für die Lehrkräfte wurden zu diesem Zweck für beide Treatmentgruppen Moodle-Kurse eingerichtet. Diese Kurse waren vom Inhalt her eine Zusammenführung von SchülerInnenhefte und Workbooks und so aufgebaut, dass einzelne Einheiten, bestehend aus Informationsteilen und Aufgaben, selbstständig von den SchülerInnen durchgearbeitet werden konnten. Um auch hier die Analogie der beiden Treatments zu gewährleisten, wurden die Moodle-Kurse auf Grundlage der Unterrichtsverlaufspläne erstellt. Die konkrete Umwandlung der analogen in die digitalen Materialien fand im Rahmen einer Masterarbeit (Stamm, 2020) statt, in deren Verlauf ein Leitfaden für diese Art der Umwandlung entwickelt und evaluiert wurde. Wie und ob die Lehrkräfte im Endeffekt die Moodle-Kurse nutzen wollten, war ihnen überlassen. Es handelte sich lediglich um ein Angebot. Auch die Erhebung der Posttests musste bedingt durch den Lockdown in einigen Klassen online durchgeführt werden. Der Prätest konnte hingegen immer in Präsenz stattfinden.

## **6.2 Stichprobe**

Die Daten der in den beiden Schuljahren 2019/20 und 2020/21 durchgeführten Studie basieren auf insgesamt 967 SchülerInnen, die in 56 Klassen von 27 Lehrkräften unterrichtet wurden. Die teilnehmenden SchülerInnen und Lehrkräfte stammten aus dem Raum Bochum (NRW) und dem Raum Frankfurt am Main (Hessen). Voraussetzung war, dass die SchülerInnen noch keinen Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I hatten. Bei der Auswertung wurden nur SchülerInnen berücksichtigt, für die Prä- und Posttest Daten vorlagen. Die Aufteilung der Stichprobe kann Tabelle 6.2 entnommen werden.

In der Gesamtstichprobe waren sowohl Gymnasial- als auch Gesamtschulklassen enthalten. Für die Zuordnung der unterrichtenden Lehrkräfte zu den beiden Treatmentgruppen (2DD-Mechanikkonzept und 1D-Adaption) konnte zuvor von den Lehrkräften eine Präferenz, ob sie die Mechanik eindimensional mit konstanten Kräften oder zweidimensional mit Stößen unterrichten möchten, geäußert oder einer zufälligen Zuordnung zugestimmt werden. Die Lehrkräfte wurden anhand ihres Votums und auch in Anbetracht dessen, wie viele Klassen sie unterrichteten, auf die Treatmentgruppen aufgeteilt. Es wurde versucht beiden Treatmentgruppen die gleiche Anzahl an Klassen zuzuordnen. Die Aufteilung der Gesamtschulklassen auf die beiden Treatmentgruppen gestaltete sich allerdings in der Form, dass 10 Klassen nach der 1D-Adaption und lediglich eine Klasse

Tabelle 6.2: Übersicht über die Gesamtstichprobe

| <b>Gymnasium</b>        |                            |                            |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
|                         | <b>1D-Adaption</b>         | <b>2DD-Mechanikkonzept</b> |
| <b>SchülerInnen</b>     | 346                        | 473                        |
| <b>Klassen</b>          | 22                         | 24                         |
| <b>(Präsenz/Online)</b> | (11 / 11)                  | (20 / 4)                   |
| <b>Online Posttest</b>  | 14 Klassen                 | 9 Klassen                  |
| <b>Lehrkräfte</b>       | 12                         | 11                         |
| <b>Jahrgangsstufe</b>   | 82 % Stufe 8, 18 % Stufe 9 | 59 % Stufe 8, 41 % Stufe 9 |

| <b>Gesamtschule</b>     |                                              |                            |
|-------------------------|----------------------------------------------|----------------------------|
|                         | <b>1D-Adaption</b>                           | <b>2DD-Mechanikkonzept</b> |
| <b>SchülerInnen</b>     | 148                                          | 15                         |
| <b>Klassen</b>          | 10                                           | 1                          |
| <b>(Präsenz/Online)</b> | (8 / 2)                                      | (0 / 1)                    |
| <b>Online Posttest</b>  | 1 Klasse                                     | 1 Klasse                   |
| <b>Lehrkräfte</b>       | 4                                            | 1                          |
| <b>Jahrgangsstufe</b>   | 30 % Stufe 8, 10 % Stufe 9,<br>60 % Stufe 10 | 100 % Stufe 8              |

nach dem 2DD-Mechanikkonzept unterrichtet wurde. Den Lehrkräften war freigestellt, für welches Treatment sie sich entscheiden. Von den Rückmeldungen der GesamtschullehrerInnen her, erschien das 2DD-Mechanikkonzept mit zweidimensionalen Bewegungen und Stoßprozessen zu komplex für die Gesamtschulklassen, weshalb bis auf eine Ausnahme die 1D-Adaption gewählt wurde. Da somit die gleichmäßige Verteilung der Schulformen über die beiden Treatmentgruppen nicht gegeben war, wurden die beiden Schulformen getrennt voneinander ausgewertet. Bei den Gymnasialklassen liegen für beide Treatments ausreichend Daten vor, für die Gesamtschulen kann allerdings nur ein Vergleich zwischen den beiden Schulformen innerhalb der 1D-Adaption erfolgen. Die eine verbliebene Klasse im 2DD-Mechanikkonzept war für aussagekräftige Vergleiche innerhalb und zwischen den Treatmentgruppen nicht ausreichend, weshalb diese mit insgesamt 15 SchülerInnen in der Auswertung nicht berücksichtigt werden konnte (diese wurden in der obigen Aufstellung der effektiven Stichprobe bereits nicht berücksichtigt).

Ein weiteres Argument dafür, die beiden Schulformen innerhalb der 1D-Adaption getrennt voneinander auszuwerten, liefert ein Vergleich der Prätestergebnisse zwischen den Gesamt- und GymnasialschülerInnen. Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zeigt, dass sich die SchülerInnen der beiden Schulformen hinsichtlich der Prätestergebnisse im Fachwissenstest höchst signifikant voneinander unterscheiden. Die mittlere Punktzahl im Fachwissenstest der GesamtschülerInnen beträgt  $\mu = 8.78$  ( $\sigma = 3.08$ ) gegenüber den GymnasialschülerInnen mit einer Punktzahl von  $\mu = 10.11$  ( $\sigma = 3.24$ ). Der Levene-

Test auf Verletzung der Varianzhomogenität wird nicht signifikant. Die durchschnittliche Punktzahl der GesamtschülerInnen ist also um 1.33 [0.72, 1.95] Punkte niedriger,  $t(492) = 4.25$ ,  $p < .001$ ,  $d = 0.42$  [0.22, 0.61]. Durch das Miteinbeziehen der Gesamtschulklassen in eine etwaige Gesamtstichprobe würden die Prätestergebnisse in der 1D-Adaption signifikant schlechter ausfallen als ohne diese. Da in der Treatmentgruppe zum 2DD-Mechanikkonzept durch das Einbeziehen der einen vorhandenen Gesamtschulklasse schon allein durch die geringe ProbandInnenzahl  $n = 15$  keine entsprechende Veränderung in den Prätestergebnissen erzeugt wird, mussten aufgrund der Vergleichbarkeit die Schulformen getrennt voneinander ausgewertet werden.

Wie schon in Kapitel 6.1 erwähnt, mussten bedingt durch den Lockdown der Corona-Krise der Unterricht in einigen Klassen online weitergeführt werden. Es wird daher bei der Aufteilung der Klassen separat aufgeführt, wie viele Klassen in Präsenz zu Ende unterrichtet werden konnten und in wie vielen der Unterricht, wenn auch nur anteilig, online stattfinden musste. Des Weiteren konnten, bedingt durch den Lockdown, nicht alle Testungen zum Postzeitpunkt in Präsenz stattfinden, sondern mussten ebenfalls online durchgeführt werden. Der Einfluss dieser zusätzlichen pandemiebedingten Klassen-Parameter auf den Lernzuwachs wird in der Auswertung neben den oben aufgeführten Kontrollvariablen ebenfalls untersucht, besonders weil diese für beide Treatmentgruppen unterschiedlich sind.

Für das Treatment nach der 1D-Adaption liegen, bezogen auf die Gymnasien, für 346 SchülerInnen, die in 22 Klassen von 12 Lehrkräften unterrichtet wurden, vollständige Prä-/Post-Datensätze vor. Für die Gesamtschulen liegen entsprechend bei der 1D-Adaption Daten von 148 SchülerInnen aus 10 Klassen bei 4 Lehrkräften vor. Für das zu vergleichende Treatment nach dem 2DD-Mechanikkonzept liegen für 473 SchülerInnen, die in 24 Klassen bei 11 Lehrkräften unterrichtet wurden, vollständige Datensätze vor.

Die Stichprobe zum 2DD-Mechanikkonzept fällt somit größer aus als bei der 1D-Adaption. Dies lässt sich zum einem darauf zurückführen, dass die Gesamtschulen gesondert ausgewertet werden mussten und dass bedingt durch die Corona-Krise mehrere Klassen weggefallen sind. Bezogen auf die Jahrgangsstufen liegen für das Gymnasium mehr Daten von SchülerInnen aus der 8. Stufe vor als aus der 9., wobei der Anteil der 8. Klassen bei der 1D-Adaption deutlich größer ausfällt. Für die Gesamtschulen kamen die meisten SchülerInnen hingegen aus der 10. Jahrgangsstufe. Dieser Unterschied entsteht daraus, dass durch die schulinternen Lehrpläne der teilnehmenden Schulen festgelegt wird, in welcher Stufe das erste Mal Mechanik in Physik unterrichtet wird. An der Gesamtschule findet der Mechanikunterricht in NRW zu einem großen Anteil erst später statt als am Gymnasium.

## 6.3 Instrumente und erfasste Variablen

Zum Beginn und nach Beendigung der Unterrichtsreihe wurde ein Prä- bzw. Posttest durchgeführt, wobei als kognitive Variable das Fachwissen der SchülerInnen in Mechanik (auf den Fachwissenstest wird ausführlich in Kap. 6.5.5.1 eingegangen), sowie das Interesse und das fachspezifische Selbstkonzept (Frey et al., 2009, S. 50 bzw. S. 86, adaptiert für Physik) als nicht kognitive Kontrollvariablen erfasst wurden. Als weitere Kontrollva-

riablen wurden Geschlecht und Alter der SchülerInnen erfasst sowie zwei verschiedene kognitive Fähigkeitentests (KFTs) (Heller & Perleth, 2000), N-Test 2 (Prätest) und N-Test 3 (Posttest) durchgeführt<sup>11</sup>.

In Tabelle 6.3 sind die Instrumente der intervallskalierten Kontrollvariablen nochmals ausführlich dargestellt. Aufgeführt sind die Anzahl der Items, der Skalentyp sowie Cronbachs Alpha (erfasst über die ausgewertete Gesamtstichprobe mit vorliegenden Daten zu beiden Messzeitpunkten) als Maß für die Reliabilität des eingesetzten Instruments.

Die Reliabilität<sup>12</sup> nach Cronbachs Alpha liegt für alle in Tabelle 6.3 aufgeführten Testinstrumente zu beiden Erhebungszeitpunkten im mittleren (.80 bis .90) oder im hohen Bereich (über .90) (siehe z.B. Bortz & Döring, 2006, S. 199).

Tabelle 6.3: Kontrollvariablen und Instrumente der Studie

| Variable                              | Anzahl der Items | Skalentyp                 | Cronbachs $\alpha$ (Prä/Post)                 |
|---------------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Interesse</b>                      | 5                | 4 stufige-Likert-Skala    | $\alpha = .88$ (Prä)<br>$\alpha = .86$ (Post) |
| <b>Selbstkonzept</b>                  | 6                | 4 stufige-Likert-Skala    | $\alpha = .86$ (Prä)<br>$\alpha = .90$ (Post) |
| <b>Kognitive Fähigkeit (N-Test 2)</b> | 25               | Dichotom (richtig/falsch) | $\alpha = .91$ (Nur Prä)                      |
| <b>Kognitive Fähigkeit (N-Test 3)</b> | 15               | Dichotom (richtig/falsch) | $\alpha = .81$ (Nur Post)                     |

Zur Kontrolle der Unterrichtszeit<sup>13</sup> wurde zusätzlich auf der Klassenebene die Anzahl, der von den Lehrkräften unterrichteten Unterrichtsstunden, erfasst. Abschließend wurden in den Klassen stichprobenartig Workbooks anonym eingesammelt, um durch die Analyse der bearbeiteten Aufgaben bezogen auf dem Umfang und die Korrektheit der Bearbeitung einen Treatment-Check in beiden Gruppen vornehmen zu können. Die Erfassung der Unterrichtszeit und die Auswertung der Workbooks sind Bestandteile der Validierungslogik dieser Studie (siehe Kap. 6.4.2). Bei der Auswertung des Bearbeitungsumfangs wurde so vorgegangen, dass aufeinander aufbauende Teilaufgaben oder Varianten der gleichen Aufgabenstellung als eine Einheit festgelegt wurden und so der Bearbeitungsstand bezüglich dieser Einheiten als Prozentangabe ausgewertet wurde. In einem zweiten Schritt wurde auf inhaltlicher Ebene eine Bewertung (dichotom: richtig/falsch) der verpflichtenden Workbook-Aufgaben vorgenommen, um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die Aufgaben korrekt nach den jeweiligen Konzepten der Mechaniklehrgänge gelöst wurden.

<sup>11</sup>Die KFTs liegen nicht für alle SchülerInnen vor. Wenn es bei Testungen zu Zeitproblemen (z.B. im Fall von Einzelstunden) kam, wurde der KFT nicht zusätzlich durchgeführt. Insbesondere bei den online durchgeführten Posttest aufgrund der Schulschließungen wurde der N-Test 3 nicht erhoben, so dass diese Werte nur für eine geringe Anzahl an SchülerInnen vorliegen.

<sup>12</sup>Die Werte wurden aus den Daten der Haupterhebung berechnet.

<sup>13</sup>Bei den online unterrichteten Klassen wurde die Unterrichtszeit nicht erfasst, da bei diesem Unterrichtsformat keine Aussage über die tatsächlich unterrichteten Doppelstunden gemacht werden kann.

Jeder bearbeitete Aufgabenteil wurde hierzu im Vergleich zu einer Musterlösung einzeln bewertet. Schließlich wurde der Anteil dieser korrekt gelösten Aufgaben in Relation zu allen bearbeiteten Aufgaben betrachtet. Von den SchülerInnen nicht bearbeitete Aufgaben wurden für den zweiten Schritt des Treatment-Checks nicht berücksichtigt.

In Tabelle 6.4 sind die in der Studie erhobenen Werte für die Kontrollvariablen, aufgeteilt auf die beiden Treatmentgruppen für die Gymnasialklassen, aufgeführt. Durch den Vergleich der Kontrollvariablen können Aussagen über die Vergleichbarkeit der beiden Treatmentgruppen beziehungsweise über Einschränkungen gemacht werden. Aus diesem Grund sind in der letzten Spalte Kennwerte für berechnete Mittelwertvergleiche sowie Effektstärken (falls möglich) angegeben. Der Vollständigkeit halber sind die Werte der Kontrollvariablen auch für die Gesamtschulklassen (1D-Adaption) angegeben. Aus Tabelle 6.4 kann man entnehmen, dass die beiden Treatmentgruppen zum Prätestzeitpunkt als vergleichbar angenommen werden können. Das Alter der SchülerInnen und der Anteil des weiblichen (männlichen) Geschlechts liegen in einem vergleichbaren Bereich. Ebenso gibt es im Prätest hinsichtlich Interesse und fachspezifischem Selbstkonzept im Fach Physik keinen signifikanten Unterschied zwischen den SchülerInnen der beiden Treatmentgruppen. Gleiches gilt für die Ergebnisse der KFTs zu beiden Testzeitpunkten. Unterschiede zwischen den beiden Treatmentgruppen gibt es allerdings bezogen auf Interesse und Selbstkonzept im Posttest. In beiden Fällen kommt es innerhalb beider Treatmentgruppen zu einem höchst signifikanten Rückgang von Interesse und Selbstkonzept, wobei dieser Rückgang im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts nicht so stark ausfällt (Cohens  $d = -0.25$  bzw.  $d = -0.23$ ) wie bei der 1D-Adaption (Cohens  $d = -0.36$  bzw.  $d = -0.37$ ). Daraus resultiert, dass sich die beiden Treatmentgruppen zum Posttestzeitpunkt hoch signifikant im Interesse beziehungsweise höchst signifikant im Selbstkonzept voneinander unterscheiden. Bezüglich der Unterrichtszeit (für eine ausführliche Diskussion siehe Kap. 6.5.3.2), definiert als die Anzahl der von den Lehrkräften unterrichteten Doppelstunden, kann kein signifikanter Unterschied<sup>14</sup> zwischen den beiden Treatmentgruppen nachgewiesen werden. Einen höchst signifikanten Unterschied gibt es hingegen zwischen den beiden Treatmentgruppen beim Bearbeitungsstand der verpflichtenden Workbookaufgaben (siehe dazu Kap. 6.5.3.3). In Bezug auf den Anteil der korrekten Lösungen in den Workbooks unterscheiden sich die beiden Treatmentgruppen wiederum nicht signifikant voneinander (siehe dazu Kap. 6.5.4.1).

<sup>14</sup>Aufgrund der geringen Stichprobengröße und der Verletzung der Normalverteilung wurde ein Mann-Whitney-U-Test berechnet.

Tabelle 6.4: Werte der Kontrollvariablen zu den jeweiligen Testzeitpunkten (Interesse und Selbstkonzept sind Mittelwerte auf einer 4-stufigen Likert-Skala, wobei 4 für hohes und 1 für niedriges Interesse bzw. Selbstkonzept steht).

| Kontrollvariable                     | Gymnasium    |                      |                                                          |
|--------------------------------------|--------------|----------------------|----------------------------------------------------------|
|                                      | 1D-Adaption  | 2DD-Mechanik-konzept | t-Test mit Effektstärke bzw. Mann-Whitney-U-Test         |
| Alter                                | 13.3         | 13.5                 | -                                                        |
| Geschlecht (weiblich)                | 51 %         | 54 %                 | -                                                        |
| Interesse (Prä)                      | 2.73         | 2.70                 | $t(657.15) = 0.73, p = .466$<br>$d = 0.05 [-0.09, 0.19]$ |
| Interesse (Post)                     | 2.33         | 2.50                 | $t(710.34) = 3.34, p < .01$<br>$d = 0.24 [0.10, 0.38]$   |
| Selbstkonzept (Prä)                  | 2.77         | 2.76                 | $t(817) = 0.38, p = .707$<br>$d = 0.03 [-0.11, 0.17]$    |
| Selbstkonzept (Post)                 | 2.41         | 2.59                 | $t(719.66) = 3.63, p < .001$<br>$d = 0.26 [0.12, 0.40]$  |
| KFT N-Test 2 (Prä)                   | 15.5         | 15.7                 | $t(769) = 0.52, p = .602$<br>$d = 0.04 [-0.11, 0.18]$    |
| KFT N-Test 3 (Post)                  | 10.2         | 10.1                 | $t(509) = 0.12, p = .905$<br>$d = 0.01 [-0.17, 0.20]$    |
| Unterrichtszeit (Doppelstunden)      | 9.5          | 8.6                  | $U = 71.50, p = .113$                                    |
| Bearbeitungsstand der Workbooks      | 81 %         | 69 %                 | $t(88) = 3.67, p < .001$<br>$d = 0.79 [0.35, 1.22]$      |
| Anteil korrekter Lösungen (Workbook) | 63 %         | 61 %                 | $t(88) = 0.53, p = .600$<br>$d = 0.11 [-0.31, 0.53]$     |
| Kontrollvariable                     | Gesamtschule |                      |                                                          |
|                                      | 1D-Adaption  |                      |                                                          |
| Alter                                | 14.9         |                      |                                                          |
| Geschlecht (weiblich)                | 46 %         |                      |                                                          |
| Interesse (Prä)                      | 2.59         |                      |                                                          |
| Interesse (Post)                     | 2.41         |                      |                                                          |
| Selbstkonzept (Prä)                  | 2.64         |                      |                                                          |
| Selbstkonzept (Post)                 | 2.40         |                      |                                                          |
| KFT N-Test 2                         | 12.1         |                      |                                                          |
| KFT N-Test 3                         | 6.0          |                      |                                                          |
| Unterrichtszeit (Doppelstunden)      | 9.1          |                      |                                                          |
| Bearbeitungsstand der Workbooks      | 74 %         |                      |                                                          |
| Anteil korrekter Lösungen (Workbook) | 53 %         |                      |                                                          |

## 6.4 Validierungslogik

Die bisherigen Studien unterliegen (wie in Kap. 4.2.4 diskutiert) gewissen Einschränkungen bezogen auf die Validität der erfolgten Schlussfolgerungen. Die Validität einer Studie beziehungsweise eines Designs entsteht dadurch, dass von den Befunden möglichst stringent und eindeutig Schlüsse über die in Frage stehende Sache gemacht werden können. Dadurch ergeben sich Anforderungen an das Design, die systematisch beschrieben werden sollen. Als roter Faden für die detaillierte Beschreibung des Designs, der eingesetzten Materialien und Instrumente sowie der damit verbundenen Validitätsargumente im Hinblick auf die Forschungsfragen wird in Anlehnung an die Arbeit von Dickmann (2016) eine Validierungslogik<sup>15</sup> formuliert. Die Validierungslogik bildet einen Bezugsrahmen, „[...] der die notwendigen Validierungsschritte benennt, systematisiert und gleichzeitig einen konsistenten Rahmen für den Bewertungsprozess schafft“ (Dickmann, 2016, S. 67).

### 6.4.1 Argument-based-approach nach Kane

Die theoretische Grundlage für die Validierungslogik bildet der argument-based-approach von Kane (2012, 2013), dessen Grundideen im Folgenden kurz zusammengefasst werden. Im argument-based-approach wird zwischen den vorgebrachten Validitätsargumenten und der Rahmung durch die Validierungslogik unterschieden. Hierzu wird genauer spezifiziert, welche Validitätsargumente sich hinter den beabsichtigten Verwendungszweck von design-technischen Entscheidungen oder hinter den Interpretationen von beispielsweise Testwerten befinden. Die Diskussion dieser Argumente erlaubt abschließend eine Bewertung der vollständigen Validierungsschrittfolge, wodurch die Validität der Studie gestützt wird (vgl. Kane, 2013, S. 9f). Dies erfolgt anhand der drei folgenden Fragen (vgl. Dickmann, 2016, S. 63, zitiert nach Kane (2012), S. 13):

1. Sind die formulierten Aussagen und Argumente sowie die Maßnahmen zu deren Stützung detailliert genug beschrieben, um die Argumentation für Verwendungszwecke und für Interpretationen nachvollziehen zu können? (Clarity of the argument)
2. Ist das aufgestellte Modell kohärent, das heißt ermöglicht es eine schlüssige Argumentation? (Coherence of the argument)
3. Sind die Aussagen und Argumente a priori plausibel oder durch Evidenz gestützt? (Plausibility of assumptions)

Die Validierungslogik geht von einer Zielebene aus, in der sich das Erkenntnisinteresse befindet. Die Zielebene wird anschließend in einer Folge von Übersetzungsschritten in andere Ebenen überführt. Jede dieser Übersetzungen, oder vielmehr das Ergebnis der Überset-

<sup>15</sup>In der Arbeit von Dickmann (2016) wurde ursprünglich der Begriff Interpretations-Nutzungs-Argument (INA) in Anlehnung an die Arbeiten von Kane (2012, 2013) verwendet. Das INA ist als allerdings selbst aus Argumenten aufgebaut. Um daher eine begriffliche Trennung zwischen den Argumenten und dem übergeordneten Schema hinter der Validierung herstellen zu können, wird in dieser Arbeit von einer Validierungslogik gesprochen.

zung, ist mit einer übergeordneten Aussage und Argumenten über die Verwendungszwecke von design-technischen Entscheidungen oder über die Interpretation von Testwerten versehen (vgl. Dickmann, 2016, S. 67). Die vollständige Abfolge aller Übersetzungsschritte, verbunden mit den zugrunde liegenden Aussagen und Argumenten, bilden das vollständige Modell, welches nach der Evaluation eine Bewertung über die Validität der vorgenommen Übersetzungsschritte erlaubt.

### 6.4.2 Validierungslogik für die Mechanikstudie

Bei der **Zielebene** dieser Arbeit handelt es sich im Sinne der übergeordneten Forschungsfrage (siehe Kap. 5.2) allgemein formuliert um den *Einfluss von Elementarisierung auf den Lernzuwachs von SchülerInnen*. Diese Zielebene wird in fünf aufeinanderfolgenden Übersetzungsschritten in andere Ebenen mit den erhobenen Testwerten als Endpunkt überführt (siehe Abb. 6.1).

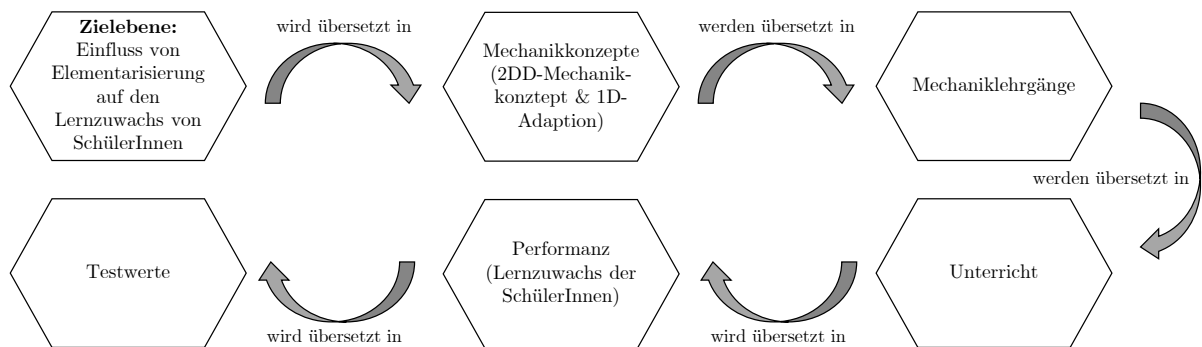


Abbildung 6.1: Übersetzungsschritte von der Zielebene bis zur Erfassung von Testwerten (vgl. der Darstellung Dickmann, 2016, S. 67)

Der Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen wird in dieser Arbeit exemplarisch anhand des Themenfelds der Mechanik untersucht, indem der Einfluss auf den Lernzuwachs von zwei verschiedenen **Mechanikkonzepten** (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) miteinander verglichen wird. Die beiden Mechanikkonzepte werden durch die konkrete Ausformulierung in Form von Materialien (SchülerInnenhefte, Workbooks, etc.) in **Mechaniklehrgänge** überführt. Diese werden schließlich von den an der Studie teilnehmenden Lehrkräften in **Unterricht** übersetzt, welcher wiederum von den SchülerInnen in **Performanz** umgesetzt wird. Als Bestandteile der Performanz wird in dieser Arbeit das Lernen (genauer der Lernzuwachs) und die Anwendung des neu erworbenen Wissens durch die SchülerInnen betrachtet. Der Lernzuwachs wird im letzten Schritt mit Hilfe der eingesetzten Instrumente in **Testwerte** überführt. Die soeben genannten Übersetzungsschritte ergeben sich durch das Angebots-Nutzungs-Modell nach Helmke (2009) (siehe Abb. 6.2). Der Unterricht wird in diesem Modell als **Angebot** formuliert. Hierunter fallen die Materialien aus der Ebene der Mechaniklehrgänge, welche sich zuvor aus der Ebene der Mechanikkonzepte ergeben haben, unter dem Punkt „Qua-

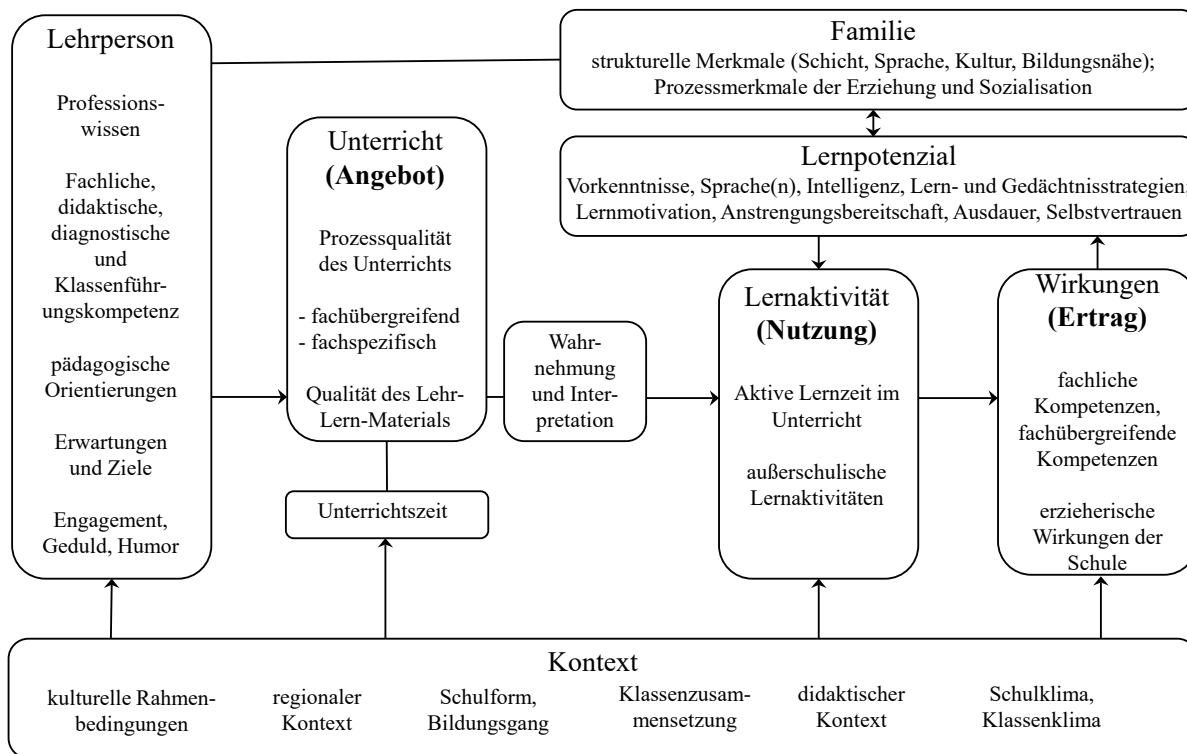


Abbildung 6.2: Angebots-Nutzungs-Modell nach Helmke (2009)

lität des Lehr-Lern-Materials“. Die Performanz der SchülerInnen spiegelt sich im Modell in der Lernaktivität als **Nutzung** durch die SchülerInnen über den Zwischenschritt der „Wahrnehmung und Interpretation“ wider. Die eingesetzten Instrumente bilden schließlich den **Ertrag** dieser Nutzung, im Fall dieser Arbeit die fachlichen Kompetenzen, ab. Der Aspekt der Prozessstruktur, welcher im weiteren Verlauf bei der Gestaltung des Unterrichts nach den Mechaniklehrgängen thematisiert wird, ist im Angebots-Nutzungs-Modell unter dem Punkt „Prozessqualität des Unterrichts“ genannt. Als letzter relevanter Aspekt des Angebots-Nutzungs-Modells wird die Unterrichtszeit als Einflussfaktor auf den Unterricht genannt, welche in dieser Arbeit als Kontrollvariable erfasst wird.

Insgesamt soll die Diskussion der Übersetzungsschrittfolge also die Frage danach beantworten, inwiefern valide von den in dieser Studie erhobenen Testwerten, auf den Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen im Bereich der Mechanik in der Sekundarstufe I geschlossen werden kann. Jeder der zuvor genannten Übersetzungsschritte ist im Sinne der Validierungslogik mit einer übergeordneten Aussage und Argumenten verbunden, welche für jede Ebene formuliert und begründet werden müssen.

Es folgt nun die Formulierung der einzelnen Übersetzungsschritte aus Abbildung 6.1. Hierzu werden jeweils eine übergeordnete Aussage formuliert sowie die damit verbundenen Argumente benannt und begründet. Dazu wird zu jeder Ebene eine Abbildung (Abb. 6.3 bis Abb. 6.7) erstellt, welche die Verweise auf die konkrete Diskussion der Argumente enthält. Alle Schritte werden am Ende in Abbildung 6.8 zusammengefasst dargestellt.

## Übersetzungsschritt 1: Mechanikkonzepte

Einer der Hauptkritikpunkte aus Kapitel 4.2.4 an den bisherigen Forschungsarbeiten war, dass die nachgewiesenen Effekte nicht eindeutig den Unterschieden in den Elementarisierungen zugeordnet werden konnten. Auch blieb stellenweisen die Elementarisierung, der als „konventioneller“ Mechanikunterricht bezeichneten Kontrollgruppe, offen (siehe Kap. 5). Aus diesem Grund wurde bereits im Kapitel 5.2 diskutiert, dass für die Zurückführung von Effekten im Lernzuwachs auf die Unterschiede in der Elementarisierung alle weiteren Variablen in der Evaluation der Mechanikkonzepte wie die methodische Elementarisierung und die Repräsentationsformen konstant gehalten werden müssen. Zu diesem Zweck wurde zum 2DD-Mechanikkonzept eine 1D-Adaption entwickelt, die folgende Aussage in der Ebene der Mechanikkonzepte erlaubt:

1. Effekte in den Lernzuwächsen beim Vergleich der beiden **Mechanikkonzepte** (2DD-Mechanikkonzept und 1D-Adaption) können allein auf die Unterschiede in der Elementarisierung zurückgeführt werden.

Diese Aussage ist mit zwei Argumenten verbunden (siehe Abb. 6.3):

- 1.1 Die beiden Mechanikkonzepte unterscheiden sich in eindeutig benennbaren Parametern bezogen auf die inhaltliche Elementarisierung und die didaktische Reduktion.
- 1.2 Die 1D-Adaption ermöglicht abgesehen von der inhaltlichen Elementarisierung und der didaktischen Reduktion ein Konstanthalten aller weiteren Gestaltungsmerkmale (methodische Elementarisierung und Repräsentationsformen).

Argument 1.2 ist darüber hinaus mit einer Nebenbedingung versehen:

- Die 1D-Adaption orientiert sich möglichst nah am „konventionellen“ Unterricht.

*Begründung von Argument 1.1:*

Es ist notwendig, dass sich die beiden Mechanikkonzepte in eindeutig benennbaren Parametern hinsichtlich der inhaltlichen Elementarisierung und der didaktischen Reduktion voneinander unterscheiden, da nur so Aussagen darüber gemacht werden können, welche Unterschiede zwischen den Elementarisierungen für mögliche Differenzen in den erzeugten Lernzuwächsen verantwortlich sind. Des Weiteren wird erst so ein fairer Vergleich zwischen den beiden Mechanikkonzepten möglich, da alle weiteren Bestandteile der Evaluationsstudie, wie Materialien oder Testinstrumente, genau diese Unterschiede in den Elementarisierungen berücksichtigen müssen, damit kein Konzept bevorzugt wird. Insbesondere ist dieses Argument auch Voraussetzung für Argument 1.2, da das Konstanthalten aller weiteren Gestaltungsmerkmale voraussetzt, um diese überhaupt erst auf der Ebene der Elementarisierungen definieren zu können (wie zum Beispiel den Einsatz von Stroboskopbildern als Repräsentationsform von Bewegung).

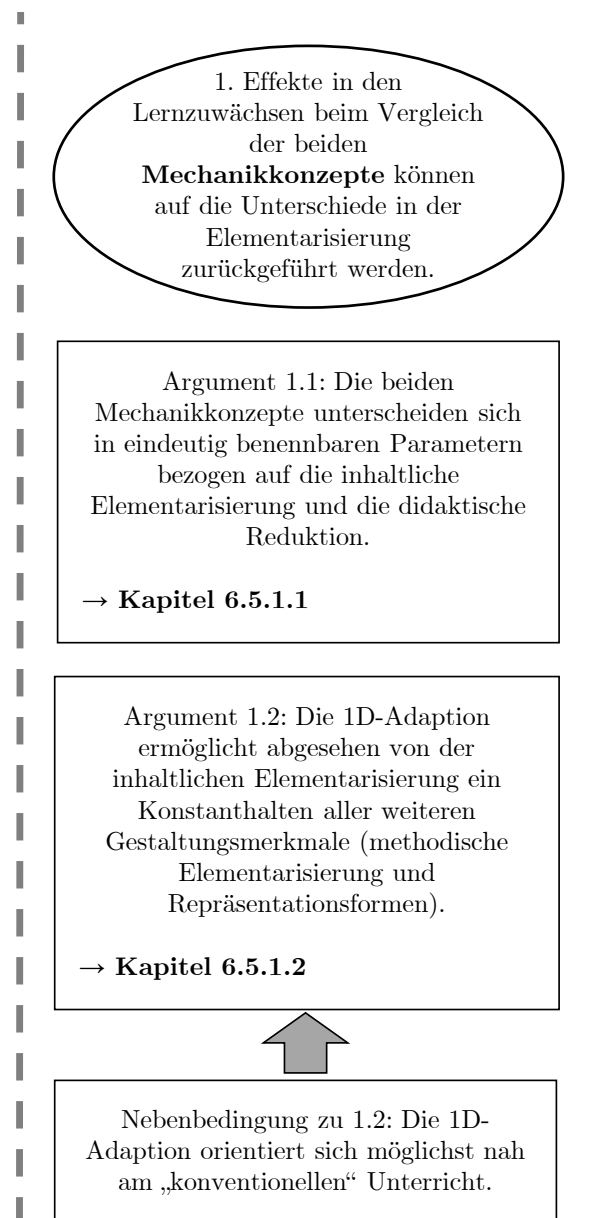


Abbildung 6.3: Übersetzungsschritt 1 mit den Argumenten zur Ebene der Mechanikkonzepte (vgl. der Darstellung Dickmann, 2016, S. 68)

*Begründung von Argument 1.2:*

Um mögliche Effekte auf die Unterschiede in den inhaltlichen Elementarisierungen und der didaktischen Reduktion zurückführen zu können, muss vorausgesetzt sein, dass alle übrigen Gestaltungsmerkmale über die gesamte Evaluationsstudie konstant gehalten werden können. Dies gilt insbesondere für die verwendeten Repräsentationsformen. Damit ist also keine freie Wahl der Elementarisierungen in den beiden Vergleichsgruppen möglich, sondern es müssen gegebenenfalls Bestandteile der jeweils anderen Elementarisierung übernommen werden, um das Konstanthalten zu ermöglichen.

*Nebenbedingung zu 1.2:*

Die Elementarisierung der 1D-Adaption orientiert sich in dieser Arbeit möglichst nah an dem „konventionellen“ Mechanikunterricht. In Bezug auf die Validierungslogik ist dies keine direkte Voraussetzung für das Zurückführen von Effekten im Lernzuwachs auf die Unterschiede in der Elementarisierung, weshalb dies hier auch nur als Nebenbedingung aufgeführt wird. Theoretisch wäre auch eine andere Wahl der Elementarisierung möglich, solange dabei Bedingung 1.2 erfüllt bleibt. Ein Ziel dieser Studie sollte es sein, die Ergebnisse der bisherigen Evaluationsstudien unter kontrollierten Bedingungen zu reproduzieren, weshalb sich zunächst dafür entschieden wurden, den größtmöglichen Abstand zwischen dem „konventionellen“ Mechanikunterricht und dem 2DD-Mechanikkonzept zu wählen. Im Sinne von Argument 1.2 muss also gegebenenfalls für die Elementarisierung der 1D-Adaption vom „konventionellen“ Mechanikunterrichts abgewichen und Elemente des 2DD-Mechanikkonzepts übernommen werden, um ein Konstanthalten der Gestaltungsmerkmale zwischen den beiden Mechanikkonzepten zu ermöglichen.

**Übersetzungsschritt 2: Mechaniklehrgänge**

Die beiden Mechanikkonzepte werden durch die konkrete Ausformulierung in Form von Materialien und der Ergänzungen durch Simulationen in Mechaniklehrgänge umgesetzt. Bei den bisherigen Forschungsarbeiten bestand ein wesentlicher Kritikpunkt darin, dass der Umfang an Material nicht für Treatment- und Kontrollgruppe gleich war (siehe Kap. 4.2.4). Meist wurde nur für die Treatmentgruppen entsprechende Materialien entwickelt, wodurch die positiven Effekte wiederum nicht ausschließlich der Elementarisierung zugeordnet werden können, sondern ihren Ursprung im Material oder in den eingesetzten Medien haben können. Der Anspruch dieser Studie besteht darin, alle diese äußeren Faktoren zwischen den beiden Mechaniklehrgängen möglichst gleich zu halten, sowohl was die Themenstruktur der Lehrgänge, den Umfang und die Qualität an Material sowie den Einsatz von Repräsentationsformen und Medien betrifft. Die übergeordnete Aussage für die Ebene der Mechaniklehrgänge lautet somit:

2. Die beiden **Mechaniklehrgänge** verlaufen analog zueinander und unterscheiden sich ausschließlich in der Elementarisierung.

Diese Aussage ist mit zwei Argumenten verbunden (siehe Abb. 6.4):

- 2.1 Die beiden Mechaniklehrgänge haben eine vergleichbare methodische Elementarisierung.
- 2.2 Beide Mechaniklehrgänge umfassen analog zueinander verlaufende Materialien im gleichem Umfang und halten dabei möglichst alle Gestaltungsmerkmale abgesehen von der inhaltlichen Elementarisierung und der didaktischen Reduktion konstant.

*Begründung von Argument 2.1:*

Das erste Argument zur Ebene der Mechaniklehrgänge bezieht sich auf methodische Elementarisierung der Lehrgänge oder anders gesagt auf die Abfolge der einzelnen Themen. Damit die beiden Mechaniklehrgänge analog zueinander verlaufen können, ist es notwen-

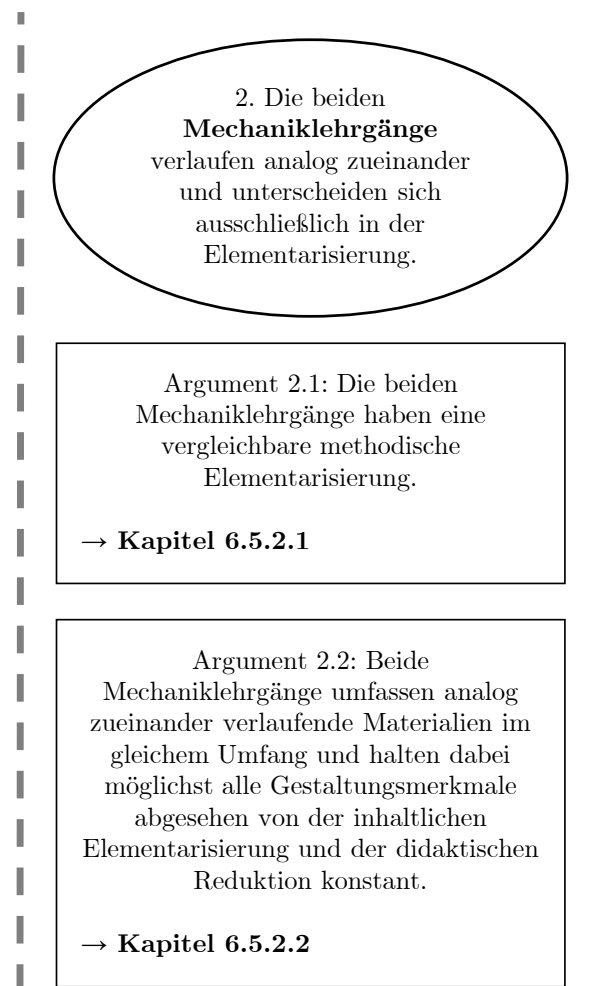


Abbildung 6.4: Übersetzungsschritt 2 mit den Argumenten zur Ebene der Mechaniklehrgänge

dig, dass die einzelnen Themen in der gleichen Abfolge und im gleichen Umfang behandelt werden (soweit dies durch die unterschiedlichen Elementarisierungen möglich ist).

Beim 2DD-Mechanikkonzept handelt es sich insbesondere um einen dynamischen Zugang zum Kraftbegriff, das heißt, es müssen erst die Grundgrößen der Kinematik eingeführt werden, um diese mit den anschließenden Größen der Dynamik in Beziehung setzen zu können. Bei den bisherigen Arbeiten bleibt allerdings meist offen, inwiefern bei den Kontrollgruppen ein dynamischer oder doch eher ein statischer Zugang verfolgt wurde, wodurch sich möglicherweise ein weiterer konfundierter Parameter zwischen den beiden Gruppen ergab. Aus diesem Grund sollte auch der Mechaniklehrgang der 1D-Adaption einen dynamischen Zugang zum Kraftbegriff verfolgen.

*Begründung von Argument 2.2:*

Wie schon in der übergeordneten Aussage formuliert, müssen beide Mechaniklehrgänge den gleichen Umfang an Materialien umfassen, wobei diese möglichst analog zueinander verlaufen sollen, um so auch die Ausgestaltung der Materialien zwischen den beiden Me-

chaniklehrgängen konstant halten zu können. Damit ist gemeint, dass alle Bestandteile der Materialien, sofern dies durch die unterschiedlichen Elementarisierungen möglich ist, direkt miteinander vergleichbar sein sollten und sich ausschließlich in der Elementarisierung voneinander unterscheiden. Man sollte also zum Beispiel (im Idealfall) zwei Seiten aus den SchülerInnenheften der beiden Lehrgängen nebeneinanderlegen können und diese würden sich ausschließlich in den verwendeten Begrifflichkeiten, welche sich auf die Elementarisierung beziehen, unterscheiden. Alles Übrige würde aber komplett identisch (Layout, die übrigen Satzbestandteile usw.) gehalten.

Durch die Wahl der Elementarisierung der 1D-Adaption wurde in der Ebene der Mechanikkonzepte ein Konstanthalten aller Gestaltungsmerkmale ermöglicht. Dies muss nun auch in den Mechaniklehrgängen umgesetzt sein, insbesondere in Bezug auf die verwendeten Repräsentationsformen und Medien. Auch diese müssen möglichst analog und vergleichbar in beiden Mechaniklehrgängen verlaufen.

### Übersetzungsschritt 3: Unterricht

Die beiden Mechaniklehrgängen werden von den an der Studie teilnehmenden Lehrkräften in Unterricht übersetzt. Die vorherigen Übersetzungsschritte waren alle theoretischer Natur und hatten mit der Konzeption der Elementarisierung und der Ausgestaltung von Materialien zu tun. Mit dem Unterricht beginnt an dieser Stelle die praktische Umsetzung dieser theoretischen Überlegungen durch Dritte. Auch für den Unterricht gilt der Grundsatz, dass dieser in beiden Treatmentgruppen möglichst vergleichbar sein soll, damit weiterhin eine Rückführung der Ergebnisse auf die Unterschiede in der Elementarisierung möglich ist. Damit lautet die übergeordnete Aussage für die Ebene des Unterrichts:

3. Der durch die Lehrkräfte erteilte **Unterricht** erfolgt nach den beiden Mechaniklehrgängen und ist in beiden Treatmentgruppen vergleichbar.

Die Vergleichbarkeit des Unterrichts ist mit drei Argumenten verbunden (siehe Abb. 6.5):

- 3.1 Der Unterricht in den beiden Treatmentgruppen verläuft nach der gleichen Lernprozessstruktur.
- 3.2 Die Anzahl der Unterrichtsstunden ist in beiden Gruppen vergleichbar.
- 3.3 Die verpflichtenden Workbookaufgaben (Treatment-Check), werden für beide Gruppen im gleichen Umfang bearbeitet.

#### *Begründung von Argument 3.1:*

Um die Lehrkräfte in der Ausgestaltung ihres Unterrichts nicht zu sehr einschränken, wurden in der Studie keine Vorgaben zur Oberflächenstruktur (Methoden oder Sozialformen) des Unterrichts gemacht. Es wurden lediglich Angebote und Vorschläge dazu unterbreitet. Die Lernprozessstruktur als Tiefenstruktur des Unterrichts bildet hingegen einen Parameter, der möglichst zwischen den beiden Treatmentgruppen konstant gehalten werden sollte, da in Studien zur Gestaltung von Unterricht zum Beispiel nach den Basismodellen (Krabbe et al., 2015; Oser & Patry, 1990) gezeigt werden konnte, dass

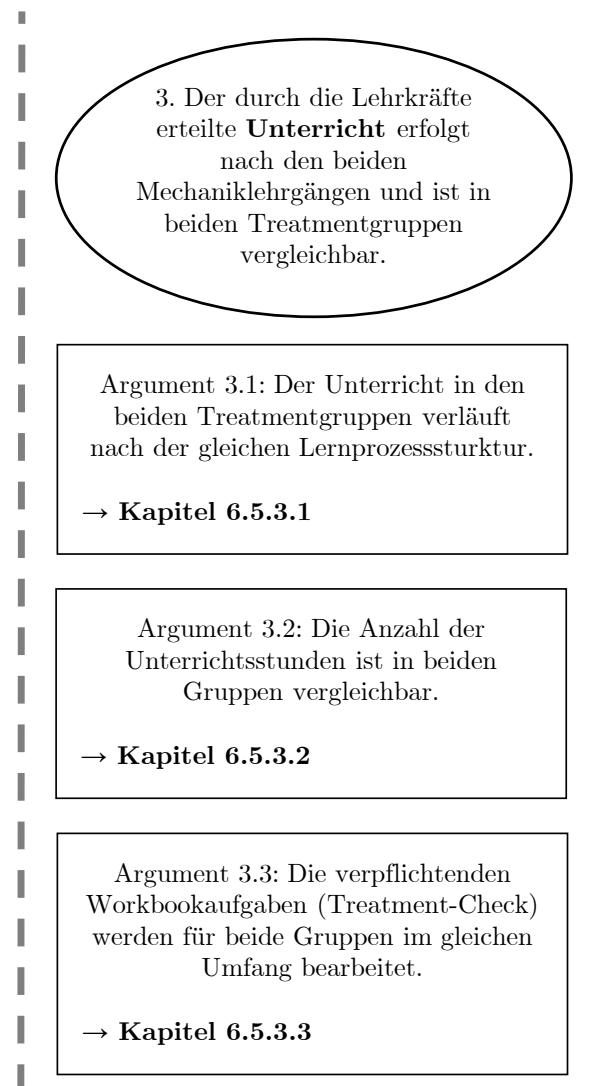


Abbildung 6.5: Übersetzungsschritt 3 mit den Argumenten zur Ebene des Unterrichts

dies einen Einfluss auf den Lernprozess der SchülerInnen haben kann (siehe Wackermann, 2008; Zander, 2015). Aus diesem Grund sollte für den Unterricht eine verpflichtende Lernprozessstruktur vorgegeben sein, welche in beiden Treatmentgruppen vergleichbar ist.

*Begründung von Argument 3.2:*

Für eine Vergleichbarkeit des Unterrichts sollte die Anzahl der unterrichteten Stunden in beiden Treatmentgruppen vergleichbar sein. Mehr Unterrichtsstunden in einer Gruppe könnten potenziell mit besseren Lernergebnissen dieser Gruppe verbunden sein, da die SchülerInnen mehr Zeit zum Lernen und Üben hatten. Somit könnten Unterschiede in den Leistungen der SchülerInnen nicht ausschließlich auf Unterschieden im den Treatments zurückgeführt werden.

### *Begründung von Argument 3.3:*

In den Workbooks wurden für den Einsatz im Unterricht verpflichtende Aufgaben markiert. Der Umfang der Bearbeitung kann anhand der stichprobenartig eingesammelten Workbooks in den beiden Treatmentgruppen verglichen werden. Der Bearbeitungsstand gibt einen Eindruck davon, in welchem Umfang die bereitgestellten Materialien tatsächlich von den Lehrkräften eingesetzt wurden, das heißt, in welchem Umfang auch wirklich nach den Mechaniklehrgängen und damit nach den angedachten Treatments unterrichtet wurde. Für den Vergleich der beiden Treatmentgruppen sollte der Bearbeitungsstand in einem vergleichbaren Umfang erfolgen, weil nur so mögliche Effekte auf das Treatment beziehungsweise auf die Unterschiede in den Treatments zurückgeführt werden können. Der gleiche Bearbeitungsstand kann daher als Indikator für den vergleichbaren Unterricht verwendet werden.

### **Übersetzungsschritt 4: Performanz**

Der Unterricht durch die Lehrkräfte wird im nächsten Übersetzungsschritt von den SchülerInnen in Performanz übersetzt. Bestandteil der Performanz ist dabei insbesondere der Lernprozess der SchülerInnen. Da jeder der SchülerInnen einen individuellen Lernprozess durchläuft, sind an dieser Stelle im Vergleich zu den vorherigen Übersetzungsschritten keine Aussagen über die Vergleichbarkeit der einzelnen Lernprozesse zwischen den beiden Treatments möglich. Grundsätzlich geht es in diesem Übersetzungsschritt darum, dass die SchülerInnen durch den Unterricht nach den beiden Mechaniklehrgängen einen Lernprozess durchlaufen und im Idealfall im Bereich der Mechanik nach Abschluss des Unterrichts einen Lernzuwachs verzeichnen können. Des Weiteren kann als Bestandteil der Performanz die Anwendung des von den SchülerInnen neu erworbenen Wissens betrachtet werden. Im Unterschied zum individuellen Lernprozess sind hier Aussagen möglich, indem überprüft wird, ob und in welchem Umfang die Konzepte, welche durch den Unterricht vermittelt werden sollten, auch von den SchülerInnen beider Treatmentgruppen angewendet werden können. Die übergeordnete Aussage lautet damit:

4. Die SchülerInnen erzielen durch den Unterricht im Bereich der Mechanik einen **Lernzuwachs** und können dieses neue Wissen entsprechend **anwenden**.

Diese Aussage ist mit zwei Argumenten verbunden (siehe Abb. 6.6):

- 4.1 Die SchülerInnen bauen in beiden Treatmentgruppen ein konzeptionelles Verständnis über das jeweilige Mechanikkonzept auf.
- 4.2 Die verpflichtenden Workbookaufgaben sind nach dem jeweiligen Mechanikkonzept korrekt bearbeitet (weiterer Treatment-Check).

### *Begründung von Argument 4.1:*

Das erste Argument hinter der übergeordneten Aussage besteht darin, dass die SchülerInnen ihr Wissen und Verständnis über Mechanik nach dem Unterricht in beiden Treatmentgruppen auf einer konzeptionellen Ebene erweitern können, das heißt, es findet auf Konzeptebene ein Lernprozess statt. Dieses Argument ist notwendig, um die Effekte,

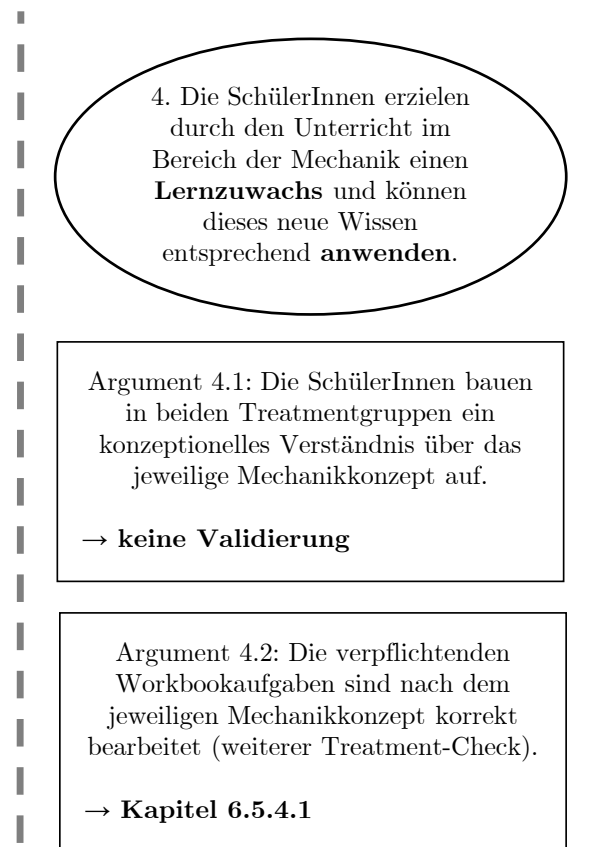


Abbildung 6.6: Übersetzungsschritt 4 mit den Argumenten zur Ebene des Lernens

welche sich in den Testwerten zeigen, auf die Unterschiede in den Elementarisierungen zurückführen zu können.

Wie Abbildung 6.6 entnommen werden kann, findet in dieser Arbeit keine Validierung von Argument 4.1 statt. Für die Kohärenz des Modells war es aber notwendig diesen Aspekt der Performanz-Ebene mit aufzunehmen, weil schließlich erst diese individuellen Lernprozesse durch den Einsatz von Testinstrumenten abgebildet und in Testwerte überführt werden. Mögliche Methoden für diesen Validierungsschritt wären Leitfaden gestützte Interviews oder Befragungen mit lautem Denken gewesen, um auf einer qualitativen Ebene zu zeigen, dass auch wirklich ein Lernen auf konzeptioneller Ebene bei den SchülerInnen stattgefunden hat. Bei den Verfahren können allerdings schon aufgrund des zeitlichen Aufwands immer nur exemplarische Fallbeispiele untersucht werden. Dieser Schritt der genaueren Untersuchung von Lernprozessen auf der Individualebene wird auch bei den meisten vorausgegangen empirischen Studien erst gar nicht oder nicht ausreichend thematisiert (siehe z.B. Amenda, 2017; Jung & Callsen, 1976; Wilhelm, 2005), da meist nur isoliert die Testwerte nicht aber die Übersetzungsschritte hin zu den Testwerten betrachtet werden. Aus diesem Grund kann dies auch als Appell für die Forderung nach mehr qualitativer Einzelfallforschung auf der Ebene der Lernprozesse verstanden werden. Die nicht ausreichende Validierung dieses Arguments wird darin begründet, dass dies

den Umfang der Studie für dieses Argument erheblich vergrößert hätte. Dadurch ergeben sich Einschränkungen in der Validität der Ergebnisse, weil im Sinne des Validierungslogik dieser Übersetzungsschritt zwischen dem Unterricht und den abschließenden Testwerten nicht hinreichend validiert wurde.

### *Begründung von Argument 4.2:*

Unter Argument 3.3 wurde bisher nur der Bearbeitungsstand der verpflichtenden Workbookaufgaben betrachtet. Als weiterer Treatment-Check muss nun auf der inhaltlichen Ebene gezeigt werden, dass die SchülerInnen das neu erworbene Wissen aus dem Unterricht nach den beiden Mechaniklehrgängen korrekt auf die verpflichtenden Workbookaufgaben anwenden können. Damit sind zwar im Sinne von Argument 4.1 keine Aussagen über die individuellen Lernprozesse möglich, es kann aber zumindest gezeigt werden, dass eine Anwendung von Wissen stattfindet. Ist dieses Argument nicht erfüllt, können Effekte im Lernzuwachs nicht auf die beiden Treatments zurückgeführt werden, da überhaupt nicht klar ist, ob ein neuer Wissenserwerb bei den SchülerInnen vorliegt.

## **Übersetzungsschritt 5: Testwerte**

Den Abschluss der Übersetzungsschritte bildet der Einsatz von Testinstrumenten, welche den Lernzuwachs der SchülerInnen in Testwerte überführen. In Kapitel 4.2.4 wurden bereits Einschränkungen bezüglich der in den bisherigen Studien eingesetzten Testinstrumente diskutiert. Hauptkritikpunkt war die Bevorzugung der Treatmentgruppe, zum Beispiel durch die explizite Wahl von Begrifflichkeiten oder Darstellungsformen aus dem 2DD-Mechanikkonzept, welche der Kontrollgruppe nicht bekannt waren. Aus diesem Grund wurde für diese Studie ein eigener Fachwissenstest entwickelt, der nicht die zuvor diskutierten Einschränkungen aufweist. Die übergeordnete Aussage für die Ebene der Testwerte wird zunächst allgemein formuliert als:

5. Der Lernzuwachs der SchülerInnen wird in geeigneter Art und Weise in **Testwerte** überführt.

Diese Aussage ist mit drei Argumenten verbunden (siehe Abb. 6.7):

- 5.1 Die Aufgaben des eingesetzten Fachwissenstests bilden die Inhalte der beiden Mechanikkonzepte ab und bevorzugen keine der beiden Treatmentgruppen.
- 5.2 Der eingesetzte Fachwissenstest ist in der Lage Lernzuwächse im Bereich der Mechanik abzubilden.
- 5.3 Das Aufgabenentwicklungsmodell des Fachwissenstests lässt sich in Form von latenten Variablen abbilden.

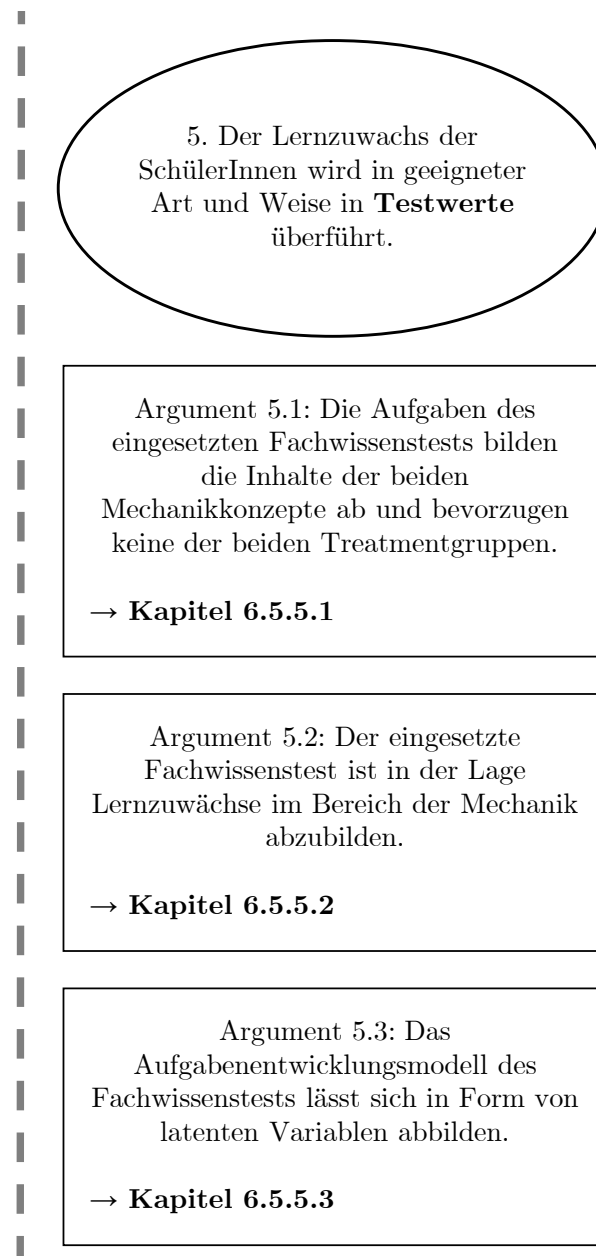


Abbildung 6.7: Übersetzungsschritt 5 mit den Argumenten zur Ebene der Testwerte

*Begründung von Argument 5.1:*

Um einen Lernzuwachs aufgrund der beiden verschiedenen Treatments valide messen zu können, muss der Fachwissenstest beide Mechanikkonzepte inhaltlich abdecken. Die Inhaltsvalidität ist Grundvoraussetzung dafür, dass die Effekte in den Testwerten auf das Treatment zurückgeführt werden können. Bei der Konstruktion des Fachwissenstests ist in Bezug auf die Einschränkungen aus der bisherigen Forschung darauf zu achten, dass durch den Fachwissenstest keine der beiden Treatmentgruppen bevorzugt wird. Nur wenn der Test für beide Gruppen gleichwertig gestellt ist, können Unterschiede in den Testwerten zwischen den beiden Treatmentgruppen auch auf die Lernwirksamkeit der Treatments und somit auf die Unterschiede in der Elementarisierung zurückgeführt werden.

### *Begründung von Argument 5.2:*

Auch wenn der Fachwissenstest nach Argument 5.1 inhaltssvalid konstruiert wurde, bleibt die Frage zu klären, ob dieser als Testinstrument in der Lage ist Lernzuwächse von SchülerInnen im Bereich der Mechanik abzubilden. Eine Möglichkeit der Validierung dieses Argument besteht in der Pilotierung des Fachwissenstests unter den gleichen Feldbedingungen, in der später auch die eigentliche Studie durchgeführt wird.

### *Begründung von Argument 5.3:*

Für die Konstruktion des Fachwissenstests wurde ein Aufgabenentwicklungsmodell aufgestellt, welches ermöglicht die Aufgaben anhand von fachlichen Konzepten und anhand von spezifischen Merkmalen bezogen auf die beiden Elementarisierungen der Mechanik zu kategorisieren. Das Argument bezieht sich nun darauf, dass diese durch die von der Konstruktion vorgegebene Struktur des Fachwissenstests sich auch in Form von latenten Variablen in den Antworten der SchülerInnen wiederfinden lässt. Dies träge zur Validität des Messinstruments bei, da der Fachwissenstest dann in der Lage wäre, das umfassende und komplexe Konstrukt Mechanikwissen differenzierter in einzelne Kategorien abzubilden. In diesem Fall wäre auch eine differenzierte Auswertung des Fachwissenstests auf den einzelnen latenten Konstrukten möglich.

## **Übersicht über die Folge an Übersetzungsschritten**

In Abbildung 6.8 ist abschließend die Gesamtübersicht der Übersetzungsschritte abgebildet. Dazu sind von links nach rechts in der Reihenfolge von der Zielebene bis hin zu den Testwerten die einzelnen Übersetzungsschritte zwischen den Ebenen mit den übergeordneten Aussagen und den damit verbunden Argumenten dargestellt. Für jedes Argument (mit Ausnahme von 4.1) kann der Abbildung entnommen werden, in welchem der folgenden Kapitel diese diskutiert werden. Nach Prüfung aller Argumente kann abschließend eine Aussage darüber getroffen werden, inwiefern die Testwerte in Bezug auf die Zielsetzung der Studie valide interpretierbar sind und wo es zu Einschränkungen kommt.

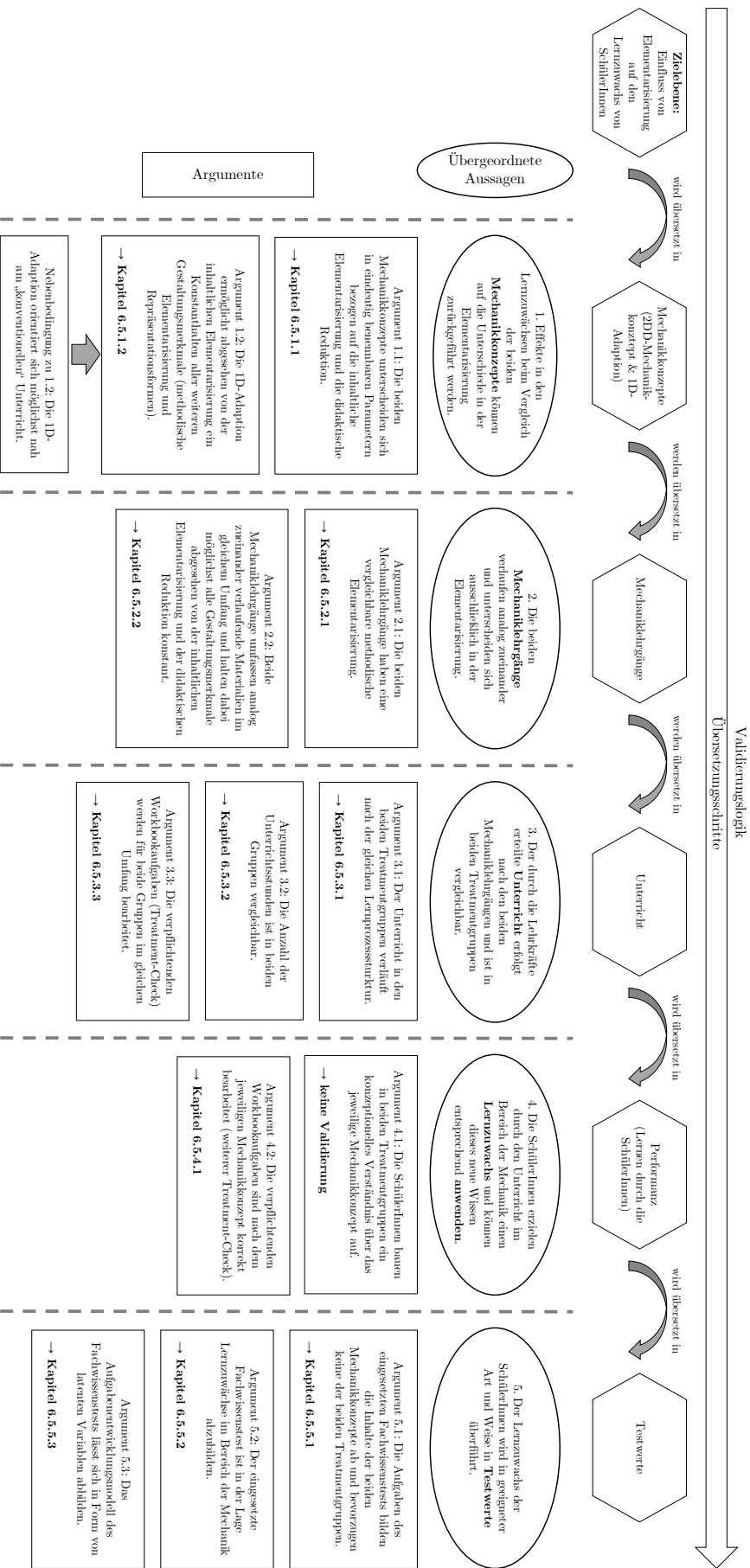


Abbildung 6.8: Übersicht der Validierungslogik (vgl. der Darstellung Dickmann, 2016, S. 75)

## 6.5 Diskussion der Übersetzungsschritte aus der Validierungslogik

### 6.5.1 Diskussion der Argumente zur Ebene der Mechanikkonzepte

In diesem Abschnitt werden die zuvor aufgestellten Argumente zur Ebene der Mechanikkonzepte theoretisch diskutiert.

#### 6.5.1.1 Modell zu Elementarisierungen der Mechanik (Argument 1.1)

Für Argument 1.1 ist zu zeigen, dass die beiden Elementarisierungen des 2DD-Mechanikkonzept und der 1D-Adaption sich in eindeutig benennbaren Parametern bezüglich der inhaltlichen Elementarisierung und der didaktischen Reduktion voneinander unterscheiden lassen. In Seiter (2018) wurde zu diesem Zweck ein Modell für den Überblick über verschiedene Möglichkeiten der Elementarisierung der Mechanik entwickelt. Hierzu wurden die Elementarisierungen des 2DD-Mechanikkonzepts und die des „konventionellen“ Mechanikunterrichts<sup>16</sup> gegenübergestellt, um aus den Unterschieden anschließend einzelne Parameter zu erarbeiten. Diese Parameter wurden schließlich durch verschiedene Zwischenschritte weiter ausdifferenziert, indem mit Hilfe der Zwischenschritte ein Übergang von der Elementarisierung des 2DD-Mechanikkonzepts hin zum „konventionellen“ Mechanikunterricht geschaffen wurde. Die Parameter wurden anschließend als sogenannte „Schiebereglern“ dargestellt, auf denen die entsprechende Elementarisierung eingestellt werden kann. Eine leicht angepasste Version des Modells aus Seiter (2018) ist in Abbildung 6.9 gezeigt. Auf der linken Seite in Abbildung 6.9 ist immer das 2DD-Mechanikkonzept und auf der rechten Seite der „konventionelle“ Mechanikunterricht abgebildet. In der Mitte befinden sich die soeben benannten Zwischenschritte.

Das Modell klassifiziert Elementarisierungen anhand der folgenden sieben Parameter:

1. Dimension
2. Darstellungsform
3. Elementarisierung der Geschwindigkeit
4. Elementarisierung der Beschleunigung bzw. der Zusatzgeschwindigkeit
5. Art der Einwirkung (in der Kinematik)
6. Elementarisierung der Kraft
7. Elementarisierung der Newton'schen Bewegungsgleichung

---

<sup>16</sup>Die Elementarisierung des „konventionellen“ Mechanikunterrichts basiert auf einer in Seiter (2018) durchgeführten Analyse der beiden Schulbücher *Universum Physik 2 Nordrhein-Westfalen* (Alboreanu-Schirner et al., 2016) und *Impulse Physik 2 Nordrhein-Westfalen G8* (Feldmann et al., 2009).

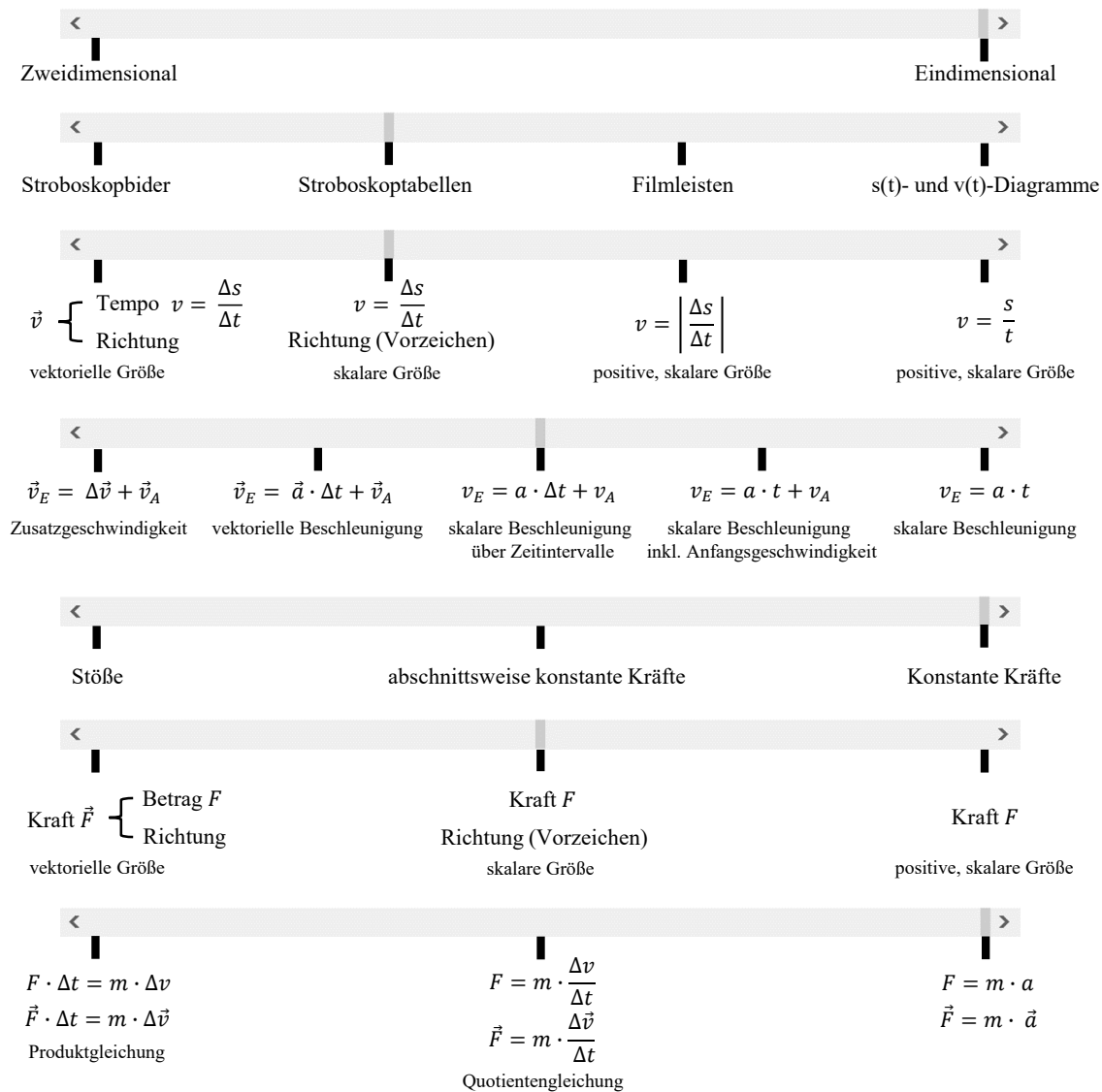


Abbildung 6.9: Modell zu Elementarisierungen der Mechanik (vgl. Seiter, 2018, S. 40)

Theoretisch wären somit beliebige Kombinationen aus den sieben Parametern als Elementarisierungen der Mechanik möglich, allerdings sind die Parameter teilweise voneinander abhängig, so dass nicht immer alle Schritte eines Parameters gewählt werden können. Eine ausführliche Diskussion der Abhängigkeiten findet sich in Seiter (2018). Es wurde in Seiter (2018) auch versucht ein Modell aufzustellen, welches zusätzlich zu den Parametern auch die Abhängigkeiten zwischen diesen darstellen kann. Aufgrund der Komplexität wird in dieser Arbeit auf die Darstellung der Abhängigkeiten verzichtet und auf Seiter (2018) verwiesen. Die Abhängigkeiten der Parameter werden lediglich ausschnittsweise bei der Elementarisierung der 1D-Adaption diskutiert. Im Folgenden wird, aufbauend auf diesem Modell, die Elementarisierung der 1D-Adaption herausgearbeitet, indem die Zwischenschritte der einzelnen Parameter ausgewählt werden, die möglichst nah an der

des „konventionellen“ Mechanikunterrichts liegen aber trotzdem ein Konstanthalten der methodischen Elementarisierung und der Repräsentationsformen ermöglichen.

### 6.5.1.2 Elementarisierung der 1D-Adaption (Argument 1.2)

Die Diskussion von Argument 1.2 impliziert die Vorstellung der 1D-Adaption, welche sich in der Elementarisierung vom 2DD-Mechanikkonzept unterscheidet, aber ein Konstanthalten der weiteren Gestaltungsmerkmale (methodischen Elementarisierung und der Repräsentationsformen) vom 2DD-Mechaniklehrgangs ermöglicht. Es soll zusätzlich anhand der Nebenbedingung eine Elementarisierung gewählt werden, welche möglichst nah an der des „konventionellen“ Mechanikunterrichts liegt, aber dennoch die obige Bedingung erfüllt. Die Diskussion der Elementarisierung der 1D-Adaption kann auch anhand des zuvor vorgestellten Modells (siehe Abb. 6.9) nachvollzogen werden.

### Darstellung und Beschreibung von Bewegung

Wie die Bezeichnung schon sagt, werden in der 1D-Adaption ausschließlich eindimensionale Bewegungen betrachtet beziehungsweise alle Größen der Kinematik anhand von eindimensionalen Bewegungen eingeführt. Zur Darstellung von Bewegungen werden auch in der 1D-Adaption Stroboskopbilder verwendet, da  $s(t)$ -,  $v(t)$ - und  $a(t)$ -Diagramme nicht zur Darstellung von ikonischen Repräsentationen, wie zum Beispiel Vektorpfeilen, geeignet sind. Es ist zum Beispiel nicht möglich Richtungsinformationen abzubilden. Außerdem kann so eine Strukturgleichheit zum 2DD-Mechanikkonzept bezogen auf die methodische Elementarisierung hergestellt werden, indem im Laufe des Mechaniklehrgangs die Stroboskopbilder als Repräsentationsform kontinuierlich erweitert werden. Da allerdings im weiteren Verlauf auch Pfeile für die Geschwindigkeitsänderungen konstruiert beziehungsweise auch Beschleunigungspfeile gezeichnet werden sollen, wird die Darstellung aller dieser Pfeile zusammen in einer Dimension zunehmend unübersichtlich. Aus diesem Grund wird die Repräsentationsform auf sogenannte Stroboskoptabellen erweitert. In Abbildung 6.10 ist exemplarisch ein Beispiel für eine Stroboskoptabelle gezeigt.

Die Stroboskoptabelle besteht aus mehreren Zeilen, in denen jeweils eine andere Größe dargestellt wird. Die erste Zeile enthält das eigentliche Stroboskopbild, in das analog zum 2DD-Mechanikkonzept Geschwindigkeitspfeile (in rot) eingezeichnet werden können. Als Zusatzinformationen werden hier noch für jedes Bild die vergangene Zeit  $t$  seit dem Beginn der Bewegung sowie die entsprechenden Werte mit Vorzeichen (mehr zur Elementarisierung der anderen Größen in den folgenden Abschnitten) unter den Pfeilen angegeben. Die Pfeile für die Geschwindigkeitsänderung und die Beschleunigung werden anschließend in die weiteren Zeilen unter dem eigentlichem Stroboskopbild eingezeichnet, wobei die Geschwindigkeitsänderung zur Abgrenzung als gestrichelter (ebenfalls in Rot, da die Einheit die einer Geschwindigkeit ist) und die Beschleunigung wegen der anderen Einheit als blauer Pfeil gezeichnet wird.

Im direkten Vergleich zu Stroboskopbildern erscheint zunächst die Repräsentationsform

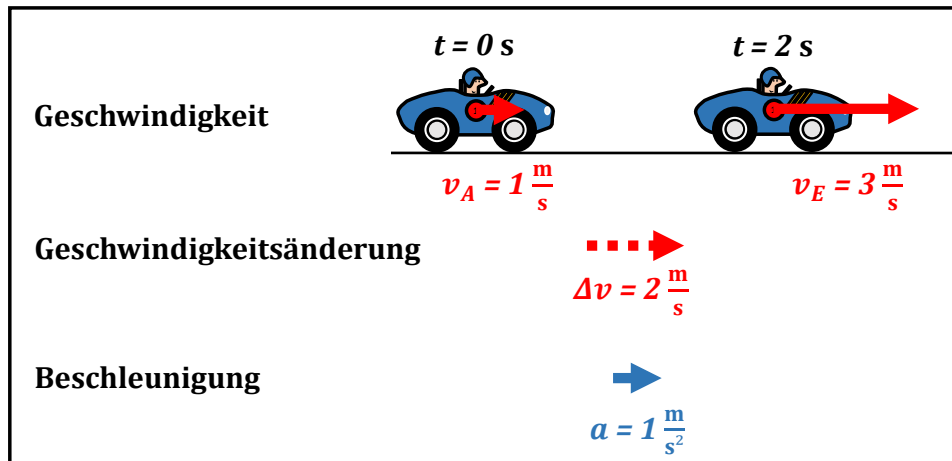


Abbildung 6.10: Beispiel einer Stroboskoptabelle

von Bewegungen mit Hilfe von Stroboskoptabellen komplexer zu sein. Stellt man sich allerdings ein eindimensionales Stroboskopbild vor, in das zusätzlich zu den Geschwindigkeitspfeilen noch die Pfeile für die Geschwindigkeitsänderung und Beschleunigungspfeile eingezeichnet werden sollen, wird die Darstellung durch die Menge der Pfeile zunehmend unübersichtlich, gerade weil diese sich an vielen Stellen überlagern würden und es sich zusätzlich um Pfeile mit zwei verschiedenen Einheiten (Geschwindigkeit und Beschleunigung) handelt. Auch die Pfeilkonstruktion für die Geschwindigkeitsänderung ist im eindimensionalen Fall wesentlich komplexer, da stets alle Pfeile auf einer Linie liegen und sich nicht wie im 2DD-Mechanikkonzept über zwei Dimensionen verteilen. Daher ist es einfacher die einzelnen Größen in verschiedenen Zeilen in einer Stroboskoptabelle darzustellen. Durch diese Veränderung der Repräsentationsform ergeben sich Einschränkungen bezogen auf die Vergleichbarkeit der beiden Elementarisierungen. Da aber beide Repräsentationsform gerichtete Größen als Pfeile visualisieren, wird die Einschränkung nicht als gravierend angenommen.

## Geschwindigkeit

Um die Definition der Geschwindigkeit möglichst nah an der des „konventionellen“ Mechanikunterrichts zu halten, wird diese als skalare Größe eingeführt. Wie dem Modell (Abb. 6.9) entnommen werden kann, gibt es verschiedene Möglichkeiten die Geschwindigkeit als skalare Größe zu definieren. Die Reduktion auf eine positive skalare Größe ist allerdings nicht ausreichend. Aufgrund der Vergleichbarkeit in der Repräsentationsform muss die Möglichkeit bestehen, die Geschwindigkeit mit Hilfe von Pfeilen darzustellen. Dazu bedarf es einer Richtungsinformation, welche bei einer skalaren Größe aus dem Vorzeichen entnommen werden kann, indem eine positive Richtung (z.B. Richtung der

positiven  $x$ -Achse) für die Berechnung der zurückgelegten Strecke  $\Delta s$  festgelegt wird. Die Geschwindigkeit wird also definiert als:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (6.1)$$

Damit kann die Geschwindigkeit analog zum 2DD-Mechanikkonzept als Pfeil dargestellt werden, wobei die Länge den Betrag und das Vorzeichen die Richtung der Geschwindigkeit repräsentiert. Ein positives Vorzeichen der Geschwindigkeit bedeutet in diesem Fall, dass der Körper sich nach rechts (oder in die Richtung der festgelegten positiven Achse) bewegt und entsprechend auch der Geschwindigkeitspfeil nach rechts zeigt, analoges gilt für ein negatives Vorzeichen. So hat zum Beispiel ein Auto, welches sich in negative  $x$ -Richtung bewegt, auch eine negative Geschwindigkeit, obwohl dieses sich aus der Sicht des Fahrers dennoch vorwärts bewegt. Es muss daher bei dieser Form der Elementarisierung zwischen einer möglichen Orientierung des Körpers und der eigentlichen Bewegungsrichtung unterschieden werden. Die Konstruktion und das Einzeichnen von Geschwindigkeitspfeilen ergibt sich analog zum 2DD-Mechanikkonzept mit dem Unterschied, dass in diesem Fall zusätzlich die Geschwindigkeit unterhalb des Pfeils als Zahlenwert aufgeführt wird.

Im 2DD-Mechanikkonzept wird mit Bezug auf Hermann (2002) nicht zwischen Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeiten unterschieden (siehe Wilhelm, 2018). Aufgrund dessen kann es aber zu Unstimmigkeiten in den Darstellungen kommen, wenn zuvor noch Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile zwischen zwei Bilder im Stroboskopbild gezeichnet wurden und im nächsten Schritt diese als Momentangeschwindigkeitspfeile direkt im Schwerpunkt des Körpers beginnen. Aus diesem Grund wird in der 1D-Adaption zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeiten unterschieden, wobei lediglich der Unterschied zwischen beiden Größen betont wird. Auf eine aufwendige Herleitung oder Infinitesimalrechnung wird verzichtet.

### **Geschwindigkeitsänderung und Beschleunigung**

Aufgrund der Strukturgleichheit zwischen den beiden Elementarisierungen wird die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  als eigenständige Größe und als Zwischenschritt zur Beschleunigung eingeführt. Der Begriff Geschwindigkeitsänderungen wurde in Anlehnung an den „konventionellen“ Unterricht gewählt, um diesem vom Begriff der Zusatzgeschwindigkeit aus dem 2DD-Mechanikkonzept zu differenzieren. Die Konstruktion für die Pfeile der Geschwindigkeitsänderung aus den gegebenen Geschwindigkeitspfeilen ergibt sich analog zum 2DD-Mechanikkonzept. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Geschwindigkeitsänderung durch einfache Addition oder Subtraktion der Geschwindigkeitsbeträge zu berechnen. Durch das Vorzeichen der Geschwindigkeitsänderung ergibt sich auch hier wieder die Richtungsinformation für die Darstellung des Pfeils, der Betrag entspricht wiederum der Länge. Die Geschwindigkeitsänderung wird in der Stroboskoptabelle in eine separate Zeile gezeichnet, und zwar immer mittig zwischen die beiden Punkte, zwischen denen die Geschwindigkeitsänderung berechnet wurde. Zur Abgrenzung von den Geschwindigkeitspfeilen wird diese als gestrichelter Pfeil dargestellt.

Der Beschleunigungsbegriff wird schließlich aus der Geschwindigkeitsänderung erarbeitet. Auch hier gibt es theoretisch verschiedene Möglichkeiten diese zu elementarisieren, weil aber schon die Geschwindigkeit als skalare Größe über Zeitintervalle  $\Delta t$  eingeführt wurde, muss dies auch für Beschleunigung gelten. Es wurde sich dazu entschieden, die Beschleunigung in Form einer Produktgleichung einzuführen:

$$\Delta v = a \cdot \Delta t \quad (6.2)$$

Dadurch hat man zum einen die Anlehnung an die Produktform der Newton'schen Bewegungsgleichung aus dem 2DD-Mechanikkonzept, in der auch bewusst nicht die Quotientenform gewählt wurde, auf der anderen Seite wird so direkt die Proportionalität zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der Beschleunigung deutlich. Wie alle anderen Größen der Kinematik kann auch die Beschleunigung in einer neuen Zeile der Stroboskoptabelle über einen Pfeil dargestellt werden, wobei sich die Richtung des Beschleunigungspfeil unmittelbar aus der Richtung des Pfeils der Geschwindigkeitsänderung ergibt.

### Kraft und Newton'sche Bewegungsgleichung

Bei der 1D-Adaption handelt es sich wie auch beim 2DD-Mechanikkonzept um einen dynamischen Zugang zum Kraftkonzept, das heißt die Kraft wird über Bewegungsänderungen eingeführt. Der Fall der Verformung anhand von statischen Situation bildet bewusst einen Spezialfall, der in dieser Arbeit auch nicht betrachtet wird. Daher ist es nicht nur aus Gründen der Strukturgleichheit notwendig, die Newton'sche Bewegungsgleichung einzuführen, sondern auch um so auch eine Verbindung zwischen den Größen der Kinematik und den Größen der Dynamik herzustellen.

Die Kraft wird, wie auch schon die Geschwindigkeit und die Beschleunigung, als skalare Größe eingeführt, wobei die Information über die Richtung der Kraft wieder auf das Vorzeichen zurückgeführt werden kann<sup>17</sup>.

In der 1D-Adaption werden im Sinne des „konventionellen“ Mechanikunterrichts Vorgänge mit konstanten oder abschnittsweise konstanten Kräften und keine Kraftstöße wie im 2DD-Mechanikkonzept betrachtet. Der Struktur des 2DD-Mechanikkonzepts folgend wird zunächst die Kraft als Einflussfaktor auf die Beschleunigung behandelt und im zweiten Schritt die Masse als weiterer Faktor. Die Newton'sche Bewegungsgleichung wird anschließend in ihrer klassischen Form eingeführt:

$$F = m \cdot a \quad (6.3)$$

<sup>17</sup>In den Schulbüchern (Alboreanu-Schirner et al., 2016; Feldmann et al., 2009) wird die Kraft direkt als vektorielle Größe eingeführt und dann bei der Betrachtung der Gewichtskraft auf eine positive skalare Größe reduziert. Da in der Elementarisierung der 1D-Adaption aber bisher alle Größen als Skalare definiert wurden, wird auch die Kraft zunächst auf eine skalare Größe reduziert, um insbesondere die Newton'sche Bewegungsgleichung behandeln zu können. Im Sinne der Erweiterbarkeit der Elementarisierung stellt dies aber kein Problem dar, da die Kraft trotzdem als gerichtete Größe eingeführt wird und später auf eine vektorielle Größe verallgemeinert werden kann.

Diese Arbeit beschränkt sich bei der Dynamik auf die Behandlung der Newton'schen Bewegungsgleichung. Weitere Themen wie das Trägheits- und das Wechselwirkungsprinzip sowie Vorgänge mit mehreren wirkenden Kräften und insbesondere der statische Fall des Kräftegleichgewichts sind nicht mehr Teil dieser Arbeit. Es ist aber ohne Einschränkungen möglich diese Themen analog zum 2DD-Mechanikkonzept anhand der hier vorgenommenen Elementarisierung zu behandeln. Es folgt eine Übersicht über die drei vorgestellten Elementarisierungen, um hier nochmal die wesentlichen Unterschiede zwischen diesen sichtbar zu machen.

### 6.5.1.3 Zusammenfassung der Elementarisierungen

In der folgenden Tabelle 6.5 sind die Elementarisierungen für den „konventionellen“ Mechanikunterricht, das 2DD-Mechanikkonzept und die 1D-Adaption als Mittelweg zwischen diesen gegenübergestellt. Für eine farbliche Übersicht, welche Teile der Elementarisierung für die 1D-Adaptionen aus dem „konventionellen“ Mechanikunterricht und welche aus dem 2DD-Mechanikkurs entnommen wurden, wurden alle Elemente des „konventionellen“ Mechanikunterricht in rot und alle Elemente des 2DD-Mechanikkurs in grün dargestellt. Komplett gefärbte Felder in der 1D-Adaption entsprechen direkt einer der beiden anderen Elementarisierungen. Ist in dem Feld ein Farbübergang dargestellt, handelt es sich um einen Zwischenschritt in der Elementarisierung, welche in dieser Art und Weise keinem der anderen beiden entspricht. Zum Beispiel wird im „konventionellen“ Mechanikunterricht die Beschleunigung thematisiert im 2DD-Mechanikkurs allerdings nicht, stattdessen wird die Zusatzgeschwindigkeit behandelt. Die 1D-Adaption thematisiert beides und stellt somit einen Übergang zwischen beiden Elementarisierungen dar.

Es folgt die Diskussion der Ebene der Mechaniklehrgänge. Als Erinnerung zur begrifflichen Abgrenzung von Mechanikkonzepten und Mechaniklehrgängen sei hier nochmals erwähnt, dass der Begriff Mechanikkonzepte die Elementarisierung bezeichnet und diese durch die Ausformulierung in Materialien in Mechaniklehrgänge übersetzt wird.

Tabelle 6.5: Gegenüberstellung der Elementarisierung (vgl. Seiter et al., 2021a, S. 7)

| „Konventioneller“<br>Mechanikunterricht                                                                                                                | 1D-Adaption                                                                                                                                                                                                | Zweidimensional-dynamisches<br>Mechanikkonzept                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alle Größen werden zuerst an eindimensionalen Bewegungen eingeführt. Später wird das evtl. kurz auf zweidimensionale Bewegungen erweitert.             | Alle Größen werden an eindimensionalen Bewegungen eingeführt.                                                                                                                                              | Alle Größen werden zuerst an zweidimensionalen Bewegungen eingeführt. Später wird das auf eindimensionale Bewegungen reduziert.                                          |
| Die erste verwendete Größe ist der Weg $s$ (teilweise unklar definiert).                                                                               | Die erste verwendete Größe ist der Ort.                                                                                                                                                                    | Die erste verwendete Größe ist der Ort.                                                                                                                                  |
| Wie man Bewegungen erfasst, wird nicht thematisiert oder es wird nur der zurückgelegte Weg thematisiert.                                               | Es wird thematisiert, dass zur Erfassung einer Bewegung zu bestimmten Zeiten der Ort festgehalten werden muss.                                                                                             | Es wird thematisiert, dass zur Erfassung einer Bewegung zu bestimmten Zeiten der Ort festgehalten werden muss.                                                           |
| Darstellung durch $s(t)$ -, $v(t)$ - und $a(t)$ -Diagramme                                                                                             | Darstellung von Bewegung in Stroboskoptabellen                                                                                                                                                             | Darstellung von Bewegungen in Stroboskopbildern                                                                                                                          |
| Keine Thematisierung der Richtung                                                                                                                      | Thematisierung der Richtung                                                                                                                                                                                | Thematisierung der Richtung                                                                                                                                              |
| Geschwindigkeit als positive skalare Größe<br>$v = \frac{s}{t}$ bzw. $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$                                                   | Geschwindigkeit als skalare Größe<br>$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$                                                                                                                                       | Geschwindigkeit $\vec{v}$ als vektorielle Größe<br>Tempo $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$                                                                                 |
| Ergebnisse werden mit Zahlen oder Diagrammen angegeben.                                                                                                | Geschwindigkeiten werden mit Geschwindigkeitspfeilen dargestellt.                                                                                                                                          | Geschwindigkeiten werden mit Geschwindigkeitspfeilen dargestellt.                                                                                                        |
| Unterscheidung zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit                                                                                     | Unterscheidung zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit                                                                                                                                         | Keine Unterscheidung zwischen Durchschnitts- und Momentangeschwindigkeit                                                                                                 |
| Thematisierung der Beschleunigung<br>$a = \frac{v}{t}$ bzw. $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$                                                            | Thematisierung der Beschleunigung, Einführung der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v$<br>$\Delta v = a \cdot \Delta t$                                                                                     | Keine Thematisierung der Beschleunigung, Einführung der Zusatzgeschwindigkeit $\Delta \vec{v}$<br>$\vec{v}_E = \Delta \vec{v} + \vec{v}_A$                               |
| Die Beschleunigung wird anhand einer schnellerwerdenden geradlinigen Bewegung mit konstanter Beschleunigung eingeführt.                                | Die Geschwindigkeitsänderung sowie die Beschleunigung werden bei konstanten Einwirkungen eingeführt.                                                                                                       | Die Zusatzgeschwindigkeit wird anhand eines senkrechten Stoßes eingeführt.                                                                                               |
| Bei der Einführung der „Kraft“ wird an Alltagserfahrungen angeknüpft (z.B. Muskelkraft). Das Wort „Kraft“ fällt frühzeitig.                            | Bei der Einführung der „Kraft“ wird bewusst nicht an Alltagserfahrungen angeknüpft und anfangs nur von Einwirkung gesprochen. Das Wort „Kraft“ wird erst spät verwendet.                                   | Bei der Einführung der „Kraft“ wird bewusst nicht an Alltagserfahrungen angeknüpft und anfangs nur von Einwirkung gesprochen. Das Wort "Kraft" wird erst spät verwendet. |
| Bei der Einführung der „Kraft“ werden Situationen mit konstanter Kraft verwendet (und Bewegung aus der Ruhe heraus).                                   | Bei der Einführung der „Kraft“ werden Situationen mit konstanter oder abschnittsweise konstanter Kraft verwendet (Bewegung aus der Ruhe heraus, mit Anfangsgeschwindigkeit).                               | Bei der Einführung der "Kraft" wird ein kurzer Kraftstoß senkrecht zur Bewegungsrichtung verwendet.                                                                      |
| „Kraft“ wird anhand von dynamischen und statischen Situationen eingeführt, d.h. die Verformung wird als Wirkung einer Kraft vorgestellt und behandelt. | „Kraft“ wird nur anhand von dynamischen Vorgängen eingeführt; die Verformung wird nicht behandelt.                                                                                                         | „Kraft“ wird nur anhand von dynamischen Vorgängen eingeführt.                                                                                                            |
| Zweites Newton'sches Axiom (meist erst in den höheren Jahrgangsstufen):<br>$F = m \cdot a$<br>(Differentielle Form für Zeitpunkte)                     | Zweites Newton'sches Axiom:<br>$F = m \cdot a$<br>Nicht für Zeitpunkte, sondern für Intervalle, also Durchschnittsbeschleunigung (entspricht bei konstanten Kräften aber genau der Momentanbeschleunigung) | Zweites Newton'sches Axiom:<br>$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$<br>(Integrale Form für Zeitintervalle)                                                  |

## 6.5.2 Diskussion der Argumente zur Ebene der Mechaniklehrgänge

In diesem Abschnitt werden die Argumente zur Ebene der Mechaniklehrgänge diskutiert. Dies umfasst an dieser Stelle insbesondere auch die Vorstellung der in der Studie bereitgestellten Materialien.

### 6.5.2.1 Themenstruktur der Mechaniklehrgänge (Argument 2.1)

Für Argument 2.1 ist zu zeigen, dass die beiden Mechaniklehrgänge eine vergleichbare methodische Elementarisierung aufweisen. Die methodische Elementarisierung des 2DD-Mechaniklehrgangs orientiert sich in erster Linie an dem SchülerInnenheft *Einführung in die Mechanik* (Hopf et al., 2012), welche in einer früheren Auflage bereits in der Evaluationsstudie für die Sekundarstufe I (Tobias, 2010, S. 281ff) eingesetzt wurde. Die Abfolge der einzelnen Themen wurde bis auf das Entfernen des Sonderfalls zu eindimensionalen Bewegungen beibehalten. Dies hatte den Grund, dass in dieser Studie eine klare Trennung zwischen den Dimensionen der betrachteten Bewegung im 2DD-Mechanikkonzept und in der 1D-Adaption erzeugt werden soll. In Tabelle 6.6 sind die einzelnen Themen zusammen mit der geplanten Unterrichtszeit gegenübergestellt. Bis einschließlich zum Kapitel der Zusatzgeschwindigkeit (bzw. Geschwindigkeitsänderung in der 1D-Adaption) laufen beide Mechanikkonzept komplett analog ab. Die Unterschiede beziehen sich in erster Linie auf die verschiedenen Dimensionen der Bewegungen und auf die inhaltliche Elementarisierung der Begrifflichkeiten in der Kinematik verbunden mit den entsprechenden Repräsentationsformen. Ansonsten konnten sämtliche Inhalte, Beispiele, Aufgaben etc. analog konstruiert werden.

Diese Analogie musste beim Thema der Beschleunigung in der 1D-Adaption allerdings aufgehoben werden, da der Beschleunigungsbegriff nicht Teil des 2DD-Mechanikkonzepts ist. Die Mechaniklehrgänge laufen daher ab diesem Punkt auseinander. Die Unterrichtszeit für die Thematisierung der Beschleunigung wird im 2DD-Mechaniklehrgang teilweise durch die Einführung der Einwirkungsdauer kompensiert, da diese hingegen in der 1D-Adaption nicht behandelt wird. Diese ist implizit durch die Quotientenbildung bereits in der Beschleunigung enthalten. Die Unterrichtszeit für die Behandlung der Beschleunigung umfasst allerdings mehr Zeit als durch die Thematisierung der Einwirkungsdauer kompensiert wird. Dies wird dadurch ausgeglichen, dass für die Einführung des Kraftbegriffs im 2DD-Mechaniklehrgang mehr Unterrichtszeit verwendet wurde. Der Kraftbegriff setzt sich zwar in beiden Konzepten aus der Einwirkungsstärke und der Einwirkungsrichtung zusammen, wobei die Thematisierung der Einwirkungsrichtung im 2DD-Mechaniklehrgang ausführlicher gestaltet und zusätzlich noch das Superpositionsprinzip für die Unabhängigkeit von zwei Bewegungen behandelt wurde. Durch die Einschränkung der Dimension, war diese Ausführlichkeit im Lehrgang der 1D-Adaption nicht notwendig.

Tabelle 6.6: Gegenüberstellung der Struktur für beide Mechanikkonzepte

| 2DD-Mechanikkonzept                                            |                            | 1D-Adaption                                                      |                            |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Thema                                                          | Länge der Einheit          | Thema                                                            | Länge der Einheit          |
| Darstellung und Beschreibung von Bewegungen (Stroboskopbilder) | 90 Minuten (2 UE)          | Darstellung und Beschreibung von Bewegungen (Stroboskoptabellen) | 90 Minuten (2 UE)          |
| Tempo                                                          | 90 Minuten (2 UE)          | Geschwindigkeit                                                  | 90 Minuten (2UE)           |
| Richtung                                                       | 45 Minuten (1 UE)          | Richtung                                                         | 45 Minuten (1 UE)          |
| Geschwindigkeit                                                | 45 Minuten (1 UE)          | Geschwindigkeitspfeile                                           | 45 Minuten (1 UE)          |
| Zusatzgeschwindigkeit                                          | 90 Minuten (2 UE)          | Geschwindigkeitsänderung                                         | 90 Minuten (2 UE)          |
| <b>Kraft</b>                                                   | <b>90 Minuten (2 UE)</b>   | <b>Beschleunigung</b>                                            | <b>90 Minuten (2 UE)</b>   |
| <b>Einwirkungsdauer</b>                                        | <b>45 Minuten (1 UE)</b>   | <b>Kraft</b>                                                     | <b>45 Minuten (1 UE)</b>   |
| Masse                                                          | 45 Minuten (1 UE)          | Masse                                                            | 45 Minuten (1 UE)          |
| Newton'sche Bewegungsgleichung                                 | 90 Minuten (2 UE)          | Newton'sche Bewegungsgleichung                                   | 90 Minuten (2 UE)          |
| Gesamt                                                         | <b>630 Minuten (14 UE)</b> | Gesamt                                                           | <b>630 Minuten (14 UE)</b> |

Ab dem Kapitel der Masse laufen beide Mechaniklehrgänge wieder analog zueinander ab. Abgesehen von dem Bruch aufgrund des Beschleunigungsbegriff beziehungsweise aufgrund der Einwirkungsdauer und der ausführlicheren Behandlung der Kraftbegriffs entstehen so zwei analog verlaufende Mechaniklehrgänge, welche insgesamt und in vielen Teilbereichen die gleiche Anzahl an Unterrichtseinheiten aufweisen.

### 6.5.2.2 Material der Mechaniklehrgänge (Argument 2.2)

Im Folgenden wird das lehrgangsbezogene Material beschrieben, welches den Lehrkräften für ihren Unterricht zur Verfügung gestellt wurde. Dabei handelte es sich im Detail um die SchülerInnenhefte, welche ähnlich zu einem Schulbuch aufgebaut waren, begleitende Workbooks mit Erarbeitungs- und Übungsaufgaben sowie um Simulationen. In den folgenden Kapiteln wird bei der Beschreibung insbesondere in Bezug zu Argument 2.2 auf die Analogien zwischen den Materialien eingegangen.

#### SchülerInnenhefte

Einer der Hauptkritikpunkte an den bisherigen Forschungsarbeiten war, dass immer nur für die Treatmentgruppen neu entwickeltes und auf die Studie abgestimmtes Material bereitgestellt wurde. Der Unterricht in den Kontrollgruppen wurde anhand von weniger aufbereitetem Material wie zum Beispiel von Schulbüchern erteilt. Aus diesem Grund wurden für beide Treatmentgruppen SchülerInnenhefte bereitgestellt, welche, gemäß der zuvor diskutierten Struktur der Mechaniklehrgänge, analog zueinander aufgebaut sind. Die SchülerInnenheften für das 2DD-Mechanikkonzept entsprechen einer leicht angepassten Version von *Einführung in die Mechanik* (Hopf et al., 2012), da es hierbei um ein etabliertes, bereits positiv evaluiertes Material handelt. Zum anderen schließt diese Forschungsarbeit somit an die Studie von Tobias (2010) an. In den SchülerInnenhefte war von den ursprünglichen Autoren eine einheitliche Art der Strukturierung angelegt, welche allerdings nicht in allen Kapiteln konsequent beibehalten wurde:

1. Aktivierung von Vorwissen
2. Vorstellung des neuen Konzepts (roter Kasten)
3. Beispiele zum neuen Konzept
4. Übungsaufgaben zum neuen Konzept, welche teilweise direkt an die Beispiele anknüpfen
5. ggf. Vernetzungs- oder Transferaufgaben

Diese Struktur wurde für die vorliegende Studie übernommen. Die vorgenommenen Anpassungen des Material sind in erster Linie in der Herstellung dieser gleichbleibenden Struktur für beide Mechaniklehrgänge begründet, aber auch darin, dass beide Lehrgänge analog zueinander bezogen auf Versuche und Beispiele verlaufen konnten. Es wurden aber auch inhaltliche Änderungen vorgenommen. Alle vorgenommenen Änderungen im

Vergleich zur aktuellsten Version der SchülerInnenhefte von Hopf et al. (2012) sind im Folgenden aufgeführt:

- Der erste Versuch zum Kapitel „Wie schnell? Wohin?“ (Hopf et al., 2012, S. 3) wurde entfernt, da kein analoger Versuch für die 1D-Adaption möglich war.
- Die Aufgaben zu den Kapiteln „Tempo“ und „Richtung“ waren ursprünglich erst nach dem Kapitel zur Richtung in einem Block gestellt worden (Hopf et al., 2012, S. 6f). Die Aufgaben zum Tempo wurden vorgezogen, um eine gleichbleibende methodische Elementarisierung innerhalb der einzelnen Kapitel zu ermöglichen.
- Im ursprünglichen Material wurden die Begriffe der Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit nicht voneinander getrennt, da dieses mit Verweis auf Hermann (2002) an dieser Stelle nicht notwendig sei (Wilhelm, 2018, S. 15ff). Betrachtet man allerdings die Geschwindigkeit in den Stroboskopbildern, fällt der Unterschied zwischen den beiden Größen in der Darstellung auf. Die Durchschnittsgeschwindigkeit wird stets zwischen zwei Bilder gezeichnet, der Pfeil der Momentangeschwindigkeit beginnt allerdings immer im Schwerpunkt des Körpers und ist auch immer nur für eine einzelne Aufnahme im Stroboskopbild definiert. Im Kapitel „Geschwindigkeit“ wird erklärt, wie (Durchschnitts-)Geschwindigkeitspfeile in Stroboskopbildern konstruiert werden können, gezeichnet werden allerdings ab diesem Punkt nur Momentangeschwindigkeiten (Hopf et al., 2012, S. 8). Um dieser Vermischung vorzubeugen, da es unter anderem auch zu Lernschwierigkeiten bei SchülerInnen durch die inkonsequente Darstellung kommen kann, wird im SchülerInnenheft dieser Studie konsequent zwischen der Durchschnitts- und der Momentangeschwindigkeit unterschieden. Hiermit wird die ursprüngliche Unterscheidung von Jung et al. (1977) und Wodzinski & Wiesner (1994a) wieder aufgegriffen. Zusätzlich wurde ein Beispiel eingefügt, in dem der Übergang zwischen den beiden Größen auf einer qualitativen Ebene thematisiert wird. Auf eine ausführliche Behandlung zum Beispiel durch Infinitesimalrechnung wird im Anbetracht der Klassenstufe verzichtet. Ziel war es nur den Unterschied gerade in Bezug auf die Darstellung herauszustellen.
- Die Beispiele zu Kreisbewegungen (Hopf et al., 2012, S. 9) wurden aus dem Material entfernt, da es keine vergleichbaren Beispiele im Eindimensionalen gibt.
- Versuch 3 aus dem Kapitel zur „Zusatzgeschwindigkeit“ wurde entfernt, da kein analoger Versuch für die 1D-Adaption existiert. Der Versuch thematisiert das Superpositionsprinzip (Hopf et al., 2012, S. 11), welches aber in den Workbookaufgaben zum Kraftbegriff enthalten ist.
- Versuch 4 aus dem Kapitel zur „Zusatzgeschwindigkeit“ wurde entfernt (Hopf et al., 2012, S. 13). Auch hier existiert kein analoger Versuch für die 1D-Adaption. Es ging um die Vorhersage der Richtung der Endgeschwindigkeit nach einem Stoß. Der Versuch ist aber implizit in den Workbookaufgaben zum Kraftbegriff enthalten.
- Das Kapitel „Sonderfall: Eindimensionale Bewegungen“ (Hopf et al., 2012, S. 15) wurde entfernt, um eine klare Trennung zwischen den Dimensionen der betrachte-

ten Bewegungen zwischen den beiden Mechanikkonzepten zu ermöglichen. Teile des Kapitels finden sich hingegen im SchülerInnenheft zur 1D-Adaption wieder.

- Alle Kapitel im Anschluss an die Anwendung der Newton'schen Bewegungsgleichung (Hopf et al., 2012, S. 23ff) wurden entfernt, da diese nicht mehr Teil dieser Studie waren und das Inhaltsverzeichnis entsprechend angepasst.

In allen anderen Punkten stimmt der zur Verfügung gestellte SchülerInnenhefte, abgesehen von leichten Formatierungsänderungen, wie Seitenumbrüchen aufgrund der entfernten oder angepassten Inhalte, mit dem Text von *Einführung in die Mechanik* (Hopf et al., 2012) überein.

Die SchülerInnenhefte zur 1D-Adaption wurden analog zu denen für das 2DD-Mechanikkonzept auf Grundlage der zuvor vorgestellten Elementarisierung konstruiert. Beim Erstellen wurde darauf geachtet, das Layout für beide Mechaniklehrgänge möglichst identisch zu halten, so dass der Unterschied in den SchülerInnenhefte allein in der Elementarisierung bestand. Bei der Konstruktion konnte auf die vorbereitende Masterarbeit (Seiter, 2018) zurückgegriffen werden, weil hier bereits mehrere Varianten von analog verlaufenden Mechanikkonzepten mit verschiedenen Elementarisierungen entwickelt wurden.

Im Anhang C.1 sind die SchülerInnenhefte für beide Mechaniklehrgänge abgebildet. Für einen direkten Vergleich sind immer die entsprechenden analog aufgebauten Seiten des 2DD-Mechaniklehrgangs und der 1D-Adaption nebeneinander dargestellt (die untere bzw. die linke Seite entspricht immer der 1D-Adaption). Wird in der Darstellung eine leere Seite gezeigt, gibt es kein Analogon im anderen SchülerInnenheft. Die Lehrgänge laufen an dieser Stelle auseinander (wie z.B. beim Kapitel zur Beschleunigung).

### Workbooks

Ergänzend zu den oben beschriebenen SchülerInnenheften wurden für beide Mechaniklehrgänge Workbooks mit Erarbeitungs- und Übungsaufgaben bereitgestellt. Auch hier wurde versucht, das Layout für beide Konzepte möglichst identisch zu halten. Die Workbooks enthielten zum einen Aufgaben, die auch bereits in den SchülerInnenheften genannt wurden, mit ausreichend Platz zur direkten Bearbeitung. Zum anderen wurden weitere vertiefende Aufgaben entwickelt, in denen an die Beispiele aus den SchülerInnenheften angeknüpft wurde. Auch die Workbooks folgen in den einzelnen Kapiteln einer einheitlichen Struktur:

1. Jedes Kapitel beginnt mit einem kurzem Informationsteil, in dem nochmals die wesentlichen Aspekte der neuen Konzepte in dem entsprechenden Kapitel benannt werden.
2. Anschließend folgen Aufgaben, welche zunächst das Verständnis des neuen Konzepts ohne eine konkrete Anwendung überprüfen sollen.
3. Es folgen Erarbeitungs- und Übungsaufgaben, die in vielen Fällen einen direkten Bezug zu den Beispielen in den SchülerInnenhefte haben.

4. Ggf. werden vertiefende Vernetzungs- oder Transferaufgaben gestellt.
5. Am Ende jedes Kapitels ist Platz für eine Zusammenfassung der Inhalte durch die SchülerInnen in eigenen Worten.

Eine Besonderheit bei dieser Struktur bilden die Kapitel zum Kraftbegriff, da hier neue Aufgaben zu den bereitgestellten Simulationen entwickelt wurden, welchen eine Anleitung zur Bedienung der Simulation vorausgeht. In den bisherigen Materialien (Hopf et al., 2012) wurden zwar im SchülerInnenheft auf die Anwendung der Inhalte in einer Simulation verwiesen, es finden sich allerdings keine konkreten Aufgaben und Anleitungen hierzu. Da diese aber im Unterricht für die Nutzung der Simulationen erforderlich sind, sollte den Lehrkräften hier ein einheitliches Angebot gemacht werden, das auch für alle SchülerInnen die gleichen Voraussetzungen schafft. Dies wurde erneut im gleichem Umfang für beide Mechaniklehrgänge vorgenommen.

Der Einsatz der Workbooks verfolgte mehrere Ziele für die Studie. Durch das Materialangebot wurden die Lehrkräfte für die Planung und Vorbereitung ihres Unterrichts weiter entlastet, da die Aufgaben direkt im Workbook bearbeitet werden konnten. Zudem unterstützen die Workbooks die einheitliche Strukturierung der Mechaniklehrgänge, welche schon in den SchülerInnenheften angelegt wurde. Zusätzlich ist hierdurch auch innerhalb einer Treatmentgruppe klassenübergreifend ein einheitliches Unterrichtsangebot möglich. Durch das Erstellen der konkreten Anleitungen und Aufgaben zu den Simulationen wurde des Weiteren die Mediengleichheit zwischen den beiden Mechaniklehrgängen bestärkt. Die Workbooks wurden im Anschluss an die Unterrichtsreihen stichprobenartig anonym gesammelt, um einen Treatment-Check vornehmen zu können. So konnte überprüft werden in welchem Umfang die Materialien von den Lehrkräften eingesetzt beziehungsweise von SchülerInnen bearbeitet wurden. Außerdem konnte die Qualität der Schülerlösungen beurteilt werden. Zu diesem Zweck wurden in den Workbooks Pflichtaufgaben (fett gedruckt) ausgewiesen und die Lehrkräfte bei der LehrerInnenfortbildung darum gebeten, möglichst alle Pflichtaufgaben von den SchülerInnen bearbeiten zu lassen. Somit kann im Nachhinein überprüft werden, ob die Lehrkräfte sich an das zur Verfügung gestellte Material gehalten haben.

Auch die Workbooks sind im Anhang C.2 für beide Mechanikkonzepte abgebildet. Wie schon bei den SchülerInnenheften sind die analog aufgebauten Seiten immer nebeneinander dargestellt. Bei leeren Seiten existiert auch wieder kein Analogon zur gezeigten Seite im jeweils anderen Workbook.

## Simulationen

Um die Mediengleichheit für die zwei Mechaniklehrgänge herzustellen, wurden für beide Mechanikkonzepte Simulationen bereitgestellt. Für das 2DD-Mechanikkonzept existierte bereits eine entsprechende Simulation „Bewegung nach Kraftstoß“ (Rachel, o. D.). In Kapitel 4.2.2.2 wurde die Funktionsweise der Simulation mit Hinblick auf die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit erläutert. Für die 1D-Adaption musste daher ebenfalls eine Simulation mit ähnlichen Funktionen allerdings für eindimensionale

Bewegungen bei konstanten Krafteinwirkungen bereitgestellt werden. Zu diesem Zweck wurde die Phet-Simulation „Kräfte und Bewegung: Grundlagen“ (Podolefsky et al., o. D.) verwendet. Genauer wurde nur der Teil „Bewegung“ betrachtet, da Reibungskräfte noch nicht thematisiert werden sollten. Hier werden ausschließlich eindimensionale Bewegungen bei konstanten Krafteinwirkungen ohne Reibung behandelt. Des Weiteren kann, wie in der Simulation zum 2DD-Mechaniklehrgang, die Anfangsgeschwindigkeit vor der Einwirkung und die Masse des Körpers variiert werden.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Simulation muss an dieser Stelle allerdings genannt werden. In der Simulation zum 2DD-Mechaniklehrgang besteht die Möglichkeit, die verschiedenen Geschwindigkeitspfeile (Anfang-, End- und Zusatzgeschwindigkeit) mit Hilfe von ikonischen Repräsentationen darzustellen. Für die 1D-Adaption wird in der Simulation lediglich die Kraft durch einen Vektorpfeil mit Richtung und Betrag dargestellt. Die Geschwindigkeit kann lediglich als Betrag anhand eines Tachos abgelesen werden. Die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten in den Simulationen stellen daher eine Einschränkung bezogen auf die Analogie zwischen den beiden Mechaniklehrgängen dar.

### 6.5.3 Diskussion der Argumente zur Ebene des Unterricht

In diesem Abschnitt werden die Argumente zur Ebene des Unterrichts diskutiert. Zunächst werden noch auf einer theoretischen Ebene die zur Verfügung gestellten Unterrichtsverlaufspläne mit der angelegten Lernprozessesstruktur vorgestellt, anschließend folgt eine empirische Prüfung von Argument 3.2 zur Vergleichbarkeit der Unterrichtszeit und zum ersten Treatment-Check (Argument 3.3) anhand des Bearbeitungsstands der Workbooksaufgaben.

#### 6.5.3.1 Lernprozessesstruktur (Argument 3.1)

Alle Materialien (SchülerInnenhefte, Workbooks und Simulationen) werden durch Unterrichtsverlaufspläne gerahmt, in denen auf die einzelnen Abschnitte und Aufgaben verwiesen wird. Die Verlaufspläne hatten zum einen das Ziel, den Lehrkräften eine einheitliche Struktur für den Unterricht vorzugeben, welche wiederum für beide Mechaniklehrgänge analog verläuft, und zum anderen, die Verwendung des bereitgestellten Materials zu vereinheitlichen. Außerdem wurden die Lehrkräfte bei der Planung und Vorbereitung ihres Unterrichts durch die Verlaufspläne unterstützt. Hierbei handelte es sich aber nicht um eine feste Schritt für Schritt Vorlage für den Unterricht, sondern um eine didaktische Rahmung des Unterrichts bezogen auf die Lernprozessesstruktur. Für jedes Kapitel wurde damit begonnen die Lernziele der SchülerInnen in der entsprechenden Unterrichtseinheit zu benennen. Die anschließende Struktur für den Unterricht greift die bereits in den SchülerInnenheften und Workbooks angelegte Strukturierung auf und war wie folgt aufgebaut:

1. Entwicklung der Leitfrage(n) für die Unterrichtsstunde
2. Informationsteil zum neuen Konzept
3. Verarbeitung des neuen Konzepts
4. Übungsaufgaben zum neuen Konzept
5. Zusammenfassung durch SchülerInnen

Die Schritte 2 bis 4 konnten in einer Unterrichtseinheit auch mehrfach durchlaufen werden (z.B. Unterrichtseinheit 2: Geschwindigkeit). Die Reihenfolge dieser Schritte ist in den Verlaufsplänen durch dick gedruckte schwarze Kästchen (siehe Anhang C.3) gekennzeichnet und war den Lehrkräften als verpflichtend vorgegeben, was auch in der LehrerInnenfortbildung betont wurde. Innerhalb der dick gedruckten Kästchen blieb die Reihenfolge, in der Beispiele oder Aufgaben behandelt wurden, den Lehrkräften frei gestellt. In der letzten Spalte der Verlaufspläne wurde zum einen immer auf das übrige Material verwiesen, zum anderen wurden hier Vorschläge für Medien oder Sozialformen (Oberflächenstruktur) sowie Alternativvorschläge gemacht, welche allerdings nicht verpflichtend waren und lediglich ein Angebot für die Lehrkräfte darstellten (abgesehen von den Simulationen zum Kraftbegriff aus Kap. 6.5.2.2). Damit sollte den Lehrkräften die Freiheit ermöglicht werden, nach ihrem gewohnten Lehrstil zu unterrichten und sich nicht an strikte Vorgaben für den Unterricht halten zu müssen.

Die Verlaufspläne wurden wie schon alle anderen Materialien für beide Mechanikkonzepte analog entwickelt und sind im Anhang C.3 in der bereits beschriebene Art und Weise dargestellt.

### 6.5.3.2 Unterrichtszeit (Argument 3.2)

Die Anzahl der von den Lehrkräften unterrichteten Doppelstunden wurde zum Posttestzeitpunkt also zum Ende der geplanten Mechanikreihe erfasst. Wie bereits in Kapitel 6.1 erwähnt, können nur Aussagen über die Klassen gemacht werden, in denen der Unterricht in Präsenz zu Ende geführt wurde. Als Einheit für die Unterrichtszeit wurden Doppelstunden gewählt, da der Unterricht zum einen nach den Verlaufsplänen (siehe Kap. 6.5.3.1) in Doppelstunden-Einheiten geplant war und zum anderen die Mehrheit der Klassen in dieser Zeiteinheit unterrichtet wurde. Die Unterrichtszeit von Klassen, welche in Einzelstunden, 67.5 Minuten Stunden oder anderen Stunden-Modellen unterrichtet wurden, wurde entsprechend in Doppelstunden umgerechnet.

Aufgrund der geringen Stichprobengröße von  $n = 11$  (1D-Adaption) und  $n = 20$  Klassen (2DD-Mechanikkonzept) sowie der zusätzlichen Verletzung der Normalverteilung im Falle der 1D-Adaption, nachgewiesen durch einen hoch signifikant Shapiro-Wilk-Test ( $p < .01$ ), wurde der Unterschied in der Unterrichtszeit mit Hilfe eines non-parametrischen Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben untersucht. Die Anzahl der unterrichteten Doppelstunden betrug in der Treatmentgruppe der 1D-Adaption  $\mu = 9.45$  ( $\sigma = 1.35$ ,  $MIN = 8$ ,  $MAX = 11$ ) und in der des 2DD-Mechanikkonzepts  $\mu = 8.58$  ( $\sigma = 1.12$ ,  $MIN = 7$ ,  $MAX = 11$ ). Der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben wird

nicht signifikant ( $U = 71.50, p = .113$ ). Die Anzahl der Doppelstunden ist demnach zwischen den beiden Treatmentgruppen vergleichbar.

Argument 3.2 kann also für die in Präsenzunterricht zu Ende geführten Klassen als zutreffend und die Anzahl der unterrichteten Doppelstunden als vergleichbar angenommen werden.

### 6.5.3.3 Bearbeitungsumfang der Workbookaufgaben (Argument 3.3)

Für den Bearbeitungsumfang der Workbooks wurden erstens aufeinander aufbauende Teilaufgaben und zweitens Varianten der gleichen Aufgabestellung als eine Einheit festgelegt. Die Einheiten wurden so gewählt, weil der Bearbeitungsstand den Einsatz der Workbookmaterialien im Unterricht abbilden soll und nicht die bloße Quantität an bearbeiteten Aufgaben. Dies soll im Folgenden weiter begründet werden:

1. Wird bei aufeinander aufbauenden Aufgabenteilen der Erste nicht bearbeitet, gilt dies automatisch auch für alle weiteren Folgeteile. Eine Aufgabe mit mehr Teilschritten würde daher mehr gewichtet als eine Aufgabe mit weniger, obwohl in beiden Fällen ein Nichtbearbeiten des ersten Aufgabenteils zum Fehlen der gesamten Aufgabe führt (z.B. ist Aufgabe 2a auf Seite 19 des Workbooks zum 2DD-Mechanikkonzept Voraussetzung für Aufgabenteil b), welcher ohne die richtige Lösung aus Teil a) nicht bearbeitet werden kann).
2. Bei verschiedenen Varianten der gleichen Aufgabestellung kann es vorkommen, dass von den Lehrkräften nicht alle, sondern nur ausgewählte Varianten gestellt wurden, diese aber intensiv besprochen werden (z.B. besteht Aufgabe 3 auf Seite 20 des Workbooks zum 2DD-Mechanikkonzept aus 8 verschiedenen Varianten der Aufgabe, welche alle unabhängig voneinander bearbeitet werden könnten). Die fehlende Bearbeitung von Aufgabenvarianten bedeutet hingegen nicht, dass das Konzept dahinter im Unterricht weniger behandelt wurde. Auch hier würden Aufgaben mit mehr Varianten im Bearbeitungsstand wieder stärker gewichtet.

Aus den beiden soeben genannten Gründen resultieren die Aufgabenblöcke zur Auswertung des Bearbeitungsstands. Die Einheiten selbst wurden dichotom (bearbeitet/nicht bearbeitet) bewertet und anschließend der prozentuale Anteil der Bearbeitung über alle Einheiten berechnet. Ausgewertet wurden nur die verpflichtenden Workbookaufgaben. Eine Einheit wurde dabei als bearbeitet bewertet, sobald ein konkreter Lösungsversuch der Aufgabe aus der Bearbeitung ersichtlich war.

Bei der Stichprobe der Workbooks ist zu beachten, dass diese nur für die in Präsenz unterrichteten Klassen ausgewertet werden konnten. Die Workbooks wurden stichprobenartig in den Klassen erhoben, wobei die Lehrkräfte gebeten wurden die Workbooks für zwei schwache, zwei mittlere und zwei starke SchülerInnen auszuwählen. Die Abgabe der Workbooks durch die SchülerInnen war freiwillig, weshalb auch nicht in allen Klassen die gleiche Anzahl an Workbooks vorliegen. Die Workbooks repräsentieren damit nur einen Ausschnitt und erlauben keine verallgemeinerbare Aussage über die Gesamtstichprobe.

Der Bearbeitungsstand in der Treatmentgruppe der 1D-Adaption lag bei  $\mu = 81\%$  ( $\sigma = 16\%$ ,  $MIN = 24\%$ ,  $MAX = 100\%$ ) und der des 2DD-Mechanikkonzepts bei  $\mu = 69\%$  ( $\sigma = 13\%$ ,  $MIN = 38\%$ ,  $MAX = 96\%$ ). Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zeigt einen höchst signifikanten Unterschied in den Bearbeitungsständen zwischen den stichprobenartigen Workbooks aus den Treatmentgruppen. Der Unterschied beträgt durchschnittlich 12 [5, 18] Prozent,  $t(88) = 3.67$ ,  $p < .001$ <sup>18</sup>,  $d = 0.79$  [0.35, 1.22]. Für die nicht repräsentative Stichprobe an ausgewählten Workbooks trifft das Argument 3.3 nicht zu. Der Bearbeitungsstand der Workbooks fällt vom Umfang her für die 1D-Adaption erheblich größer aus als für das 2DD-Mechanikkonzept.

Abgesehen von dem obigen Unterschied kann der Umfang der Bearbeitung in den Workbooks dennoch als bestätigter Treatment-Check für die Gesamtstudie gewertet werden, da in der Gruppen des 2DD-Mechanikkonzepts knapp über 2/3 und in der anderen Gruppe mit 80 % sogar deutlich mehr der Aufgabeneinheiten aus den Workbooks bearbeitet wurden.

#### 6.5.4 Diskussion der Argumente zur Ebene der Performanz

Wie bereits in Kapitel 6.4.2 unter der Ebene der Performanz erwähnt, erfolgt hier keine Diskussion von Argument 4.1, sondern nur zur Korrektheit der bearbeiteten Workbookaufgaben (Argument 4.2).

##### 6.5.4.1 Korrektheit der bearbeiteten Workbookaufgaben (Argument 4.2)

Zur Überprüfung von Argument 4.2 wurden dieselben stichprobenartig eingesammelten Workbooks wie schon bei Argument 3.3 ausgewertet. Auch hier wurden nur die verpflichtenden Workbookaufgaben in die Auswertung miteinbezogen. Die von den SchülerInnen bearbeiteten Aufgaben wurden dichotom codiert (richtig/falsch). Jeder Aufgabenteil wurde einzeln bewertet, indem die Lösung mit einer erstellten Musterlösung abgeglichen wurde. Bei vielen Aufgaben in den Workbooks handelte es sich allerdings um Freitextaufgaben oder Aufgaben, in denen mehrere Lösungswege möglich waren, so dass im direkten Vergleich mit der Musterlösung die Korrektheit der Lösung nicht direkt festgestellt werden konnte. Der Anteil der korrekt bearbeiteten Aufgaben wurde immer in Relation zu allen bearbeiteten Aufgaben gesehen, so dass nicht bearbeitete Aufgaben hier nicht weitere berücksichtigt wurden.

Der Anteil der korrekt bearbeiteten Aufgaben liegt im Fall der 1D-Adaption bei  $\mu = 63\%$  ( $\sigma = 2\%$ ,  $MIN = 33\%$ ,  $MAX = 87\%$ ) und im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts bei  $\mu = 61\%$  ( $\sigma = 2\%$ ,  $MIN = 36\%$ ,  $MAX = 90\%$ ). Vergleicht man den Anteil zwischen den beiden Treatmentgruppen zeigt ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben

<sup>18</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zu einem höheren Signifikanzwert, so dass nur  $p < .01$  gilt. Die 95% Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle.

keinen signifikanten Unterschied. Die mittlere Differenz beträgt 2 [−4, 7] Prozent zu Gunsten der 1D-Adaption,  $t(88) = 0.53$ ,  $p = .600^{19}$ ,  $d = 0.11$  [−0.31, 0.53]. Die verpflichtenden Workbookaufgaben wurden also in beiden Treatmentgruppen gleich gut gelöst.

Der Anteil der korrekt bearbeiteten Workbookaufgaben liegt in beiden Treatmentgruppen bei knapp 60 %. Man kann folglich sagen, dass im Mittel zumindest über 50 % der Aufgaben richtig gelöst wurden. Somit kann auch der zweite Teil des Treatment-Checks als hinreichend erfüllt gewertet werden.

### **6.5.5 Diskussion der Argumente zur Ebene der Testwerte**

Zur Erhebung der Testwerte wurde in dieser Studie ein Fachwissenstest zu Kraft und Bewegung eingesetzt. Hierbei werden zunächst im Sinne von Argument 5.1 die Vorstudie des Fachwissenstests und in einem zweiten Schritt Ergebnisse dieser Studie zum Beleg von Argument 5.2 vorgestellt. Abschließend werden zur Diskussion von Argument 5.3 mehrere Arbeiten zur Untersuchung von latenten Strukturen im Fachwissenstests vorgestellt und anschließend diskutiert.

#### **6.5.5.1 Itemkonstruktion und -auswahl zur Abbildung der Interventionsinhalte (Argument 5.1)**

Für den Vergleich der beiden Mechanikkonzepte sollte das Fachwissen zu Kraft und Bewegung bzw. der individuelle Lernzuwachs der SchülerInnen gemessen werden. Lernzuwachs bezeichnet in dieser Studie immer die Differenz zwischen den Werten einer Person zum Post- und Prätestzeitpunkt. Der Fachwissenstest sollte möglichst alle Inhaltsfelder abdecken, welche in den beiden Mechanikkonzepten behandelt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass keine der beiden Treatmentgruppen durch den Test bevorzugt wird, das heißt, es gibt in gleicher Anzahl Aufgaben, die potenziell bezogen auf die Elementarisierung, entweder von den SchülerInnen der einen oder der anderen Treatmentgruppe besser gelöst werden können. Ebenso dürfen die Aufgabenstellungen keine Definition oder Formulierungen enthalten, welche im jeweils anderen Konzept nicht behandelt wurden. Die Aufgaben, welche potenziell eine der beiden Treatmentgruppen bevorzugen, sollten dabei so konstruiert werden, dass auch Transferleistungen der SchülerInnen bezogen auf die Elementarisierung des anderen Konzepts bewertet werden können. Zu diesem Zweck wurden analoge ein- und zweidimensionale Aufgaben sowie ebenso vergleichbare Aufgaben mit konstanten Kräften und Stößen entwickelt.

Bestehende Tests zur Mechanik wie das Force Concept Inventory (FCI) (Hestenes et al., 1992) erfüllen die oben genannten Anforderungen nicht. Der Fachwissenstest, welcher in der Evaluationsstudie zum 2DD-Mechanikkonzept eingesetzt wurde (Tobias, 2010), kann ebenfalls nicht übernommen werden, da in diesem, wie bereits unter Kapitel 4.2.4

---

<sup>19</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zum gleichen Ergebnis mit einem Signifikanzwert  $p > .05$ . Die 95% Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle.

ausführlich diskutiert, Testaufgaben mit Begrifflichkeiten wie „Tempo“ oder „Zusatzgeschwindigkeit“ SchülerInnen benachteiligt, welche „konventionell“ unterrichtet wurden, da diesen schon die Definitionen der Begriffe nicht bekannt sind und ebenso wenig die physikalischen Konzepte dahinter. Die Aufgaben ermöglichen auch keine Auswertung von Transferleistungen, da die Testaufgaben immer nur auf das 2DD-Mechanikkonzept, den „konventionellen“ Mechanikunterricht oder unabhängig von beiden ausgelegt waren und nicht vergleichbar waren. Des Weiteren gab es im Test von Tobias (2010) eine Mischung aus verschiedenen Antwortformaten wie Multiple-Choice und Single-Choice Aufgaben mit unterschiedlich vielen Antwortmöglichkeiten. Aufgrund dessen war es notwendig einen eigenen Fachwissenstest zu Kraft und Bewegung zu entwickeln, welcher sowohl Aufgaben aus bestehenden Tests verwendet als auch Eigenentwicklungen enthält. Die Aufgaben wurden alle im Single-Choice-Format gestellt, wobei immer vier Antwortmöglichkeiten zur Auswahl standen, wovon genau eine richtig war.

### Erstellung eines Schemas zur Kategorisierung der Aufgabenmerkmale

Das Aufgabenentwicklungsmodell entstand in einem iterativen Prozess bestehend aus der Auswahl von Aufgaben aus bestehenden Mechaniktests (Alonzo & Steedle, 2009; Hestenes et al., 1992; Lütgerath, 2019; Peters, 2013; Tobias, 2010; Zander, 2015), der Eigenentwicklung von Aufgaben und der fortlaufenden Ausdifferenzierung. Es wurde insbesondere darauf geachtet, beide Elementarisierungen zunächst allgemein mit den Kategorien abzudecken. In einem weiteren Schritt wurden die Aufgaben in Hinblick auf mögliche Transferleistungen der SchülerInnen von einer Elementarisierung zur anderen anhand von spezifischen Merkmalen ausdifferenziert. Auch bei der Formulierung der Aufgaben wurde darauf geachtet, diese möglichst allgemein für beide Elementarisierungen zu formulieren, falls das enthaltene Konzept dies zulässt. Das vollständige Aufgabenentwicklungsmodell ist in Tabelle 6.7 abgebildet und wird im Weiteren genauer erläutert.

Das Themengebiet der Mechanik lässt sich in die Teilbereiche der Kinematik, Dynamik und Statik aufteilen. Die physikalischen Konzepte der Dynamik und Statik werden durch die drei Newton'schen Axiome abgedeckt (siehe Kapitel 3.2). Es ergeben sich daher zur ersten Einordnung der Aufgaben die Unterscheidung nach Kinematikaufgaben (hier bezeichnet als Aufgaben zu Bewegungen: **B**) und Aufgaben, welche einem der drei Newton'schen Axiome zugeordnet werden können (**N1-N3**).

Für die Aufgaben zu Bewegungen (**B**) wurden vier Unterkategorien gebildet. Die erste Unterkategorie bildeten Aufgaben zur Berechnung einer unbekannten Größe aus jeweils zwei gegebenen Größen von Geschwindigkeitsbeträgen  $v$ , Strecken  $\Delta s$  und Zeiten  $\Delta t$  (B1). Um mit diesen Aufgaben keine der beiden Elementarisierungen zu bevorzugen, wurden in den Aufgaben keine Begriffe wie „Geschwindigkeitsbetrag“ oder „Tempo“ verwendet, sondern davon gesprochen, wie „schnell“ ein Körper sich bewegt. Diese Formulierung wurde für alle weiteren Aufgaben übernommen, in denen der Geschwindigkeitsbetrag relevant ist. Die zweite Unterkategorie bezog sich auf die in beiden Mechanikkonzepten eingesetzte Darstellungsform der Stroboskopbilder/-tabellen. Hier sollten die SchülerInnen für verschiedene Bewegungsformen (konstante Geschwindigkeiten oder beschleunigte Bewe-

Tabelle 6.7: Aufgabenentwicklungsmodell

| <b>Inhaltliche Kategorien</b>             | <b>Merkmale</b> |                            |            |
|-------------------------------------------|-----------------|----------------------------|------------|
| <b>Bewegungsaufgaben</b>                  | <b>(B)</b>      | <b>Eindimensional</b>      | <b>(E)</b> |
| Berechnung                                | (B1)            | <b>Zweidimensional</b>     | <b>(Z)</b> |
| Stroboskopbilder                          | (B2)            | <b>Stoß</b>                | <b>(S)</b> |
| Unterscheidung Betrag und Richtung von    |                 | <b>Statisch</b>            | <b>(0)</b> |
| Geschwindigkeit                           | (B3)            | <b>Kräftegleichgewicht</b> | <b>(G)</b> |
| Veränderung der Geschwindigkeit           | (B4)            |                            |            |
| <b>Trägheit und Scheinkräfte</b>          | <b>(N1)</b>     | <b>Alonzo Item (OMS)</b>   | <b>(A)</b> |
| <b>Kraft und Bewegung</b>                 | <b>(N2)</b>     |                            |            |
| Keine (resultierende) Kraft -> Bewegung   | (KKB)           |                            |            |
| Keine Bewegung -> Kraft                   | (KBK)           |                            |            |
| Kraft -> Bewegung                         | (KB)            |                            |            |
| Bewegung -> Kraft                         | (BK)            |                            |            |
| Bewegungsvergleich: Bewegung -> Kraft     | (VBK)           |                            |            |
| Bewegungsvergleich: Kraft -> Bewegung     | (VKB)           |                            |            |
| Kraftrichtung ist nicht Bewegungsrichtung | (KR)            |                            |            |
| <b>Wechselwirkungsprinzip</b>             | <b>(N3)</b>     |                            |            |
| Gleiche Masse                             | (K1)            |                            |            |
| Ungleiche Massen                          | (K2)            |                            |            |

gungen) anhand von Stroboskopbildern Aussagen über Geschwindigkeiten machen (B2). Beide Elementarisierungen legen großen Wert auf die Differenzierung zwischen Geschwindigkeitsbeträgen, Bewegungsrichtungen und der Kombination beider Informationen in der Geschwindigkeit als gerichtete Größe, weshalb diese Unterscheidungen in der dritten Kategorie behandelt wurden (B3). Die letzte Kategorie der Bewegungsaufgaben bestand in der Betrachtung von Geschwindigkeitsänderungen und beschleunigten Bewegungen (B4). Die Aufgaben zum ersten Newton'schen Axiom, also zum Trägheitsprinzip (**N1**), wurden in keine weiteren Unterkategorien aufgeteilt. Die Aufgaben aus dieser Kategorie hatten die Gestalt, dass ein Körper in seinem Bewegungszustand verbleibt, dafür aber ein anderer Körper diesen Zustand ändert. Ein Beispiel für solch eine Aufgaben ist das Paket auf dem Dach eines Autos, welches herunterfällt, weil das Auto um eine Kurve fährt. Das Paket behält seinen Bewegungszustand bei, das Auto hingegen ändert seine Geschwindigkeit (Richtung und Betrag). SchülerInnen argumentieren bei dieser Art von Aufgaben häufig mit SchülerInnenvorstellungen von Scheinkräften wie der „Zentrifugalkraft“, welche das Paket in dem obigen Beispiel nach außen drücken würde (Schecker et al., 2018). Aus diesem Grund wurde die Kategorie mit „Trägheit und Scheinkräfte“ betitelt.

In der Kategorien zum zweiten Newton'schen Axiom (**N2**) wurden in den Aufgaben Bewegungen und die Wirkung von Kräften zusammengeführt. Die ersten vier Unterkategorien orientierten sich an der Arbeit von Alonzo & Steedle (2009), welche für die Erstellung ihrer Testaufgaben die Aufgaben zu Kraft und Bewegung, wie folgt, unterschieden haben:

- KKB: Es wird vorgegeben, dass auf einen Körper keine oder genauer keine resultierende Kraft wirkt. Die SchülerInnen sollen anschließend schlussfolgern, welche Auswirkung dies auf den Bewegungszustand des Körpers hat (dieser kann sowohl statisch als gradlinig gleichförmig sein).
- KBK: Hier wird eine statische Situation vorgegeben, in der sich ein Körper nicht bewegt. Daraus sollen Rückschlüsse zu auf den Körper wirkenden Kräften gezogen werden, welche in diesem Fall gar nicht vorhanden sind oder eine resultierende Kraft von  $\sum \vec{F} = \vec{0}$  ergeben.
- KB: Im Unterschied zur ersten Unterkategorie wird eine resultierende Kraft auf einen Körper vorgegeben. Dabei kann es sich sowohl um eine konstant wirkende Kraft als auch um einen zeitlich begrenzten Kraftstoß handeln. Wiederum soll im Anschluss mit diesen Informationen von den SchülerInnen Aussagen über die Veränderung des Bewegungszustands des Körpers gemacht werden.
- BK: In dieser Unterkategorie wird im Unterschied zur Zweiten die Bewegung eines Körpers und keine statische Situation vorgegeben. Dabei kann es sich sowohl um Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit als auch um beschleunigte Bewegungen handeln. Gefragt ist auch hier wieder, welche Kräfte dabei auf den Körper wirken müssen.

In beiden Mechanikkonzepten wird die Newton'sche Bewegungsgleichung vermittelt. Hierzu ergaben sich die nächsten zwei Unterkategorien für den Vergleich von zwei Bewegungen unter einer Einwirkung auf Körper. In diesen Aufgaben wurden zwei analoge Situationen, welche sich genau in einer Variablen bezogen auf die Newton'sche Bewegungsgleichung voneinander unterscheiden haben, vorgegeben (z.B. gleiche Einwirkung auf zwei Körper mit unterschiedlichen Massen). Eine Größe war unbekannt. Anhand der Newton'schen Bewegungsgleichung sollte eine halbquantitative Aussage über die unbekannte Größe im Vergleich der beiden Situationen gemacht werden (z.B. Aufgabe *N2.VKB.02*, siehe Anhang D). In dem beschriebenen Beispiel muss auf den doppelt so schweren Wagen auch eine vom Betrag her doppelte so große Kraft ausgeübt werden, wie auf den leichteren Wagen. Diese Aufgaben lassen sich des Weiteren danach unterscheiden, ob die Bewegungen vorgegeben und eine Aussage über die Kräfte gemacht werden sollte (VBK) oder ob andersherum die wirkende Kräfte vorgegeben und eine Aussage über die Bewegung gemacht werden sollte (VKB). Die letzte Unterkategorie wurde durch eine typische SchülerInnenvorstellung motiviert. SchülerInnen neigen in der Mechanik dazu, die Krafttrichtung mit der Bewegungsrichtung in Verbindung zu setzen. Der Körper bewegt sich demnach immer in die Richtung der (größten) wirkenden Kraft (Schecker et al., 2018, siehe auch Kap. 4.1.2). So werden in Bewegungen die Geschwindigkeitspfeile als Kraftpfeile interpretiert.

tiert, da diese scheinbar die Bewegung des Körpers bestimmen. Die Aufgaben bezogen sich genau auf diese Differenzierung zwischen Kraftrichtung und der tatsächlichen Bewegungsrichtung (KR).

Als Letztes blieben die Aufgaben zum dritten Newton'schen Axiom (**N3**), hier bezeichnet als Wechselwirkungsprinzip. Es wurden zwei Unterkategorien gebildet, indem bei den Aufgaben unterschieden wird, ob die beiden beteiligten Körper die gleiche Masse (K1) oder ungleiche Massen (K2) besitzen. Insgesamt ergaben sich somit die ausdifferenzierten Kategorien auf der linken Seite von Tabelle 6.7.

Im nächsten Schritt in der Entwicklung des Aufgabenentwicklungsmodells konnten den Aufgaben spezifische Merkmale zugeordnet werden, welche die bisherigen Kategorien bezogen auf die Gestaltung der Aufgabe weiter präzisierten. Diese Merkmale bezogen sich im Speziellen auch auf die Elementarisierungen der beiden Mechanikkonzepte und ermöglichen dadurch im weiteren Verlauf Aussagen über mögliche Transferleistungen der SchülerInnen innerhalb und zwischen den einzelnen Kategorien. Hierzu wurde auch schon bei der Aufgabenauswahl und -gestaltung darauf geachtet, Aufgaben, welche die gleiche inhaltliche Kategorie aufweisen, sich aber in einem Merkmal voneinander unterscheiden, analog aufzubauen, so dass mögliche Transfereffekte zwischen den Aufgaben eindeutig dem jeweiligen Merkmal zugeordnet werden können.

Als erstes Merkmal konnte bei den Aufgaben, wie es schon die beiden Elementarisierungen vermuten lassen, unterschieden werden, ob die Bewegungen in der Aufgabe im Eindimensionalen (**E**) oder im Zweidimensionalen (**Z**) ablaufen. Als Anmerkung zum Merkmal „Zweidimensional“ sei an dieser Stelle gesagt, dass hierunter auch Bewegungen gezählt wurden, welche zwar gradlinig gleichförmig ablaufen, aber eine  $x$ - und  $y$ -Komponente aufwiesen. Das Merkmal für die Dimension wurde bei der Aufgabe allerdings nur dann vergeben, wenn diese in der Aufgabe explizit sichtbar wurde. Als nächstes Merkmal kann bei der Wirkung einer Kraft unterschieden werden, ob es dabei um eine konstante Kraft oder um einen zeitlich begrenzten Kraftstoß (**S**) handelt. Als weitere Merkmale konnte noch betont werden, ob es sich in der Aufgabe um eine statische Situation (**0**) handelt oder in der Aufgabe ein Kräftegleichgewicht (**G**) vorliegt. Als Letztes wurde in der Aufgabe noch vermerkt, ob es sich hierbei um eine Ordered Multipld Choice (OMC) Aufgabe (**A**) nach Alonzo & Steedle (2009) handelte. Damit ergibt sich abschließend die rechte Seite der Tabelle 6.7. Aufgaben mit gleicher Kategorie und gleichen Merkmalen, wurden zur weiteren Unterscheidung durchnummeriert.

Das Testitem mit der Bezeichnung *N2.KB.ZS.01* (siehe Anhang D) ist zum Beispiel eine Aufgabe zum zweiten Newton'schen Axiom, wobei auf einen Körper ein Kraftstoß ausgeübt wird und daraus auf die Bewegung des Körpers geschlossen werden soll. Der Körper bewegt sich in dieser Aufgabe im Zweidimensionalen.

## Design und Stichprobe der Vorstudie

Auf Grundlage des Aufgabenentwicklungsmodells wurden für eine Vorstudie 53 Items zusammengestellt, welche alle Kategorien und Merkmale abdecken. Die 53 Items wurden in einem Multimatrixdesign auf 3 Testhefte mit je 35 (bzw. 36) Items ausgeteilt. Ein

Item musste allerdings noch vor der Auswertung entfernt werden, da hier ein Fehler in der Aufgabenstellung vorlag. Effektiv lagen für die Auswahl somit nur 52 Items vor. Die Vorstudie wurde im Schuljahr 2019/20 an zwei Gymnasien aus Nordrhein-Westfalen mit insgesamt 348 SchülerInnen aus 16 Klassen der 7., 8. und 9. Jahrgangsstufe durchgeführt. Die Testhefte wurden in acht Klassen eingesetzt, die bereits Unterricht in Mechanik hatten und in acht Klassen, wo dies noch nicht der Fall war. Die Erhebung fand in den letzten beiden Wochen vor den Sommerferien statt. Die genaue Aufteilung der Stichprobe kann Tabelle 6.8 entnommen werden.

Tabelle 6.8: Stichprobe der Vorstudie

| Jahrgangsstufe | Ohne Mechanikunterricht | Mit Mechanikunterricht |
|----------------|-------------------------|------------------------|
| 7              | 85 SchülerInnen         | -                      |
| 8              | 102 SchülerInnen        | 40 SchülerInnen        |
| 9              | -                       | 121 SchülerInnen       |

Um die Objektivität der Testungen zu sichern, wurde ein Testleitermanual mit genauen Anweisungen für die Durchführung der Testungen geschrieben, sowie Testleiterprotokolle angefertigt. Die Antworten der SchülerInnen wurden im Anschluss an die Testung dichotom codiert mit 1 für die richtige Antwort und 0 für eine falsche Antwort. Nicht bearbeitete Aufgaben wurden mit *leer* codiert.

### Auswahl der Aufgaben

Es wurden Aufgaben gesucht, die sowohl im Prä- als auch im Posttest funktionieren. Deshalb wurden die beiden Gruppen vor und nach dem Mechanikunterricht getrennt betrachtet. Für die Auswahl der Aufgaben wurde als erster Schritt eine klassische Trennschärfeanalyse (Bortz & Döring, 2006) durchgeführt. Hierbei wurde die Trennschärfe (engl.: Discrimination, hier kurz: *Dis*) zuerst über alle Items berechnet und im Anschluss alle Items aussortiert, welche unter einer Trennschärfe von  $Dis < .10$  lagen. Anschließend wurde erneut die Trennschärfe für die verbleibenden Items berechnet und nach dem neuen Grenzwert von  $Dis < .15$  aussortiert. Dieser Prozess wurde mit den Stufen  $Dis < .20$  und  $Dis < .25$  weitergeführt, bis schließlich alle ausgewählten Item eine Trennschärfe von  $Dis \geq .25$  aufwiesen. Dieser Prozess wurde für die beiden Gruppen mit und ohne Mechanikunterricht getrennt durchgeführt. Aufgaben, welche in beiden Gruppen eine hinreichende Trennschärfe von  $Dis \geq .25$  (Bortz & Döring, 2006) aufwiesen, konnten demnach potenziell in den Fachwissenstest aufgenommen werden. Als weiteres Auswahlkriterium wurden Rasch-Analysen (Wilson, 2005) mit Winsteps (Linacre, 2021) (siehe auch im Anhang Kap. A.1) getrennt für die beiden Teilstichproben (mit und ohne Mechanikunterricht) durchgeführt, um anhand der Item-Fit-Parameter eine Auswahl der Items zu treffen. Des Weiteren konnte aber auch die Abdeckung der Personenfähigkeiten durch die Itemschwierigkeiten anhand der Wright-Map betrachtet werden. Die letztendliche Auswahl der Items wurde aufgrund der soeben beschriebenen Trennschärfeanalyse,

der Verteilung der Itemschwierigkeiten über die Personenfähigkeit und aufgrund von inhaltlichen Aspekten getroffen, so dass möglichst alle Kategorien abgedeckt waren. Für die Auswertung von Transferleistungen wurde zusätzlich auch wieder darauf geachtet, möglichst die analog aufgebauten Aufgabenpaare in den Fachwissenstest mit aufzunehmen, auch wenn diese die Bedingung der Trennschärfe nicht erfüllten.

Für den Fachwissenstest wurden abschließend 27 Items ausgewählt. Die Verteilung der Items über die Kategorien und Merkmale kann Tabelle 6.9 und eine Übersicht über die Fit-Werte der ausgewählten Aufgaben Tabelle B.1 im Anhang entnommen werden.

Tabelle 6.9: Verteilung der ausgewählten Aufgaben im Aufgabenentwicklungsmodell

| <b>Inhaltliche Kategorien</b>                        |                 | <b>Merkmale</b>                   |
|------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| <b>Bewegungsaufgaben</b>                             | (B)             | <b>Eindimensional (5) (E)</b>     |
| Berechnung (3)                                       | (B1)            | <b>Zweidimensional (5) (Z)</b>    |
| Stroboskopbilder (4)                                 | (B2)            | <b>Stoß (2) (S)</b>               |
| <del>Unterscheidung Betrag und Richtung von</del>    |                 | <b>Statisch (3) (0)</b>           |
| <del>Geschwindigkeit</del>                           | <del>(B3)</del> | <b>Kräftegleichgewicht (3)(G)</b> |
| Veränderung der Geschwindigkeit (2)                  | (B4)            |                                   |
| <b>Trägheit und Scheinkräfte (2)</b>                 | (N1)            | <b>Alonzo Item (OMS)(6)(A)</b>    |
| <b>Kraft und Bewegung</b>                            | (N2)            |                                   |
| Keine (resultierende) Kraft -> Bewegung (3)          | (KKB)           |                                   |
| Keine Bewegung -> Kraft (3)                          | (KBK)           |                                   |
| Kraft -> Bewegung (5)                                | (KB)            |                                   |
| Bewegung -> Kraft (1)                                | (BK)            |                                   |
| Bewegungsvergleich: Bewegung -> Kraft (2)            | (VBK)           |                                   |
| Bewegungsvergleich: Kraft -> Bewegung (2)            | (VKB)           |                                   |
| <del>Kraftrichtung ist nicht Bewegungsrichtung</del> | <del>(KR)</del> |                                   |
| <del>Wechselwirkungsprinzip</del>                    | <del>(N3)</del> |                                   |
| <del>Gleiche Masse</del>                             | <del>(K1)</del> |                                   |
| <del>Ungleiche Massen</del>                          | <del>(K2)</del> |                                   |

Aus den durchgestrichenen Kategorien wurden keine Items in den Fachwissenstest aufgenommen. Die Aufgaben dieser Kategorien wiesen zum Teil sehr schlechte Trennschärfen auf oder waren in Bezug auf die Personenfähigkeit viel zu schwer, das heißt sie lagen in der Wright-Map deutlich außerhalb der Verteilung der Personenfähigkeiten.

#### 6.5.5.2 Abbildung von Lernzuwächsen durch den Fachwissenstest (Argument 5.2)

Nach Argument 5.2 sollte der soeben vorgestellte Fachwissenstest in der Lage sein Lernzuwächse von SchülerInnen im Bereich der Mechanik abzubilden. In der Vorstudie wur-

den zwei Teilstichproben von SchülerInnen mit und ohne Mechanikunterricht erhoben, welche sich bezüglich ihres Fachwissens in der Mechanik hypothetisch aufgrund des vorhandenen oder nicht vorhandenen Unterrichts voneinander unterscheiden. Als Validitätsargument für Argument 5.2 wird daher überprüft, ob dieser Unterschied auch empirisch nachweisbar ist, was zwar keine unmittelbare Testung von Lernzuwächsen aber eine quasi-längsschnittliche Betrachtung des Lernzuwachses bildet.

Zur Auswertung der ausgewählten Items wurde erneut eine Raschanalyse<sup>20</sup> zunächst für die Gesamtstichprobe durchgeführt. In Tabelle B.1 (siehe Anhang) sind für diese Analyse die entsprechenden Logit-Werte der Itemschwierigkeiten sowie die Fit-Werte der Items (Outfit MNSQ und Infit MNSQ) aufgeführt. Zusätzlich wurde der Unterschied im DIF (*differential item functioning*) in den beiden Teilstichproben mit und ohne Mechanikunterricht berechnet. Hierzu befinden sich in Tabelle B.1 die Werte für die DIF-Kontrast zwischen den beiden Teilstichproben sowie die Angaben von Signifikanzen bezüglich der berechneten Rasch-Welch-Tests<sup>21</sup>.

Die Fit-Werte der Rasch-Analyse liegen für alle Items im empfohlenen Intervall von  $[0.5, 1.5]$  und bis auf eine Ausnahme (N2.KB.E.01) sogar im strengeren Intervall  $[0.8, 1.2]$ . In der DIF-Analyse weisen 6 Items einen signifikanten  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.64$  auf, alle anderen 21 Items wurden daher für die weitere Analyse als Anker-Items festgelegt.

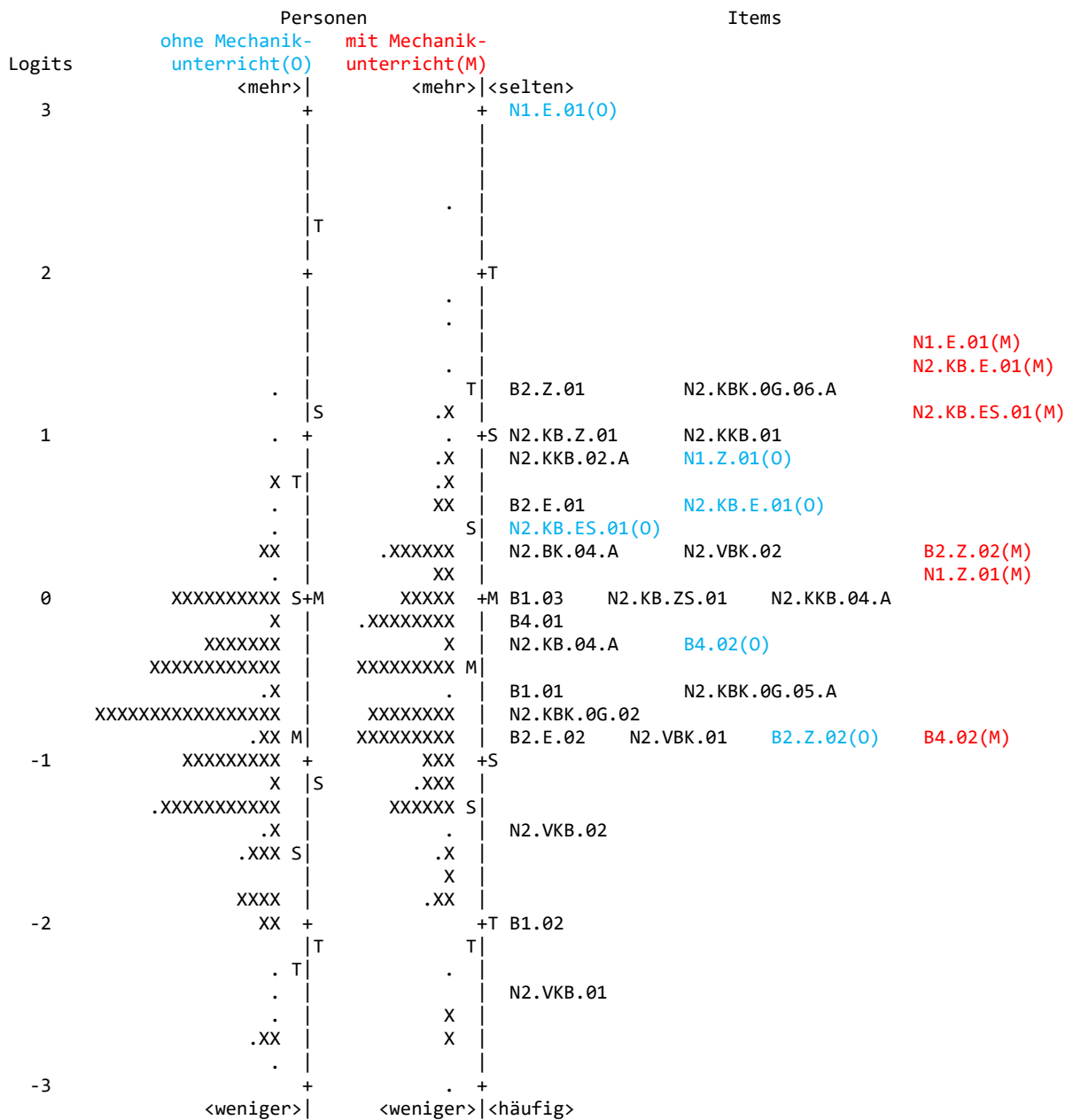
Als nächster Schritt wurden mit den zuvor bestimmten Anker-Items zwei weitere Rasch-Analysen für die beiden Teilstichproben durchgeführt. In Tabelle B.2 (siehe Anhang) sind zur Übersicht die Werte für die klassische Trennschärfe und die Logit-Werte der Itemschwierigkeiten aufgeführt. Die geschätzten Werte der Analysen für die Teilstichproben verhalten sich nach einem Log-Likelihood Chi-Quadrat-Test ( $p = .265$  ohne und  $p = .789$  mit Mechanikunterricht) rasch-konform, wodurch die spezifische Objektivität gegeben ist. Für die Analyse der SchülerInnen ohne Mechanikunterricht ergibt sich eine Personenreliabilität von .23 und eine Itemreliabilität von .95; für die SchülerInnen mit Mechanikunterricht zeigt sich hingegen ein Wert von .49 für die Personenreliabilität und ein Wert von .94 für die Itemreliabilität.

In Abbildung 6.11 sind abschließend die beiden Wright-Maps der Teilstichproben (mit und ohne Mechanikunterricht) gegenübergestellt. Die Anker-Items sind schwarz, die freien Items für die Gruppe ohne Mechanikunterricht blau und für die Gruppe mit Mechanikunterricht rot dargestellt. Betrachtet man die Wright-Map, wird sichtbar, dass der Test für die vorliegende Stichprobe im Allgemeinen zu schwer war. Der Mittelwert der Aufgabenschwierigkeiten liegt in beiden Teilstichproben über dem Mittelwert der Personenfähigkeiten. Dies zeigt sich auch dadurch, dass die Aufgaben in der Wright-Map bezogen

<sup>20</sup>Für Informationen zur Rasch-Analyse und zu den entsprechenden Kennwerten siehe Kap. A.1.

<sup>21</sup>Winsteps gibt zusätzlich zum Rasch-Welch-Test Werte für den Mantel-Haenszel-Test für dichotome Items aus (Linacre, 2020, S. 445). Beide Tests würden von der Theorie her das Gleiche messen, allerdings zeige die Praxis, dass der Rasch-Welch-Test signifikant sensitiver und reliabler bei kleinen Stichproben ( $N < 300$  pro Gruppe) sei und es darüber hinaus im Fall von fehlenden Daten beim Mantel-Haenszel-Test zu Problemen kommen könne (vgl. Schulz, 1990, S. 107).

Da hier ein Multimatixdesign gewählt wurde, „fehlen“ in jedem Fall Daten für die einzelnen Person. Aus diesem Grund und weil die untersuchte Stichprobe klein gegen 300 pro Gruppe ist, wird bei dieser Analyse für die Aussage über Signifikanzen nur der Rasch-Welch betrachtet.



Jedes „X“ repräsentiert zwei bzw. jeder „.“ eine Person.

M: Mittelwert

S: Standardabweichung

T: Zwei Standardabweichungen

Abbildung 6.11: Gegenüberstellung der Wright-Maps für beide Teilstichproben der Vorstudie mit Anker-Items (schwarz dargestellt)

auf die Histogramme der Personenfähigkeiten nach oben verschoben sind. Die schwierigen Aufgaben werden kaum von Personen mit einer entsprechenden Lösungswahrscheinlichkeit von 50 % abgedeckt. Im Gegensatz dazu gibt es im Bereich der leichten Aufgaben Lücken in der Abdeckung der Personen mit geringen Personenfähigkeiten. Bei den freien Items zeigt sich, dass die Items für die Stichprobe mit Mechanikunterricht leichter sind (N1.E.01, N1.Z.01, B4.02) als für die ohne aber auch der umgekehrte Fall (N2.KB.E.01, N2.KB.ES.01, B2.Z.02). Quasi-längsschnittlich gesehen kann also die Aussage getroffen werden, dass auf den zuerst genannten Items durch den Mechanikunterricht ein Lernzuwachs stattgefunden hat und auf anderen Seite verlernt wurde. Da das Ziel dieser Arbeit allerdings nicht die Analyse von „konventionellem“ Mechanikunterricht ist, wird die Diskussion an dieser Stelle auf die deskriptive Ebene beschränkt.

Zur Überprüfung von Argument 5.2 werden nun die Personenfähigkeiten der beiden Teilstichproben miteinander verglichen. Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zeigt einen hoch signifikanten Unterschied in den Personenfähigkeiten zwischen den SchülerInnen, welche noch keinen ( $\mu = -0.80, \sigma = 0.73$ ) und denen die bereits Mechanikunterricht hatten ( $\mu = -0.51, \sigma = 0.90$ ). Der Levene-Test auf Verletzung der Varianzhomogenität wird signifikant, weshalb zur Korrektur die Freiheitsgrade des t-Tests reduziert wurden. Der Unterschied beträgt durchschnittlich 0.29 [0.11, 0.46] Logits,  $t(307.91) = 3.23, p < .01, d = 0.35$  [0.14, 0.57].

Die SchülerInnen, die bereits Mechanikunterricht hatten, schneiden im Fachwissenstest also hoch signifikant besser ab als die SchülerInnen ohne Mechanikunterricht. Im Sinne von Argument 5.2 ist der Fachwissenstest also bei dieser exemplarischen Stichprobe in der Lage den Unterschied im Fachwissen aufgrund des Mechanikunterrichts (also den Lernzuwachs aufgrund von Unterricht) quasi-längsschnittlich abzubilden.

### 6.5.5.3 Latente Struktur des Fachwissenstests (Argument 5.3)

Mit der Untersuchung dieses Arguments haben sich zwei Abschlussarbeiten von Studierenden (Thauern, 2021; Vogel, 2021) beschäftigt, wobei die Analysen in diesen Arbeiten anhand der Daten aus der Hauptstudie durchgeführt wurden. In der Arbeit von Vogel (2021) wurde die zu Grunde gelegte Struktur des Aufgabenentwicklungsmodells (siehe Abb. 6.9) mit Hilfe von konfirmatorischen Faktorenanalysen (KFA) für dichotome Daten (siehe z.B. Brown, 2006) untersucht, indem verschiedene Modelle auf Grundlage der inhaltlichen Kategorien und der spezifischen Merkmale gebildet wurden und anschließend die Passung der Daten auf diese Modelle getestet wurde. Für die Analyse wurde das R-Paket *lavaan* (Rosseel, 2012) verwendet. Das Ergebnis der Arbeit war, dass keines der getesteten Modelle die mentale Struktur der SchülerInnen adäquat wiedergibt (vgl. Vogel, 2021, S. 64). Selbst das Modell, welches nur aus einem einzelnen Faktor bestand, wies keine hinreichenden Modellparameter auf. Dies spricht dafür, dass zwar eine latente mentale Struktur vorliegt, sich diese aber nicht mit dem Aufgabenentwicklungsmodell erklären lässt. Darüber hinaus konnte in den Analysen festgestellt werden, dass kleinste Unterschiede zwischen zwei Items des Fachwissenstests zur unterschiedlichen Zuordnung zu Faktoren und gar zur Exklusion aus dem Modell führen (vgl. Vogel, 2021, S. 65).

In einem nächsten Schritt wurde in der Arbeit von Thauern (2021) durch Anwendung der Repertory-Grid-Technique (siehe z.B. Björklund, 2008) untersucht, nach welchen Merkmalen die SchülerInnen die Aufgaben des Fachwissenstests gruppieren, um hieraus Schlüsse auf mögliche mentale Strukturen der SchülerInnen ziehen zu können. Bei der Repertory-Grid-Technique bekommen die SchülerInnen mehrere Aufgaben vorgelegt (in diesem Fall Triaden) und sollen Kriterien hinsichtlich Ähnlichkeit oder Unterschieden der Aufgaben nennen. Aus diesen Kriterien (z.B. Relevanz einer Abbildung für die Lösung der Aufgabe) werden schließlich Likert-Skalen entwickelt, anhand derer die Aufgaben eingeordnet werden sollen. Die Auswertung dieser Methode erfolgt mittels Clusteranalysen. Diese Zuordnungen wurden in der Arbeit von Thauern (2021) noch durch eine strukturierende Inhaltsanalyse von transkribierten SchülerInnenaussagen, die während dem Aufstellen von Kriterien und der anschließenden Zuordnung von den SchülerInnen geäußert wurden, evaluiert und anschließend mit den Ergebnissen der Clusteranalyse verglichen. Die Stichprobe umfasste dabei insgesamt 9 SchülerInnen.

Der Fachwissenstest besteht insgesamt aus 27 Item, diese Anzahl ist allerdings zu hoch für die Anwendung der soeben genannten Methode. Aus diesem Grund wurde zuvor eine explorative Faktorenanalyse (EFA) (siehe z.B. Fabrigar & Wegener, 2011) mit dem R-Paket *lavaan* durchgeführt, um aus den sich ergebenden Faktoren repräsentative Items zu extrahieren, welche dann anschließend mit der Repertory-Grid-Technique untersucht werden konnten. Die ausgewählten Items sind in Tabelle 6.10 aufgeführt.

Tabelle 6.10: Ausgewählte Items für die Analyse nach der Repertory-Grid-Technique

| Themenbereich             | Kategorie                               | Item           |
|---------------------------|-----------------------------------------|----------------|
| <b>Bewegung</b>           | Berechnung                              | B1.01          |
|                           |                                         | B1.03          |
|                           | Stroboskopbilder                        | B2.E.01        |
|                           |                                         | B2.Z.01        |
| <b>Kraft und Bewegung</b> | Kraft -> Bewegung                       | N2.KB.04.A     |
|                           |                                         | N2.KB.Z.01     |
|                           | Keine (resultierende) Kraft -> Bewegung | N2.KKB.01      |
|                           |                                         | N2.KKB.04.A    |
|                           | Keine Bewegung -> Kraft                 | N2.KBK.0G.02   |
|                           |                                         | N2.KBK.0G.05.A |
|                           | Bewegungsvergleich: Kraft -> Bewegung   | N2.VKB.01      |
|                           |                                         | N2.VKB.02      |

Die explorativen Faktorenanalyse wurde für die Posttestergebnisse aufgeteilt nach Treatmentgruppen durchgeführt. Die besten Modellpassung ergab sich bei vier Faktor (1D-Adaption) beziehungsweise bei sechs Faktoren (2D-Mechanikkonzept). Die Modelle wurden anschließend verglichen und aus den Faktoren repräsentative Items ausgewählt. Die Faktoren konnten dabei stellenweise mit dem Kategoriensystem in Beziehung gesetzt wer-

den, auch wenn nicht alle Items einer Kategorie auch demselben Faktor zugeordnet oder mehrere Kategorien unter einem Faktor zusammengefasst wurden. Auf diese Weise konnten schließlich zwölf Items ausgewählt werden, wobei immer zwei Items aus der gleichen Kategorie gewählt wurden und versucht wurde, den Fachwissenstest inhaltlich möglichst vollständig abzubilden. Es folgt ein Überblick über die Ergebnisse aus der Arbeit von Thauern (2021).

Aus der strukturierenden Inhaltsanalyse der SchülerInnenaussagen konnten 66 Merkmale extrahiert werden, welche zunächst in vier Kategorien eingeordnet wurden, nämlich Oberflächenmerkmale, fachbezogene Merkmale, Komplexität und Art des Lösungsweges. Der Hauptanteil der Merkmale (44/66) fiel dabei unter die Kategorie der fachbezogenen Merkmale, weshalb diese in sieben Unterkategorien weiter ausdifferenziert wurden in Bewegung/ Geschwindigkeit, Beschleunigung, Zeit, Kraft, Reibung, Masse und Antrieb. In der sich anschließenden Clusteranalyse konnten fünf Cluster identifiziert werden. Im nächsten Schritt wurde die Aufteilung der zehn Kategorien auf diese Cluster betrachtet. Die Aufteilung Tabelle 6.11 entnommen werden kann.

Ein Cluster enthält ausschließlich alle Oberflächenmerkmale. Ein weiteres Cluster enthält, bis auf eine Ausnahme, alle Merkmale der Kategorie zur Art des Lösungsweges und zusätzlich zwei aus der Kategorie Bewegung/Geschwindigkeit. Die restlichen Merkmale teilen sich auf die drei verbleibenden Cluster auf, wobei eines durch die Kategorien Bewegung/Geschwindigkeit dominiert wird und keine Merkmale der Kategorien Kraft und Masse enthält. Ein weiteres wird hingegen durch die Kategorien Kraft und Masse dominiert und weist keine Merkmale der Kategorie Bewegung/Geschwindigkeit auf. Aus diesen Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen (vgl. Thauern, 2021).

Aus der Analyse wird deutlich, dass die SchülerInnen verschiedenen Arten von Merkmalen nutzen, um die Items zu kategorisieren. Die beiden Kategorien Oberflächenmerkmale und Art des Lösungsweges zeigen sich auch in nahezu isolierten Clustern. Es wird an dieser Stelle eine Einordnung der Aufgaben vorgenommen, ohne den konkreten Inhalt der Aufgabe zu berücksichtigen. Der Hauptteil der Merkmale fällt auf den Bereich der inhaltlichen Merkmale, woraus geschlussfolgert werden kann, dass die SchülerInnen die inhaltliche Ebene durchaus bei der Einordnung von Aufgaben verwenden. Den Clustern, welche die inhaltlichen Merkmale enthalten, kann ein verschiedener Fokus zugeordnet werden, je nachdem von welchen Kategorien diese dominiert werden beziehungsweise welche Kategorien gerade nicht enthalten sind. So kann das zweite Cluster dem Themenbereich Bewegung und das letzte Cluster dem Themenbereich Kraft zugeordnet werden. Das dritte Cluster bildet eine Mischform unter Hinzunahme der Kategorie Beschleunigung. Es findet also bei den SchülerInnen eine Differenzierung bezüglich der genannten Themenbereiche statt, wobei auch Mischformen existieren. Abschließend kann man sagen, dass die Analyse auf latente mentale Strukturen der SchülerInnen in Hinblick auf die inhaltlichen Aspekte hinweist, diese aber nicht eindeutig zugeordnet werden können und auch nicht mit der Struktur des Aufgabenkonstruktionsmodells übereinstimmen. Thauern (2021) führt als eine mögliche Begründung an, dass die Aufgaben mehrere Kompetenzen gleichzeitig ansprechen und dadurch von den SchülerInnen individuell bewertet werden. Ein weiteres Argument bildet die *Knowlegde in Pieces-Theory* von diSessa (1993), nach welcher das

Tabelle 6.11: Kreuztabelle der Clusteranalyse mit allen zehn Kategorien (vgl. Thauern, 2021, S. 49)

| Cluster | Art des Lösungsweges | Bewegung/<br>Geschwindigkeit | Beschleunigung | Zeit | Kraft | Reibung | Masse | Antrieb | Komplexität | Oberflächen-<br>merkmal | Gesamt |
|---------|----------------------|------------------------------|----------------|------|-------|---------|-------|---------|-------------|-------------------------|--------|
| 1       | 0                    | 0                            | 0              | 0    | 0     | 0       | 0     | 0       | 0           | 6                       | 6      |
| 2       | 0                    | 8                            | 0              | 2    | 0     | 0       | 0     | 0       | 3           | 0                       | 13     |
| 3       | 0                    | 5                            | 4              | 2    | 1     | 1       | 2     | 1       | 0           | 0                       | 16     |
| 4       | 7                    | 2                            | 0              | 0    | 0     | 0       | 0     | 0       | 0           | 0                       | 9      |
| 5       | 1                    | 0                            | 0              | 0    | 11    | 2       | 4     | 1       | 3           | 0                       | 22     |
| Gesamt  | 8                    | 15                           | 4              | 4    | 12    | 3       | 6     | 2       | 6           | 6                       | 66     |

Antwortverhalten von SchülerInnen stark kontextabhängig ist und sich dadurch in den Items des Fachwissenstests keine einheitliche Struktur zeigt.

Das Argument 5.3 konnte mit Hilfe vorgestellten Analysen nicht bestätigt werden. Es ist anzunehmen, dass dem Antwortverhalten der SchülerInnen latente mentale Strukturen zu Grunde liegen, welche allerdings nicht eindeutig benannt werden können. Es muss daher von einer differenzierten Auswertung der einzelnen Kategorien des Fachwissenstests abgesehen werden und der zu messende Inhalt des Fachwissenstests wird als ein zusammenhängendes komplexes Konstrukt Mechanikwissen verstanden.

### 6.5.6 Abschließende Diskussion der Folge von Übersetzungsschritten

Ziel der Diskussion der Argumente war es, die Frage danach zu beantworten, inwiefern valide von den erhobenen Testwerten auf den Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen in Bereich der Mechanik geschlossen werden kann. Zu diesem Zweck wurden für die verschiedenen Übersetzungsschritte von der Zielebene hin zur Ebene der Testwerte übergeordnete Aussagen zur Begründung der Validität formuliert, welche jeweils mit Argumenten verbunden waren, die bereits in den vorausgegangenen Kapiteln diskutiert wurden.

Die erste Ebene bildeten die beiden Mechanikkonzepte. Es konnte gezeigt werden, dass eine Unterscheidung der beiden Mechanikkonzepte in eindeutig benennbaren Parametern möglich ist und dass die 1D-Adaption abgesehen von der Elementarisierung ein Konstanthalten aller weiteren Gestaltungsmerkmale ermöglicht, wobei sich diese möglichst nah am „konventionellen“ Unterricht orientiert.

Die Mechanikkonzepte wurden anschließend in Mechaniklehrgänge übersetzt. Hier konnte eine vergleichbare Themenstruktur gezeigt werden, auch wenn aufgrund der verschiedenen Elementarisierungen die beiden Lehrgänge zwischenzeitlich auseinanderlaufen müssen, umfassen sie doch eine vergleichbare Menge an Inhalt und verwenden vergleichbar viel Zeit auf die Behandlung der einzelnen Konzepte. Die Materialien umfassen für beide Lehrgänge den gleichen Umfang und wurden bezüglich der Gestaltungsmerkmale möglichst analog gestaltet. Aufgrund der unterschiedlichen Themenstruktur waren hier teilweise Abweichungen der Lehrgänge voneinander nötig, allerdings immer mit dem Ziel diese möglichst gering zu halten. Deshalb wird an dieser Stelle auch nicht von einer erheblichen Einschränkung der Validität ausgegangen. Eine größere Abweichung der beiden Lehrgänge gab es in Bezug auf die eingesetzten Simulationen, da diese sich aufgrund der unterschiedlichen Funktionen in Bezug auf die Darstellung von ikonischen Repräsentationen stark voneinander unterscheiden haben. Dieser Unterschied könnte möglicherweise Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen haben und stellt damit eine Einschränkung der Validität dar.

Auf der Ebene des Unterrichts konnte die gleiche Lernprozessesstruktur in beiden Treatmentgruppen gezeigt werden. Bezüglich der Unterrichtszeit konnte zwischen den beiden Treatmentgruppen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Unterschiede gab es hingegen bezogen auf den Bearbeitungsstand der Workbooks, die in der Treatmentgrup-

pen der 1D-Adaption höchst signifikant mehr bearbeitet wurden als in der Gruppe des 2DD-Mechanikkonzepts bei einer annähernd großen Effektstärke. Argument 3.3 ist demnach nicht erfüllt. Hintergrund des Arguments war zu zeigen, dass die Materialien in den Treatmentgruppen auch im gleichem Umfang von den Lehrkräften eingesetzt wurden. Die Workbooks wurden nur stichprobenartig in den Klassen eingesammelt und repräsentieren daher nicht unbedingt den realen Bearbeitungsstand der Workbooks. Auch wenn der Bearbeitungsstand unterschiedlich ausfällt, konnte dennoch gezeigt werden, dass mindestens 2/3 der Aufgaben den eingesammelten Workbooks bearbeitet wurden, was zumindest als ein Treatment-Check der Studie gewertet werden kann.

Das erste Argument in der Ebene der Performanz wurde in dieser Studie nicht überprüft, da dieses, wie bereits bei der Erstellung der Validierungslogik erläutert, den Rahmen dieser Arbeit erheblich überschritten hätte. Die Konsequenz bleibt aber dennoch eine Einschränkung der Validität in diesem Übersetzungsschritt. Das zweite Argument hingegen konnte überprüft werden. Die Korrektheit der bearbeiteten Workbookaufgaben liegt in beiden Treatmentgruppen bei ca. 60 % also oberhalb einer ausreichenden Leistung von 50 %, wodurch auch dieser zweite Treatment-Check als erfüllt betrachtet werden kann.

Auf der letzten Ebene der Testwerte konnte zum einen theoretisch begründet werden, dass der Fachwissenstest die Inhalte beider Mechanikkonzepte abbildet und keine der beiden Treatmentgruppen dabei bevorzugt wird. Zum anderen konnte im Rahmen der Ergebnisse aus der Vorstudie gezeigt werden, dass der Fachwissenstest in der Lage ist, Lernzuwächse im Bereich der Mechanik quasi-längsschnittlich abzubilden. Das letzte Argument, dass das Aufgabenentwicklungsmodell des Fachwissenstests sich auch in Form von latenten Variablen zeigen lässt, konnte nicht bestätigt werden, woraufhin sich entschieden wurde, den Inhalt des Fachwissenstests als ein zusammenhängendes komplexe Konstrukt aufzufassen. Auch dies bildet wieder eine Einschränkung der Validität.

Zusammenfassend sind in Abbildung 6.12 die Argumente bezogen auf ihre Gültigkeit gekennzeichnet. Ein grünes Häkchen steht für zutreffen, ein Häkchen in Klammern für zutreffend mit Einschränkungen und ein Kreuz für nicht zutreffend/nicht überprüft.

Abschließend kann nun gesagt werden, dass bezogen auf die erfüllten Argumente valide von den erhobenen Testwerten auf den Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen im Bereich der Mechanik geschlossen werden kann, da keine der oben genannten Einschränkung zu erheblichen Einschränkungen der Validität im Sinne eines Bruches in der Argumentationskette führt. Trotzdem müssen die Ergebnisse dieser Studie unter Berücksichtigung der genannten Einschränkungen gesehen werden:

- Die Wahl der Simulation hat möglicherweise einen Einfluss auf den Lernzuwachs.
- Das Material wurde potenziell in unterschiedlichem Umfang in den beiden Treatmentgruppen eingesetzt.
- Es wurde nicht überprüft, ob bei den SchülerInnen ein Lernprozess auf konzeptioneller Ebene stattfand.
- Die inhaltliche Struktur des Fachwissenstests lässt sich nicht in Form von latenten Variablen abbilden.

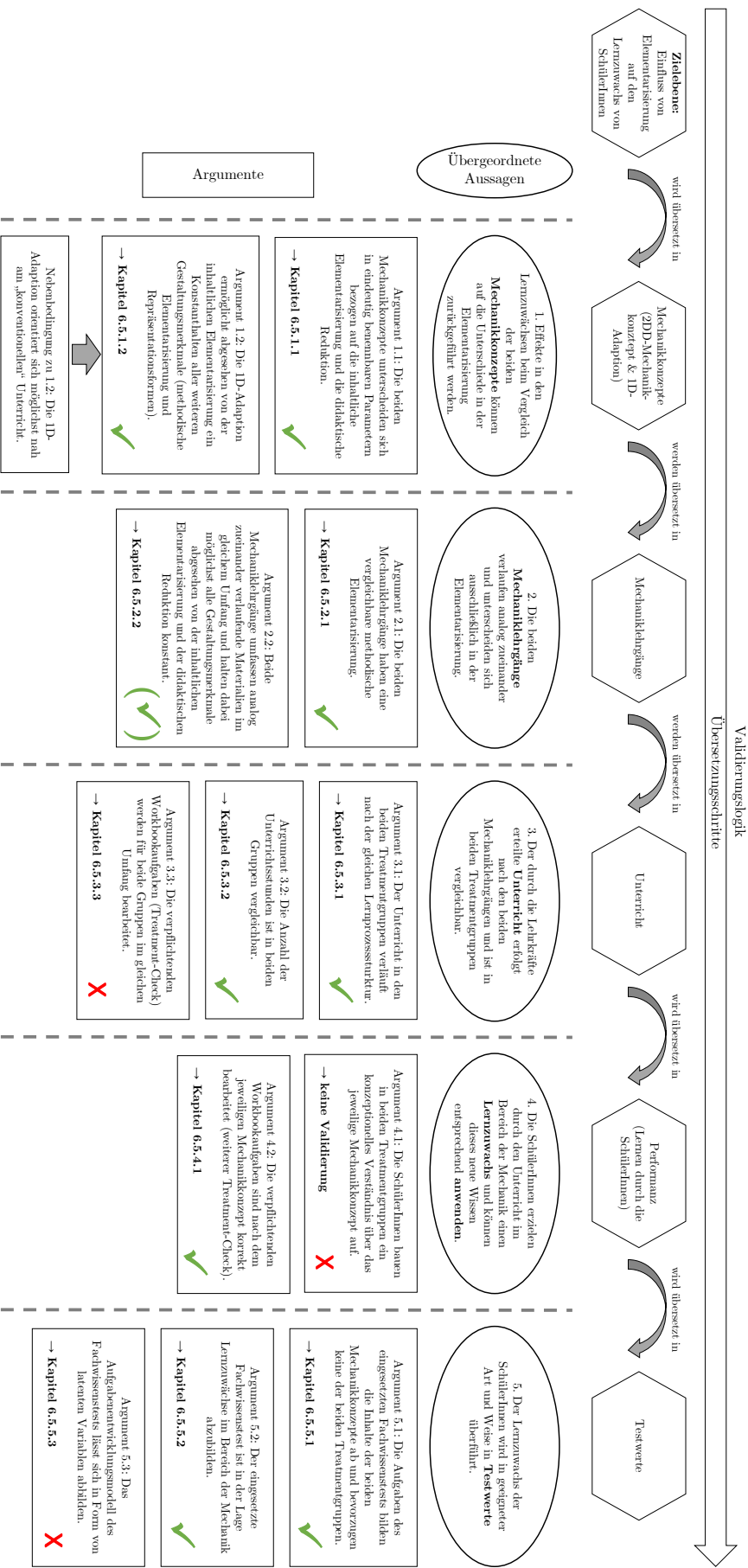


Abbildung 6.12: Abschließende Bewertung der Validierungslogik (vgl. der Darstellung Dickmann, 2016, S. 150)

## 7 Ergebnisse

In diesem Kapitel wird zunächst das Vorgehen zur Rasch-Skalierung der Daten aus dem Fachwissenstest erläutert. Anschließend werden die Daten einer Mehrebenenanalyse zum Test auf hierarchische Strukturen unterzogen und die Ergebnisse bezogen auf die beiden Forschungsfragen vorgestellt. Es folgt eine Auswertung der Daten nach klassischer Testtheorie und die Betrachtung von Leistungsklassen auf Grundlage einer latenten Klassenanalyse sowie eine Einzelitemanalyse. Zum Abschluss werden unter Hinzunahme der Kontrollvariablen verschiedene Varianzanalysen auf Individualebene der SchülerInnen und auf Klassenebene durchgeführt. Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich zunächst immer auf die Gymnasialklassen. Die Ergebnisse der Gesamtschulklassen werden gesondert am Ende des Kapitels vorgestellt.

### 7.1 Rasch-Skalierung der Daten aus dem Fachwissenstest

Für die Rasch-Skalierung des Fachwissenstests wurden die 27 Items zunächst dichotom codiert (richtig/falsch), wobei nicht bearbeitete Items als fehlende Werte aufgefasst und nicht als falsch codiert wurden. Die Rasch-Skalierung der Daten gliedert sich in drei Teilschritte:

1. Skalierung der Prätest-Daten: Diese Rasch-Analyse mit den Prätest-Daten liefert die Itemschwierigkeiten sowie die Personenfähigkeiten für den Prätest. Des Weiteren wird an dieser Stelle die Vergleichbarkeit der beiden Treatmentgruppen bezüglich der Prätest-Personenfähigkeiten gezeigt, welche bei der Durchführung der anschließenden DIF-Analyse verwendet wird.
2. Bestimmung der Anker-Items: Es wurde eine Rasch-Analyse mit den gesamten Prä- und Posttest-Daten der Stichprobe durchgeführt, um eventuelles DIF (differential item functioning) in den Items zu ermitteln.
3. Bestimmung der Personenfähigkeiten im Posttest: Die letzte Rasch-Analyse mit den Posttest-Daten liefert die Personenfähigkeiten für den Posttest. Hierzu wurden die Itemschwierigkeiten der Prätest-Analyse für die Items ohne DIF als Anker-Items fixiert. Die übrigen Items durften variieren. Für den Lernzuwachs der SchülerInnen wurde schließlich die Differenz aus den Personenfähigkeiten für den Post- und Prätest gebildet.

### 7.1.1 Skalierung der Prätestergebnisse

Für die Prätest-Personenfähigkeiten wurde zunächst eine Rasch-Analyse mit den Prätest-Daten des Fachwissenstests beider Treatmentgruppen durchgeführt. Zur Identifizierung von möglichen Items, welche sich zwischen den beiden Treatmentgruppen zum Präzeitpunkt unterschiedlich verhalten, wurden die DIF-Kontrast Werte zwischen den beiden Gruppen betrachtet. Keines der 27 Items aus dem Fachwissenstest wies dabei einen signifikanten  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.64$  (siehe Kap. A.1 im Anhang) auf, wodurch die Itemschwierigkeiten für alle 27 Items direkt aus der Analyse von beiden Treatmentgruppen festgelegt wurden und entsprechend auch die Personenfähigkeiten aus der gemeinsamen Analyse entnommen werden konnten. Die Fit-Werte sowie die DIF-Kontrast Werte der Items mit den entsprechenden Signifikanztests<sup>22</sup> sind in Tabelle B.3 (siehe Anhang) aufgeführt. Die Fit-Werte der Rasch-Analyse liegen für alle Items im strengen Intervall  $[0.8, 1.2]$  (siehe Kap. A.1 im Anhang). Der Log-Likelihood Chi-Quadrat Test (siehe Kap. A.1) wird nicht signifikant ( $p = .473$ ), die geschätzten Werte verhalten sich also rasch-konform. Die Personenreliabilität liegt bei .46 und die Itemreliabilität bei .99.

Die Prätest Personenfähigkeiten sind aufgeteilt nach Treatmentgruppen in Abbildung 7.1 in Form einer gemeinsamen Wright-Map gegen die für beide Gruppen gleichen Itemschwierigkeiten aufgetragen.

Der Mittelwert der Itemschwierigkeiten ist auf Null normiert. Im Vergleich dazu liegt der Mittelwert der Personenfähigkeiten für beide Gruppen darunter. Bis auf wenige Ausnahmen liegt die Personenfähigkeit der ProbandInnen unterhalb der oberen Standardabweichung der Aufgabenschwierigkeit. Die drei darüber liegenden Aufgaben werden kaum von ProbandInnen gelöst (N1.E.01, N2.KBK.0G.06.A und N2.KKB.01). Unten in der Wright-Map also für leichtere Items decken die ProbandInnen hingegen den Bereich bis zur zweiten Standardabweichung der Itemschwierigkeiten ab, wobei auch hier darüber hinaus das leichteste Item (N2.VKB.01) außerhalb dieses Bereichs liegt und nicht von Personen abgedeckt wird. Das Item ist so leicht, dass es von allen ProbandInnen gelöst wird. Bis auf eine Lücke im Bereich der leichten Items werden die Personenfähigkeiten beider Treatmentgruppen von den Itemschwierigkeiten abgedeckt. Es folgt ein interferenzstatistischer Vergleich der Personenfähigkeiten.

Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zeigt keinen signifikanten Unterschied in den Personenfähigkeiten zwischen den SchülerInnen, welche nach der 1D-Adaption ( $\mu = -0.61, \sigma = 0.69$ ) und denen die nach dem 2DD-Mechanikkonzept ( $\mu = -0.68, \sigma = 0.63$ ) unterrichtet wurden. Der Levene-Test auf Verletzung der Varianzhomogenität wird nicht signifikant, weshalb die Varianzen in beiden Treatmentgruppen als gleich angenommen werden können, was auch in den Wright-Maps aus Abbildung 7.1 sichtbar wird. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten beträgt durchschnittlich 0.07  $[-0.02, 0.16]$  Logits,

<sup>22</sup>In dem Ergebnis Kapitel wird stets nur der Rasch-Welch-Tests für die DIF-Analysen berichtet.

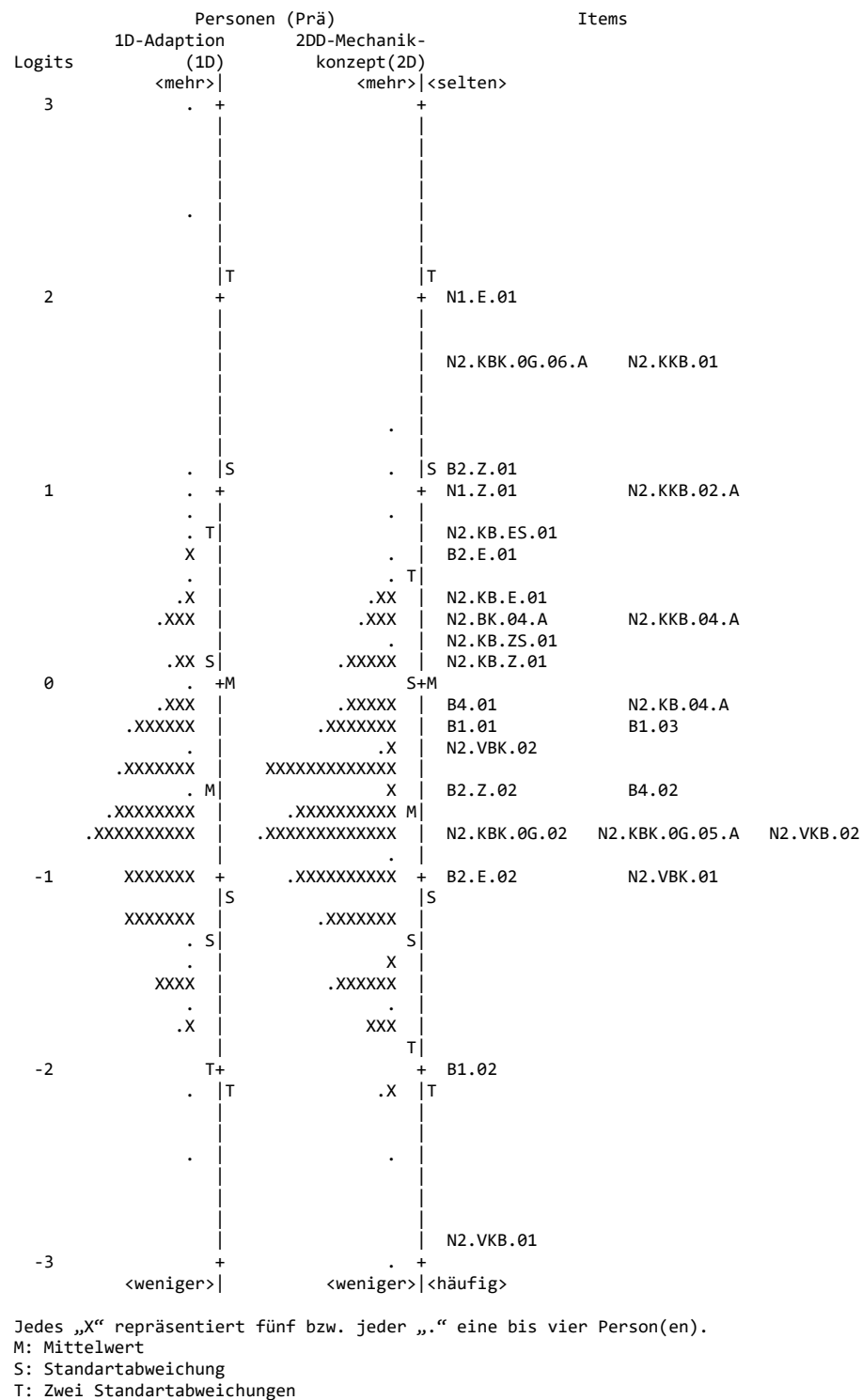


Abbildung 7.1: Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Prätest Personenfähigkeiten beider Treatmentgruppen

$t(817) = 1.54, p = .123^{23}$ ,  $d = 0.11 [-0.03, 0.25]$ . Die Teststärke für einen Effekt dieses Größenordnung liegt für die vorliegende Stichprobe bei  $1 - \beta = .34$ . Die beiden Treatmentgruppen sind also bezogen auf die Prätest Personenfähigkeiten miteinander vergleichbar und werden daher im Laufe der Rasch-Skalierung zum Präzeitpunkt als eine zusammenhängende Gruppe aufgefasst.

### 7.1.2 Bestimmung der Anker-Items

Zur Bestimmung der Anker-Items wurde eine Rasch-Analyse mit dem kompletten Datensatz, das heißt den Prä- und Posttest-Daten beider Treatmentgruppen zusammen, durchgeführt. Für die anschließende DIF-Analyse wurden drei Gruppen definiert: Prätest, Posttest 1D und Posttest 2D. Die Prätest-Daten können aufgrund der zuvor gezeigten Vergleichbarkeit als eine Gruppe angenommen werden. Die Posttest Daten müssen allein schon aufgrund der zwei unterschiedlichen Treatments, welche zu einem unterschiedlichen Lösungsverhalten in den beiden Gruppen führen könnten, als zwei getrennte Gruppen aufgefasst werden. So könnten beispielsweise im Posttest zwischen den beiden Gruppen unterschiedliche Items ein DIF gegenüber den Prätest-Items aufweisen.

Als Anker-Items wurden diejenigen Items bestimmt, die in allen drei Vergleichen (Prä - Post 1D, Prä - Post 2D und Post 1D - Post 2D) keinen signifikanten  $|DIF\text{-Kontrast}| \geq 0.64$  (siehe Anhang Kap. A.1) aufwiesen. Als Ergebnis konnten 21 der 27 Items aus dem Fachwissenstest als Anker-Items gewählt werden. Für die sechs verbleibenden Items sind zur weiteren Diskussion in Tabelle 7.1, gerade im Hinblick auf die Frage wo genau sich die Unterschiede zwischen den drei Gruppen zeigen, die Werte für die DIF-Kontraste mit den entsprechenden Signifikanztests aufgeführt. Die vollständige Auflistung der Analyse für alle 27 Items ist in den Tabellen B.4, B.5 und B.6 im Anhang angegeben.

Die sechs Items lassen sich bezogen auf die Unterschiede in den drei Gruppen in drei verschiedenen Kategorien einteilen:

1. Unterschied zwischen dem Prätest und dem Posttest im Fall beider Treatmentgruppen aber nicht zwischen den Treatmentgruppen im Posttest  
(B4.01, B4.02, N2.KBK.0G.06.A und N2.VKB.02)
2. Unterschied zwischen dem Prätest und dem Posttest im Fall der 1D-Adaption und Unterschied im Posttest zwischen den beiden Treatmentgruppen  
(N2.KKB.01)
3. Unterschied zwischen dem Prätest und Posttest im Fall des 2DD-Mechanikkonzepts und Unterschied im Posttest zwischen den beiden Treatmentgruppen  
(N2.KB.ZS.01)

<sup>23</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zum gleichen Ergebnis mit einem Signifikanzwert  $p > .05$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle.

Die Bonferroni-Holm-Korrektur wird im Anschluss an alle zusammenhängenden t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten in Tabelle 7.2 diskutiert.

Tabelle 7.1: Items mit signifikantem  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.64$  (INF: Freiheitsgrade werden von Winsteps als unendlich angenommen. Reihenfolge der Vergleiche pro Item: 1. Prä - Post 1D, 2. Prä - Post 2D und 3. Post 1D - Post 2D. Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item                  |    | $ \text{DIF} $ -Kontrast | Rasch-Welch-Test                 |
|-----------------------|----|--------------------------|----------------------------------|
| <b>B4.01</b>          | 1. | <b>0.74***</b>           | $t(644) = 5.31, p < .001$        |
|                       | 2. | 0.49***                  | $t(990) = 3.95, p < .001$        |
|                       | 3. | 0.25                     | $t(729) = 1.63, p = .104$        |
| <b>B4.02</b>          | 1. | <b>0.66***</b>           | $t(601) = 4.66, p < .001$        |
|                       | 2. | 0.62***                  | $t(921) = 4.86, p < .001$        |
|                       | 3. | 0.04                     | $t(738) = 0.28, p = .780$        |
| <b>N2.KKB.01</b>      | 1. | <b>0.71***</b>           | $t(871) = 3.96, p < .001$        |
|                       | 2. | 0.02                     | $t(\text{INF}) = 0.13, p = .894$ |
|                       | 3. | <b>0.73***</b>           | $t(803) = 3.80, p < .001$        |
| <b>N2.KBK.0G.06.A</b> | 1. | <b>0.83***</b>           | $t(561) = 3.44, p < .001$        |
|                       | 2. | <b>0.82***</b>           | $t(859) = 3.79, p < .001$        |
|                       | 3. | 0.02                     | $t(739) = 0.06, p = .953$        |
| <b>N2.KB.ZS.01</b>    | 1. | 0.11                     | $t(652) = 0.76, p = .449$        |
|                       | 2. | <b>1.88***</b>           | $t(911) = 13.53, p < .001$       |
|                       | 3. | <b>1.99***</b>           | $t(776) = 12.00, p < .001$       |
| <b>N2.VKB.02</b>      | 1. | <b>0.65***</b>           | $t(579) = 4.45, p < .001$        |
|                       | 2. | 0.54***                  | $t(905) = 4.17, p < .001$        |
|                       | 3. | 0.11                     | $t(730) = 0.68, p = .496$        |

Auch wenn die DIF-Kontrast-Werte in der ersten Kategorie beim Vergleich zwischen dem Prätest und dem Posttest im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts nicht über dem Grenzwert von  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.64$  liegen, sind diese dennoch hoch signifikant und liegen oberhalb des nächstniedrigeren Grenzwerts von  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.43$  (siehe Anhang Kap. A.1). Für einen weiteren Überblick über das Verhalten der Items sind in Abbildung 7.2 die durchschnittlichen Lösungswahrscheinlichkeiten für die drei Gruppen (Prätest, Posttest 1D und Posttest 2D) aufgetragen, wobei die Items von links nach rechts beginnend mit dem leichtesten Item nach ihrer mittleren Schwierigkeit bezogen auf alle drei Gruppen sortiert sind. Die sechs DIF-behafteten<sup>24</sup> aus Tabelle 7.1 sind hierbei rot umrandet. Bis auf wenige Ausnahmen liegt für fast alle Items die Lösungswahrscheinlichkeit im Prätest unterhalb der Lösungswahrscheinlichkeit beider Posttests aufgeteilt nach den Treatments. Bezogen auf den Unterschied im Posttest zwischen den beiden Treatmentgruppen lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen. In dieser Art der Darstellung zeigt sich auch das Verhalten der sechs DIF-behafteten Items. Bei den Items aus Kategorie 1 liegen die Lösungswahrscheinlichkeiten in den beiden Posttest deutlich über der Lösungswahrschein-

<sup>24</sup>Bezeichnung für Items mit signifikanten  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.64$

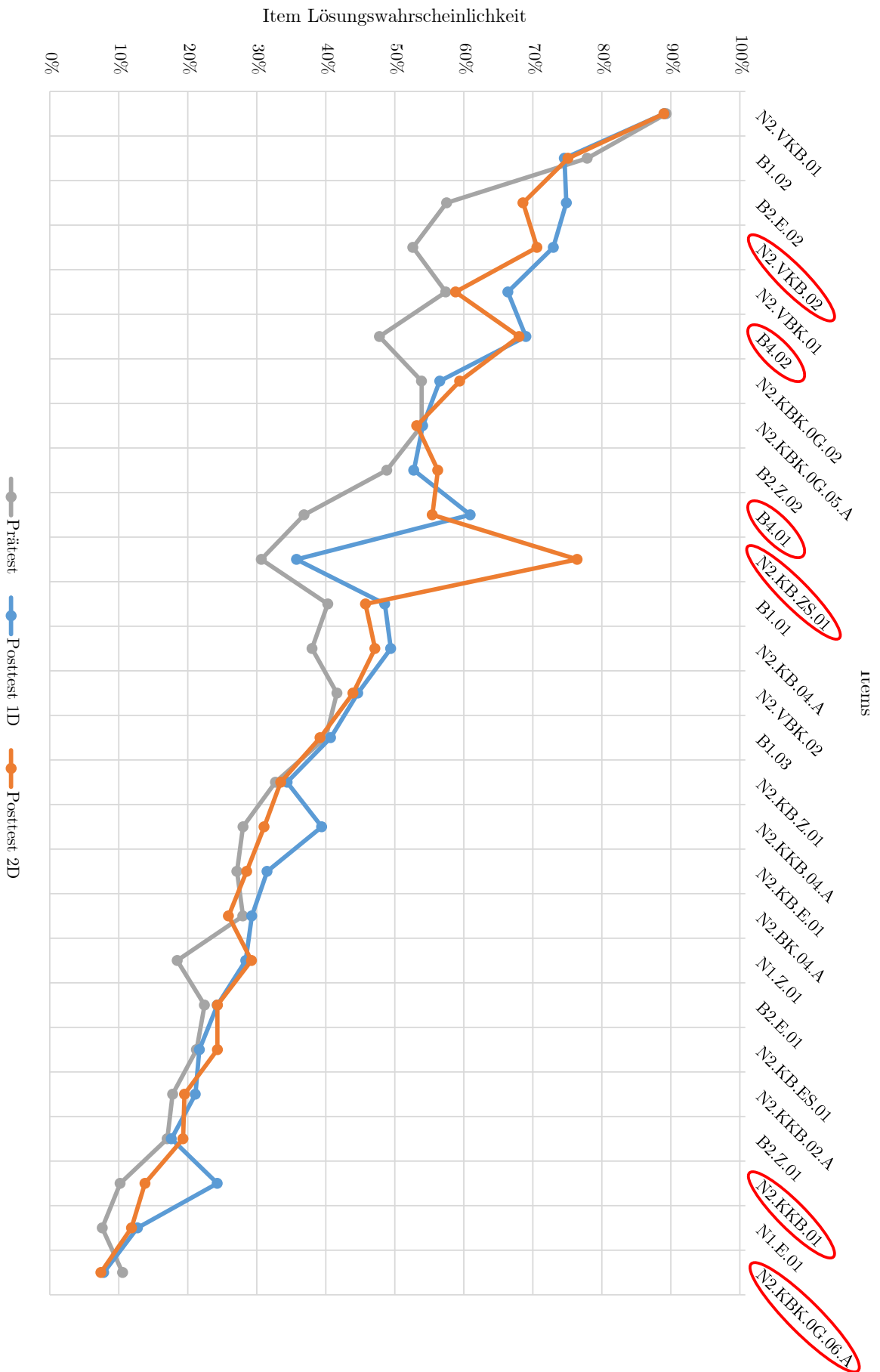


Abbildung 7.2: Itemlösungswahrscheinlichkeit aufgeteilt nach den drei Gruppen der DIF-Analyse (Items mit signifikanten  $|DIF\text{-Kontrast}| \geq 0.64$  sind rot markiert)

lichkeit im Prätest. Die Lösungswahrscheinlichkeit unterscheidet sich hingegen zwischen den beiden Treatmentgruppen nicht stark. Eine entscheidende Ausnahme bildet das zugleich schwerste Item N2.KBK.0G.06.A, denn hier liegt die Lösungswahrscheinlichkeit im Prätest höher. Das Item ist also im Laufe der Intervention für beiden Treatmentgruppen schwerer geworden. Den größten Ausschlag in Abbildung 7.2 gibt es bei dem Item N2.KB.ZS.01 aus Kategorie 3. Hier liegt die Lösungswahrscheinlichkeit im Posttest des 2DD-Mechanikkonzept sehr deutlich oberhalb der Lösungswahrscheinlichkeit im Prätest und auch deutlich oberhalb der im Posttest der 1D-Adaption, welche im Vergleich zum Prätest nur leicht ansteigt. Umgekehrt zeigt sich dies bei Item N2.KKB.01 aus Kategorie 2, auch wenn der Ausschlag im Falle der 1D-Adaption hier nicht groß ist. Insgesamt bilden die Unterschiede in den DIF-behafteten Items (mit Ausnahme von N2.KBK.0G.06.A) die größten sichtbaren Differenzen in Abbildung 7.2, wobei es auch bei den übrigen Anker-Items sichtbare Differenzen gibt, welche aber aufgrund des gewählten Grenzwert im DIF-Kontrast nicht weiter berücksichtigt werden.

Durch die Betrachtung der mittleren Lösungswahrscheinlichkeiten in Abbildung 7.2 sollte hier ein erster Eindruck vom Verhalten der Items aus dem Fachwissenstest gewonnen werden. Zusätzlich konnten durch die genauere Betrachtung der DIF-behafteten Items die zuvor gezeigten Effekte aus der DIF-Analyse in einer anderen Form sichtbar gemacht werden und damit auch die Wahl der Anker-Items anhand der Lösungswahrscheinlichkeiten weiter begründet werden. Eine genauere Analyse der einzelnen Items erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt in Kapitel 7.7. Es folgt die Erläuterung zur Durchführung der eigentlichen Rasch-Analyse für Prä- und Posttestergebnisse in beiden Treatmentgruppen unter Berücksichtigung der bestimmten Anker-Items.

### **7.1.3 Bestimmung der Personenfähigkeiten im Posttest**

Als gemeinsame Itemschwierigkeiten für die Anker-Items werden die Werte aus der Analyse der Prätest-Daten (Kap. 7.1.1) gewählt. Es konnte bereits gezeigt werden, dass die beiden Treatmentgruppen bezogen auf die Personenfähigkeiten zum Präzeitpunkt miteinander vergleichbar sind, die Ausgangslage für beide Gruppen damit also als gleich angesehen werden kann. Die Posttest-Daten empfehlen sich nicht für die Wahl der gemeinsamen Itemschwierigkeiten, da es durch die beiden unterschiedlichen Treatments, wie sich auch schon bereits in der DIF-Analyse gezeigt hat, zu unterschiedlichen Effekten in den einzelnen Items kommen kann. Die mittleren Itemschwierigkeiten aus der gemeinsamen Analyse für die Bestimmung der DIF-Kontraste können auch nicht gewählt werden, da diese Werte potenziell konfundiert sind, aufgrund dessen, dass in dieser Analyse jeder der ProbandInnen der Stichprobe zweimal also mit den Prä- und Posttest-Werten enthalten war. Die Itemschwierigkeiten aus der Prätest-Analyse sind mit den übrigen Fit-Werten der Analyse in Tabelle B.3 (siehe Anhang) aufgeführt. Für die Posttest-Daten der beiden Treatmentgruppen wurden getrennte Rasch-Analysen durchgeführt, wobei für die 21 Anker-Items die Itemschwierigkeiten anhand der Prätest-Analyse fixiert wurden und für die restlichen sechs DIF-behafteten Items jeweils neu geschätzt wurden.

Der Log-Likelihood Chi-Quadrat Test (siehe Kap. A.1) wird für beide Rasch-Analysen nicht signifikant ( $p = .394$  1D-Adaption und  $p = .362$  2DD-Mechanikkonzept), die geschätzten Werte verhalten sich also rasch-konform. Insgesamt ist somit die spezifische Objektivität für die Rasch-Skalierung als Ganzes gegeben. Die Personenreliabilität liegt im Falle der 1D-Adaption bei .67 und die Itemreliabilität bei .99. Im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts liegen die Reliabilitätswerte für die Personen bei .65 und für die Items bei .99. In Tabelle B.7 (siehe Anhang) sind die Itemschwierigkeiten der sechs DIF-behafteten Items für die beiden Posttest-Analysen aufgeführt. Die übrigen Werte stimmen aufgrund der Anker-Itemwahl mit denen der Prätest-Analyse überein. Die aus den Analysen resultierenden Personenfähigkeiten sind erneut in Form von Wright-Maps gegen die Itemschwierigkeiten aufgetragen. Zusätzlich zur bereits vorgestellten Wright-Map für die Gegenüberstellung der Prätest Personenfähigkeiten (Abb. 7.1) ergeben sich drei weitere Wright-Maps zur Gegenüberstellung der Prä- und Posttest-Personenfähigkeiten innerhalb der beiden Treatmentgruppen (Abb. 7.3 1D-Adaption und Abb. 7.4 2DD-Mechanikkonzept) und zum Vergleich der Posttest Personenfähigkeiten zwischen beiden Treatmentgruppen (Abb. 7.5).

Auf diese Wright-Maps und auf die damit verbundenen Ergebnisse wird in den weiteren Kapiteln eingegangen, da diese unmittelbar auf die Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit bezogen werden.

## 7.2 Mehrebenenanalyse

Durch eine Mehrebenenanalyse (siehe Kap. A.4 im Anhang) wird untersucht, ob sich eine hierarchische Struktur in den Daten zeigen lässt, infolgedessen der individuelle Lernzuwachs der SchülerInnen (Ebene 1) von der Klassenzugehörigkeit (Ebene 2) abhängt beziehungsweise durch diese vorhergesagt werden kann. Sollte diese Abhängigkeit bestehen, würde sich entsprechend die Stichprobenzahl der Studie auf die Anzahl der Schulklassen reduzieren, da die Betrachtung der Klassenmittelwerte im Falle einer hierarchischen Struktur die Daten besser abbilden würden. Die Analyse basiert auf den Rasch-skalierten Daten.

Als Ausgangspunkt wird ein **Intercept-only Modell** ohne Prädiktorvariable aufgestellt:

### Intercept-only Modell / Nullmodell

$$\text{Ebene 1: } Y_{ij} = \beta_{0j} + r_{ij} \quad (7.1)$$

$$\text{Ebene 2: } \beta_{0j} = \gamma_{00} + u_{0j} \quad (7.2)$$

$$\text{Gesamtmodell: } Y_{ij} = \gamma_{00} + u_{0j} + r_{ij} \quad (7.3)$$

wobei:

$Y_{ij}$  = Lernzuwachs von SchülerIn  $i$  aus Klasse  $j$

$\beta_{0j}$  = Regressionskoeffizient auf Ebene 1 (mittlere Lernzuwachs in Klasse  $j$ )

$r_{ij}$  = Individuelle Abweichung von SchülerIn  $i$  vom Mittelwert der Klasse  $j$  im Lernzuwachs

$\gamma_{00}$  = Gesamtmittelwert im Lernzuwachs über alle Klassen

$u_{0j}$  = Abweichung der Klasse  $j$  vom Gesamtmittelwert aller Klassen im Lernzuwachs

Für den Regressionskoeffizienten  $\gamma_{00}$  ergibt sich ein Wert von 0.19 ( $\sigma = 0.72$ ),  $t(773) = 7.62$ ,  $p < .001$ , was auch dem mittleren Lernzuwachs über alle SchülerInnen in allen Klassen entspricht. Das Intercept-only Modell weist folgende Modell Fit-Werte auf:

$$\text{AIC} = 1800.27$$

$$\text{BIC} = 1814.39$$

$$\text{logLik} = -897.13$$

Als nächster Schritt soll über die Intraklassenkorrelation (ICC) (siehe Kap. A.4) der Anteil der Varianz zwischen den Gruppen an der Gesamtvarianz des Lernzuwachses berechnet werden. Die Varianz von  $r_{ij}$  und  $u_{0j}$  entsprechen dabei den Varianzen innerhalb und zwischen den Schulklassen.

$$\text{ICC} = \frac{\sigma_{u_{0j}}^2}{\sigma_{u_{0j}}^2 + \sigma_{r_{ij}}^2} = \frac{1.42 \cdot 10^{-8}}{1.42 \cdot 10^{-8} + 0.52} = 2.73 \cdot 10^{-8} \quad (7.4)$$

Der Anteil der Varianz zwischen den Schulklassen an der Gesamtvarianz im Lernzuwachs ergibt sich damit näherungsweise zu Null, was zunächst gegen eine hierarchische Struktur der Daten spricht.

Durch den fast nicht vorhandenen Anteil an der Gesamtvarianz soll nun getestet werden, ob die Zulassung von zufälligen Abweichungen der Klassen vom Gesamtmittelwert überhaupt zu einer besseren Modellanpassung führt. Hierzu wird ein **No-random Modell** ohne Prädiktor formuliert. Dies entspricht dem **Intercept-only Modell** ohne den Koeffizienten  $u_{0j}$  für die Abweichung der Klassen vom Gesamtmittelwert:

### No-random Modell

$$\text{Ebene 1: } Y_{ij} = \beta_{0j} + r_{ij} \quad (7.5)$$

$$\text{Ebene 2: } \beta_{00} = \gamma_{00} \quad (7.6)$$

$$\text{Gesamtmodell: } Y_{ij} = \gamma_{00} + r_{ij} \quad (7.7)$$

wobei:

$Y_{ij}$  = Lernzuwachs von SchülerIn  $i$  aus Klasse  $j$

$r_{ij}$  = Individuelle Abweichung von SchülerIn  $i$  vom Mittelwert der Klasse  $j$  im Lernzuwachs

$\gamma_{00}$  = Gesamtmittelwert im Lernzuwachs über alle Klassen

Das No-Random Modell weist folgende Fit-Werte auf:

AIC = 1798.27

BIC = 1807.68

logLik = -897.13

Die Werte für die AIC und BIC fallen für das No-Random Modell niedriger aus als für das Intercept-Only Modell. Das No-Random Modell passt daher besser auf die vorliegenden Daten, was erneut gegen eine hierarchische Struktur spricht, da durch das Miteinbeziehen der klassenspezifischen Abweichung im Nullmodell kein besserer Modell-Fit erreicht werden kann.

Die bisherigen Befunde, dass die Gruppenzugehörigkeit keinen Einfluss auf die Varianz im Lernzuwachs habe, können auch durch eine ANOVA mit dem Lernzuwachs als abhängige Variable und den Klassen als Gruppenvariable gezeigt werden. Eine entsprechend durchgeführte ANOVA liefert keine signifikante Varianzaufklärung  $F(45, 773) = 1.13, p = .259, \eta^2 = .06$ .

Bisher deutet nichts auf eine hierarchische Struktur der Daten hin. Als letzter Schritt soll an dieser Stelle noch überprüft werden, ob die Hinzunahme der Prädiktor-Variablen auf Individualebene (in diesem Fall die Zugehörigkeit der SchülerInnen zu einer der beiden Treatmentgruppen) zu einer besseren Modellpassung führt. Zu diesem Zweck wird ein **Random-Intercept Modell** formuliert:

**Random-Intercept Modell**

$$\text{Ebene 1: } Y_{ij} = \beta_{0j} + \beta_{1j} \cdot x_{ij} + r_{ij} \quad (7.8)$$

$$\text{Ebene 2: } \beta_{0j} = \gamma_{00} + u_{0j} \quad (7.9)$$

$$\beta_{1j} = \gamma_{10} \quad (7.10)$$

$$\text{Gesamtmodell: } Y_{ij} = \gamma_{00} + \gamma_{10} \cdot x_{ij} + u_{0j} + r_{ij} \quad (7.11)$$

wobei:

$Y_{ij}$  = Lernzuwachs von SchülerIn  $i$  aus Klasse  $j$

$\beta_{0j}$  = Regressionskoeffizient auf Ebene 1 (mittlere Lernzuwachs in Klasse  $j$ )

$x_{ij}$  = Ebene 1 Prädiktor (Art des Treatments von SchülerIn  $i$  aus Klasse  $j$ )

$r_{ij}$  = Individuelle Abweichung von SchülerIn  $i$  vom Mittelwert der Klasse  $j$  im Lernzuwachs

$\gamma_{00}$  = Gesamtmittelwert im Lernzuwachs über alle Klassen

$u_{0j}$  = Abweichung der Klasse  $j$  vom Gesamtmittelwert aller Klassen im Lernzuwachs

$\gamma_{10}$  = Effekt der Zugehörigkeit zur Treatmentgruppe (für alle ProbandInnen gleich)

Für den Regressionskoeffizienten  $\gamma_{00}$  ergibt sich ein Wert von 0.20 ( $\sigma = 1.12$ ),  $t(44) = 5.15$ ,  $p < .001$ , der Koeffizient der Prädiktor-Variablen wird allerdings bei einem Wert von  $\gamma_{10} = -0.02$  ( $\sigma = 0.35$ ) nicht signifikant,  $t(44) = 0.31$ ,  $p < .757$ . Das Random-Intercept Modell weist folgende Fit-Werte auf:

$$\text{AIC} = 1806.28$$

$$\text{BIC} = 1825.10$$

$$\text{logLik} = -899.14$$

Alle Fit-Werte sprechen dafür, dass auch bei Hinzunahme einer Prädiktor-Variablen das No-Random Modell von allen drei Modellen die beste Modellpassung besitzt, wodurch abschließend gesagt werden kann, dass von einer hierarchischen Struktur der Daten abgesehen werden sollte. Die Stichprobe kann als aus individuellen SchülerInnen zusammengesetzt betrachtet werden.

## 7.3 Lernzuwächse innerhalb der Treatmentgruppen

Zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage werden die Personenfähigkeiten zum Prä- und Posttestzeitpunkt innerhalb beider Treatmentgruppen miteinander verglichen, um so eine Aussage über die Entwicklung der SchülerInnen aufgrund des Unterrichts nach der entsprechenden Elementarisierung machen zu können.

### 7.3.1 Lernzuwachs in der 1D-Adaption

Die gemeinsame Wright-Map mit der Gegenüberstellung der Prä- und Posttest Personenfähigkeiten für die 1D-Adaption ist in Abbildung 7.3 gezeigt. Vergleicht man die Verteilung der Personenfähigkeiten zu beiden Zeitpunkten, ist das Histogramm zum Postzeitpunkt leicht abgeflacht, hat also eine größere Standardabweichung, und ist nach oben verschoben. Dies zeigt sich auch in den Mittelwerten und Standardabweichungen. Zum Präzeitpunkt lag die mittlere Personenfähigkeit bei  $\mu = -0.61$  ( $\sigma = 0.69$ ), zum Posttestzeitpunkt liegt diese nun durchschnittlich bei  $\mu = -0.41$  ( $\sigma = 0.86$ ). Dieser Unterschied oder auch Lernzuwachs von durchschnittlich 0.20 [0.13, 0.27] Logits ist nach einem zweiseitigen t-Test für verbundene Stichproben höchst signifikant,  $t(345) = 5.49$ ,  $p < .001^{25}$ ,  $d = 0.30$  [0.19, 0.40].

Betrachtet man die Entwicklung der Itemschwierigkeiten in den DIF-behafteten Items, so haben die Items N2.KKB.01, B4.01, B4.02 und N2.VKB.02 zum Posttestzeitpunkt eine geringere Itemschwierigkeit als zuvor. Das Item N2.KB.ZS.01 bleibt nahezu unverändert und das Item N2.KBK.0G.06.A nimmt an Schwierigkeit zu. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit der erwarteten Entwicklung der Itemschwierigkeiten aus der DIF-Analyse. Die Verschiebung führt dazu, dass nun die zuvor bestehende Lücke im Bereich der leichten Items besser abgedeckt wird. Auch wenn die Lücke hin zum leichtesten Item dennoch bestehen bleibt. Dafür ergibt sich zum Posttestzeitpunkt eine größere Lücke zum Bereich der zwei schwersten Items durch die Verschiebung von N2.KBK.0G.06.A. Insgesamt kann aber gesagt werden, dass zum Postzeitpunkt die Verteilung der Personenfähigkeiten besser von den Itemschwierigkeiten abgedeckt wird.

### Vergleich der Effektstärke mit der Vorstudie

Zur Einordnung der Effektstärke für die Lernzuwächse können diese in Relation zur Effektstärke der Vorstudie (Kap. 6.5.5.2) gesetzt werden, welche quasi-längsschnittlich einen hoch signifikanten Lernzuwachs aufgrund des Mechanikunterrichts in der Sekundarstufe I bei einem Cohens  $d = 0.35$  [0.14, 0.57] gezeigt hat. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse auf einer gleichen Skala wurde eine zusätzliche Rasch-Skalierung der Daten aus

<sup>25</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zum gleichen Ergebnis mit einem Signifikanzwert  $p < .001$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle.

Die Bonferroni-Holm-Korrektur wird im Anschluss an alle zusammenhängenden t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten in Tabelle 7.2 diskutiert.

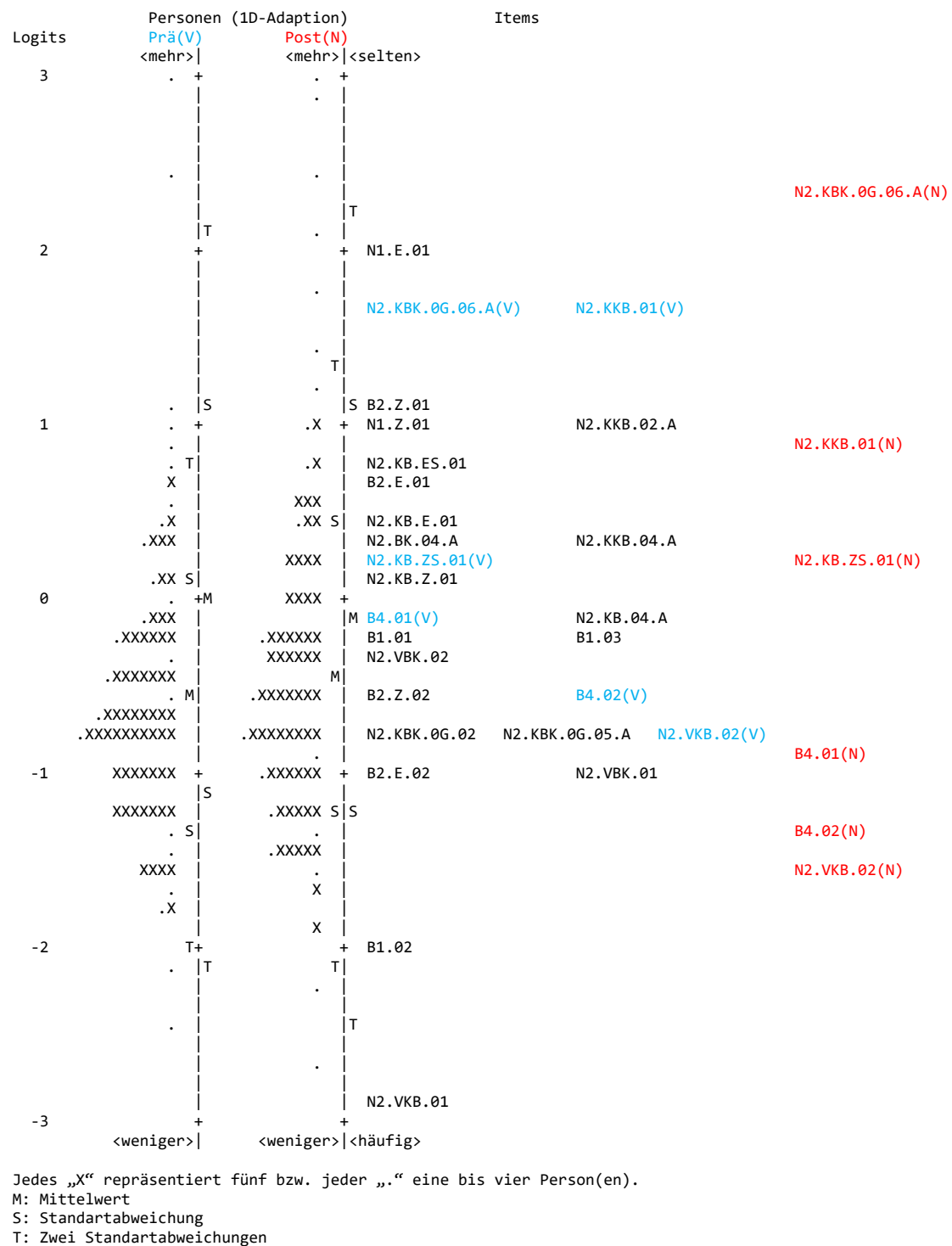


Abbildung 7.3: Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Prä- und Posttest Personenfähigkeiten für die Treatmentgruppe der 1D-Adaption (Anker-Items schwarz dargestellt)

der Vorstudie mit den verankerten Itemschwierigkeiten aus Kapitel 7.1.2 vorgenommen. Ein zweiseitiger t-Tests für unabhängige Stichproben zeigt auch hier einen wieder hoch signifikanten Unterschied in den Personenfähigkeiten zwischen den SchülerInnen, welche noch keinen und denen die bereits Mechanikunterricht hatten,  $t(307.79) = 2.87, p < .01, d = 0.31 [0.10, 0.53]$ . Der Levene-Test auf Verletzung der Varianzhomogenität wird signifikant, weshalb zur Korrektur die Freiheitsgrade des t-Tests reduziert wurden. Die Effektstärke fällt etwas geringer aus, stimmt aber im Rahmen des Konfidenzintervalls mit dem Ergebnis der Vorstudie überein.

### 7.3.2 Lernzuwachs im 2DD-Mechanikkonzept

Die gemeinsame Wright-Map zur Gegenüberstellung der Prä- und Posttest Personenfähigkeiten für das 2DD-Mechanikkonzept ist in Abbildung 7.4 gezeigt. Auch hier erscheint die Verteilung der Personenfähigkeiten im Vergleich zum Posttestzeitpunkt abgeflachter und nach oben verschoben. Die zeigt sich ebenfalls anhand der Mittelwerte und Standardabweichungen. Zum Präzeitpunkt lag die mittlere Personenfähigkeit bei  $\mu = -0.68$  ( $\sigma = 0.63$ ), zum Posttestzeitpunkt liegt diese nun durchschnittlich bei  $\mu = -0.49$  ( $\sigma = 0.82$ ). Auch dieser Lernzuwachs im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts von durchschnittlich 0.19 [0.12, 0.25] Logits ist nach einem zweiseitigen t-Test für verbundene Stichproben höchst signifikant,  $t(472) = 5.38, p < .001^{26}$ ,  $d = 0.25 [0.16, 0.34]$ .

Betrachtet man die Entwicklung der Itemschwierigkeiten in den DIF-behafteten Items, so weisen die Items N2.KB.ZS.01, B4.01, B4.02 und N2.VKB.02 zum Posttestzeitpunkt eine geringere Itemschwierigkeit auf als zuvor. Das Item N2.KKB.01 wird geringfügig leichter und das Item N2.KBK.0G.06.A nimmt auch hier an Schwierigkeit zu. Dieses Ergebnis deckt sich erneut mit der erwarteten Entwicklung der Itemschwierigkeiten aus der DIF-Analyse. Die Verschiebung führt auch in diesem Fall dazu, dass die zuvor bestehende Lücke im Bereich der leichten Item besser abgedeckt wird, wobei die Lücke zum leichtesten Item auch hier bestehen bleibt. Dadurch, dass sich die Itemschwierigkeit von N2.KKB.01 nur geringfügig verändert, entsteht im Bereich der schweren Item keine so große Lücke wie bei der 1D-Adaption, auch wenn hier die drei schwersten Items fast gar nicht durch die Personenfähigkeiten abgedeckt werden. Insgesamt kann aber auch hier gesagt werden, dass zum Postzeitpunkt die Verteilung der Personenfähigkeiten besser von den Itemschwierigkeiten abgedeckt wird.

<sup>26</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zum gleichen Ergebnis mit einem Signifikanzwert  $p < .001$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle.

Die Bonferroni-Holm-Korrektur wird im Anschluss an alle zusammenhängenden t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten in Tabelle 7.2 diskutiert.

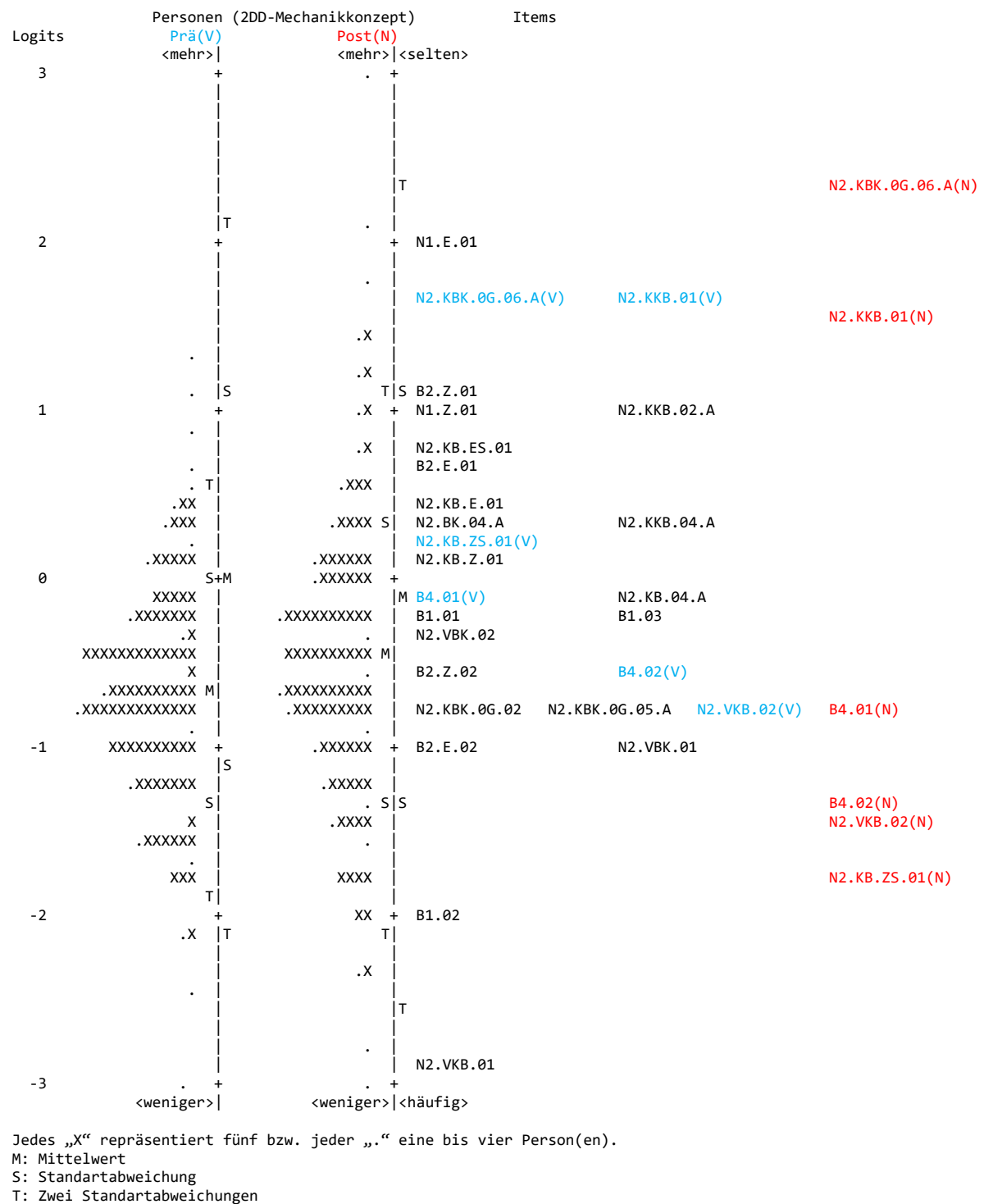


Abbildung 7.4: Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Prä- und Posttest Personenfähigkeiten für die Treatmentgruppe des 2DD-Mechanikkonzepts (Anker-Items schwarz dargestellt)

## 7.4 Vergleich der beiden Treatmentgruppen

Für die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage wurden zwei Aspekte betrachtet. Zum einen wurden die Posttest Personenfähigkeiten beider Treatmentgruppen miteinander verglichen. Dies ist möglich, da bereits gezeigt wurde, dass die Prätest Personenfähigkeiten als vergleichbare Ausgangslage angenommen werden können. Zum anderen wurde, um die Prätest Personenfähigkeiten für jeden der ProbandInnen individuell zu berücksichtigen, die Differenz zwischen den Post- und Prätest Personenfähigkeiten für beide Treatmentgruppen gebildet, um dadurch den Lernzuwachs der einzelnen SchülerInnen abzubilden. Diese Lernzuwächse, von denen zuvor bereits gezeigt wurde, dass diese im Durchschnitt für beide Treatmentgruppen auch vorhanden sind, wurden dann miteinander verglichen.

Die gemeinsame Wright-Map zur Gegenüberstellung der Posttest Personenfähigkeiten für beide Treatmentgruppen ist in Abbildung 7.5 gezeigt. Sowohl bezogen auf den Mittelwert als auch auf die Standardabweichung der beiden Verteilungen, erscheinen diese in der Darstellung ähnlich bis gleich. Im Fall der 1D-Adaption lag die mittlere Posttest Personenfähigkeit bei  $\mu = -0.41$  ( $\sigma = 0.86$ ) und im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts bei  $\mu = -0.49$  ( $\sigma = 0.82$ ). Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zeigt keinen signifikanten Unterschied in den Posttest Personenfähigkeiten der beiden Treatmentgruppen. Der Unterschied beträgt durchschnittlich 0.09  $[-0.03, 0.20]$  Logits zu Gunsten der 1D-Adaption,  $t(817) = 1.47, p = .142^{27}$ ,  $d = 0.11 [-0.03, 0.25]$ . Die Teststärke für die vorliegende Stichprobe liegt bei  $1 - \beta = .34$ . Die Wahrscheinlichkeit keinen Effekt in der entsprechenden Größenordnung zu finden, obwohl dieser eigentlich vorliegt, beträgt also 66 %. Die bisherigen Ergebnisse zum Vergleich der Personenfähigkeiten sind in Abbildung 7.6 nochmal zusammengefasst.

Die Verteilung der Itemschwierigkeiten über die Posttest Personenfähigkeiten wurde bereits in den Kapiteln 7.3.1 und 7.3.2 beschrieben. In Bezug auf die DIF-behafteten Items wird auch hier nochmal deutlich, dass die Items N2.KBK.0G.06.A, B4.01, B4.02 und N2.VKB.02 bei beiden Treatmentgruppen auf einem ähnlichen Schwierigkeitsniveau liegen. Das Item N2.KKB.01 ist für die Treatmentgruppen der 1D-Adaption deutlich leichter und hingegen das Item N2.KB.ZS.01 im Fall des 2DD-Mechanikkonzepts.

<sup>27</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zum gleichen Ergebnis mit einem Signifikanzwert  $p > .05$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle.

Die Bonferroni-Holm-Korrektur wird im Anschluss an alle zusammenhängenden t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten in Tabelle 7.2 diskutiert.

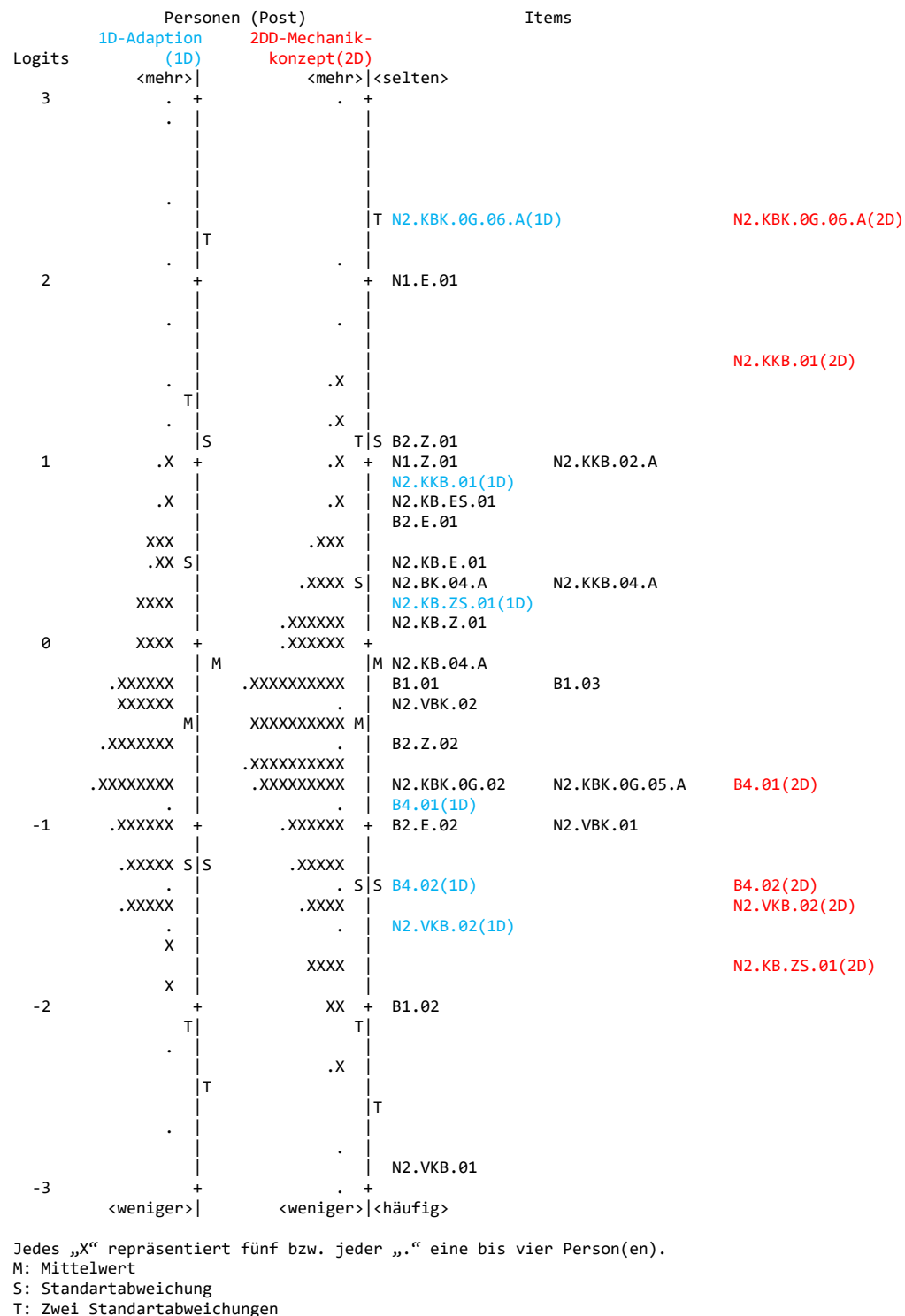


Abbildung 7.5: Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Posttest Personenfähigkeiten beider Treatmentgruppen (Anker-Items schwarz dargestellt)

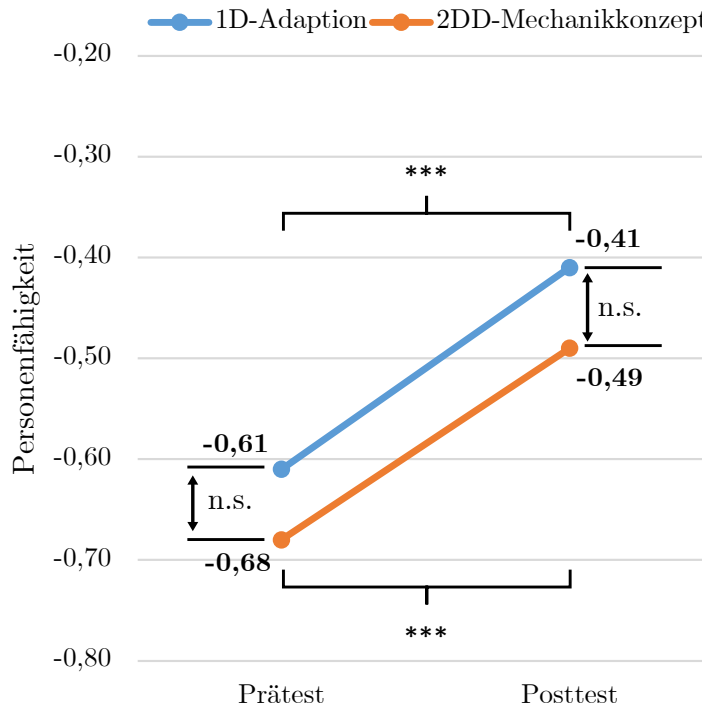


Abbildung 7.6: Zusammenfassung der t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten (Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

Zum Vergleich der Lernzuwächse zwischen den beiden Treatmentgruppen wird erneut ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben angewendet, welcher keinen signifikanten Unterschied im Lernzuwachs zwischen den SchülerInnen mit Unterricht nach der 1D-Adaption ( $\mu = 0.20, \sigma = 0.68$ ) und nach dem 2DD-Mechanikkonzept ( $\mu = 0.19, \sigma = 0.75$ ) zeigt. Der Lernzuwachs in den beiden Treatmentgruppen unterscheidet sich durchschnittlich um 0.02  $[-0.08, 0.11]$  Logits,  $t(817) = 0.30, p = .761^{28}$ ,  $d = 0.02 [-0.12, 0.16]$ . Die Effektstärke ist mit  $d = 0.02$  verschwindend gering. Entsprechend gering fällt auch die Teststärke für den Nachweis einer entsprechenden Effektstärke mit  $1 - \beta = .09$  aus. Wie bei den bisher durchgeführten t-Tests angemerkt, folgt die Bonferroni-Holm Korrektur für die zusammenhängenden t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten.

<sup>28</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zum gleichen Ergebnis mit einem Signifikanzwert  $p > .05$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich erst ab der dritten Nachkommastelle.

Die Bonferroni-Holm-Korrektur wird im Anschluss an alle zusammenhängenden t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten in Tabelle 7.2 diskutiert.

### Bonferroni-Holm-Korrektur für die Vergleiche der Personenfähigkeiten

Für die Bonferroni-Holm Korrektur (siehe Kap. A.2.5) wurden die bisherigen t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten ( $n = 5$ ) zunächst aufsteigend nach ihren  $p$ -Werten geordnet, so dass der niedrigste  $p$ -Wert entsprechend dem Algorithmus auch die größte Korrektur erfährt. Die vollständige Bonferroni-Holm-Korrektur ist in Tabelle 7.2 aufgeführt.

Tabelle 7.2: Bonferroni-Holm-Korrektur für die Vergleiche der Personenfähigkeiten

| t-Test                                             | $p$ -Wert                | Bonferroni-Holm<br>Korrektur ( $n = 5$ ) | Adjustierter<br>$p$ -Wert $p^*$ |
|----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
| Lernzuwachs in der<br>1D-Adaption                  | $p = 7.84 \cdot 10^{-8}$ | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 3.92 \cdot 10^{-7}$      |
| Lernzuwachs im<br>2DD-Mechanik-<br>konzept         | $p = 1.19 \cdot 10^{-7}$ | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = 4.76 \cdot 10^{-7}$      |
| Vergleich der Prätest<br>Personenfähigkeiten       | $p = .123$               | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .369$                    |
| Vergleich der<br>Posttest Personen-<br>fähigkeiten | $p = .142$               | $p^* = p \cdot (n - 3)$                  | $p^* = .284$                    |
| Vergleich der<br>Lernzuwächse                      | $p = .761$               | $p^* = p \cdot (n - 4)$                  | $p^* = .761$                    |

Den adjustierten  $p$ -Werten kann entnommen werden, dass sich auch nach der Bonferroni-Holm Korrektur die zuvor bestimmten Signifikanzniveaus nicht ändern.

## 7.5 Auswertung nach klassischer Testtheorie

In den bisherigen empirischen Studien zum 2DD-Mechanikkonzept wurden keine Rasch-Skalierungen der Daten vorgenommen, sondern die Ergebnisse durch Bildung von Summenwerten in den durchgeführten Fachwissenstests bestimmt. Um einen Anschluss an die bisherigen Studien zu ermöglichen und zusätzlich die Effektstärken in Relation zu denen der anderen Arbeiten stellen zu können, wird an dieser Stelle ebenfalls eine Auswertung der Daten aus dem Fachwissenstest nach klassischer Testtheorie durch Bildung von Summenwerten<sup>29</sup> vorgenommen. In diesem Zuge werden nicht bearbeitete Items mit Null anstatt wie zuvor mit *leer* codiert.

Zu Beginn werden die Prätestergebnisse der beiden Treatmentgruppen miteinander verglichen, um auch hier die Vergleichbarkeit der beiden Gruppen vor der Durchführung der Treatments zu überprüfen. Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben ergibt, dass sich die SchülerInnen in den beiden Treatmentgruppen hinsichtlich ihrer Prätestergebnisse im Fachwissenstest nicht signifikant voneinander unterscheiden. Die SchülerInnen, welche nach der 1D-Adaption unterrichtet wurden, erreichen im Durchschnitt  $\mu = 10.11$  ( $\sigma = 3.24$ ) gegenüber denen, die nach dem 2DD-Mechanikkonzept unterrichtet wurden ( $\mu = 9.87$ ,  $\sigma = 3.00$ ). Die Punktzahl im Fall der 1D-Adaption liegt also um durchschnittlich 0.24  $[-0.19, 0.67]$  Punkte höher als im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts,  $t(817) = 1.10$ ,  $p = .273$ ,  $d = 0.08$   $[-0.06, 0.22]$ . Die Teststärke zum Nachweis einer entsprechenden geringen Effektstärke fällt bei der vorliegenden Stichprobe mit  $1 - \beta = .20$  sehr gering aus. Die beiden Treatmentgruppen sind also bezogen auf ihre Prätestergebnisse im Fachwissenstest miteinander vergleichbar.

Im Sinne von Forschungsfrage 1 wird getestet, ob in den beiden Treatmentgruppen ein Lernzuwachs vorliegt. Die SchülerInnen, welche nach der 1D-Adaption unterrichtet wurden, erreichen im Posttest durchschnittlich  $\mu = 11.80$  ( $\sigma = 4.00$ ) Punkte und damit 1.69  $[1.34, 2.04]$  Punkte mehr als im Prätest. Dieser Lernzuwachs ist nach einem zweiseitigen t-Test für verbundene Stichproben höchst signifikant,  $t(345) = 9.46$ ,  $p < .001$ ,  $d = 0.51$   $[0.40, 0.62]$ . Analog zeigt ein zweiseitiger t-Test für verbundene Stichproben ebenfalls einen höchst signifikanten Lernzuwachs für die SchülerInnen, welche nach dem 2DD-Mechanikkonzept unterrichtet wurden. Diese erreichen im Posttest durchschnittlich  $\mu = 11.71$  ( $\sigma = 3.83$ ) Punkte und damit 1.84  $[1.53, 2.16]$  Punkte mehr als im Prätest,  $t(472) = 11.58$ ,  $p < .001$ ,  $d = 0.53$   $[0.44, 0.63]$ .

Abschließend werden die mittleren Lernzuwächse zwischen den beiden Treatmentgruppen in Bezug auf Forschungsfrage 2 miteinander verglichen. Ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zeigt keinen signifikanten Unterschied im Lernzuwachs zwischen der 1D-Adaption ( $\mu = 1.69$ ,  $\sigma = 3.31$ ) und dem 2DD-Mechanikkonzept ( $\mu = 1.84$ ,  $\sigma = 3.46$ ). Der Unterschied im Lernzuwachs beträgt durchschnittlich 0.15  $[-0.32, 0.64]$  Punkte zu Gunsten des 2DD-Mechanikkonzepts,  $t(817) = 0.66$ ,  $p = .510$ ,  $d = 0.05$   $[0.09, 0.19]$ . Die Teststärke ergibt sich bei der vorliegenden Stichprobe zu  $1 - \beta = .11$ . Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.7 zusammengefasst.

<sup>29</sup>Vorherige Zwischenstände mit Teilstichproben, welche nach dieser Art ausgewertet wurden, sind bereits in Seiter et al. (2021a, 2021b) veröffentlicht.

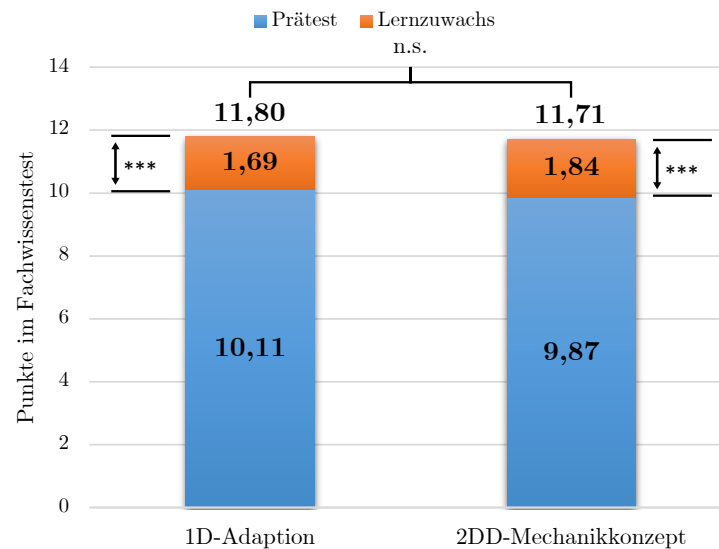


Abbildung 7.7: Zusammenfassung der Auswertung nach klassischer Testtheorie durch die Bildung von Summenwerten (Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt für alle hier durchgeführten t-Tests zu den gleichen Ergebnissen mit entsprechenden Signifikanzwerten. Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenzen unterscheiden sich im Falle aller t-Tests erst ab der zweiten Nachkommastelle. Analog zu den zuvor durchgeführten t-Tests für den Vergleich der Personenfähigkeiten wird auch hier eine Bonferroni-Holm-Korrektur für die zusammenhängenden t-Tests zum Vergleich der Prä- und Posttestergebnisse im Fachwissenstest vorgenommen.

### Bonferroni-Holm-Korrektur für den Vergleich der Prä- und Posttestergebnisse im Fachwissenstest

Wie schon zuvor wurden die durchgeführten t-Tests zum Vergleich der Prä- und Posttestergebnisse im Fachwissenstest ( $n = 4$ ) aufsteigend nach ihren  $p$ -Werten geordnet und anschließend die Bonferroni-Holm-Korrektur vorgenommen, welche in Tabelle 7.3 aufgeführt ist. Den adjustierten  $p$ -Werten kann entnommen werden, dass sich nach der Bonferroni-Holm Korrektur die zuvor bestimmten Signifikanzniveaus nicht ändern.

Die Ergebnisse bezüglich der Forschungsfragen dieser Arbeit bleiben auch bei einer Auswertung nach klassischer Testtheorie erhalten. Im Unterschied zur Rasch-Analyse fallen allerdings die Effektstärken der Lernzuwächse für beide Treatmentgruppen größer aus, wobei es keine Überschneidung der 95 % Konfidenzintervalle zwischen den beiden Auswertungsmethoden gibt. Es bleibt also zu diskutieren, wie dieser Unterschied zustande kommt und wie verlässlich die Ergebnisse der beiden Auswertungsmethoden im Vergleich sind.

Tabelle 7.3: Bonferroni-Holm-Korrektur für den Vergleich der Prätestergebnisse und der Lernzuwächse im Fachwissenstest

| t-Test                                     | <b>p-Wert</b>             | <b>Bonferroni-Holm<br/>Korrektur (<math>n = 4</math>)</b> | <b>Adjustierter<br/>p-Wert <math>p^*</math></b> |
|--------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Lernzuwachs im<br>2DD-Mechanik-<br>konzept | $p = 1.89 \cdot 10^{-27}$ | $p^* = p \cdot n$                                         | $p^* = 7.56 \cdot 10^{-27}$                     |
| Lernzuwachs in<br>der 1D-Adaption          | $p = 5.01 \cdot 10^{-19}$ | $p^* = p \cdot (n - 1)$                                   | $p^* = 1.50 \cdot 10^{-18}$                     |
| Vergleich der<br>Prätestergebnisse         | $p = .273$                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                                   | $p^* = .546$                                    |
| Vergleich der<br>Lernzuwächse              | $p = .510$                | $p^* = p \cdot (n - 3)$                                   | $p^* = .510$                                    |

## 7.6 Bildung von Leistungsklassen

In diesem Abschnitt wird der Frage nachgegangen, ob die Interventionen für verschiedene SchülerInnen in unterschiedlicher Weise wirken. Dazu wurden die SchülerInnen nach ihrem Lösungsverhalten in Klassen eingeteilt und deren Entwicklung verglichen. Die Unterklassen wurden mit Hilfe von latenten Klassenanalysen (siehe Anhang Kap. A.3) getrennt nach Prä- und Posttestzeitpunkt für beide Treatmentgruppen zusammen über alle 27 Aufgaben des Fachwissenstests bestimmt, um die Entwicklung der SchülerInnen über die Intervention sowie einen möglichen Wechsel zwischen den Unterklassen abbilden zu können. Für beide Testzeitpunkte wurden Modelle mit aufsteigenden Anzahlen von einer bis sieben latenten Klassen analysiert und die optimale Lösung anhand des BICs ausgewählt. In Tabelle 7.4 sind die BIC der verschiedenen Modelle aufgeführt, wobei der niedrigste Wert als optimale Lösung markiert wurde. Die optimale Lösung ergibt sich für beide Testzeitpunkte bei einer Anzahl von zwei latenten Klassen.

Tabelle 7.4: BIC-Werte für Modelle mit verschiedenen Anzahlen von latenten Klassen

| Latente Klassen       | 1     | <u>2</u>     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     |
|-----------------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>BIC (Prätest)</b>  | 50918 | <u>50786</u> | 51100 | 51431 | 51797 | 52260 | 52571 |
| <b>BIC (Posttest)</b> | 49312 | <u>48758</u> | 48806 | 49215 | 49607 | 49742 | 50156 |

In den Abbildungen 7.8 und 7.9 sind die Lösungswahrscheinlichkeiten der beiden Klassen für alle 27 Items für den Prä- und Posttest aufgetragen. Die Reihenfolge der Items entspricht von links nach rechts der zunehmenden Itemschwierigkeit anhand der zuvor bestimmten Anker-Items aus der Rasch-Analyse. Aufgrund der DIF-behafteten Items kann es allerdings zu Unterschieden in der Reihenfolge zwischen den beiden Testzeitpunkten in den DIF-behafteten Items kommen, da diese in der Itemschwierigkeit variieren können. Zur besseren Übersicht und Vergleichbarkeit der Abbildungen wurde die Reihenfolge in beiden Abbildungen anhand der Itemschwierigkeiten im Prätest festgelegt und die DIF-behafteten Items gesondert markiert.

Im Prätest (Abb. 7.8) gibt es zwischen den beiden Klassen bei fünf Items eine Überschneidung der Lösungswahrscheinlichkeiten, wobei diese bei zwei Items sehr gering (N2.VKB.01 und N2.KB.E.01) und bei den anderen drei (B2.Z.02, B4.01 und N2.KB.ZS.01) deutlich ausfällt. Bei zwei dieser Items handelt es sich darüber hinaus um DIF-behaftete Items. Wodurch diese Überschneidung zwischen den beiden Klassen entstanden sein könnte, wird in der Betrachtung der Einzelitems in Kapitel 7.7 analysiert. Bei allen anderen Items liegt die Lösungswahrscheinlichkeit der orange dargestellten Gruppe oberhalb der blauen, weshalb diese als starke und die andere als schwache Leistungsklasse definiert wird. Für die starke Klasse liegen im Prätest 18 Items oberhalb der mittleren Lösungswahrscheinlichkeit der schwachen Klasse und fünf Items unterhalb der Ratewahrscheinlichkeit; für die schwache Leistungsklasse liegen insgesamt nur sechs Items oberhalb der mittleren Lösungswahrscheinlichkeit der starken Klasse und neun Items unterhalb der Ratewahrscheinlichkeit.

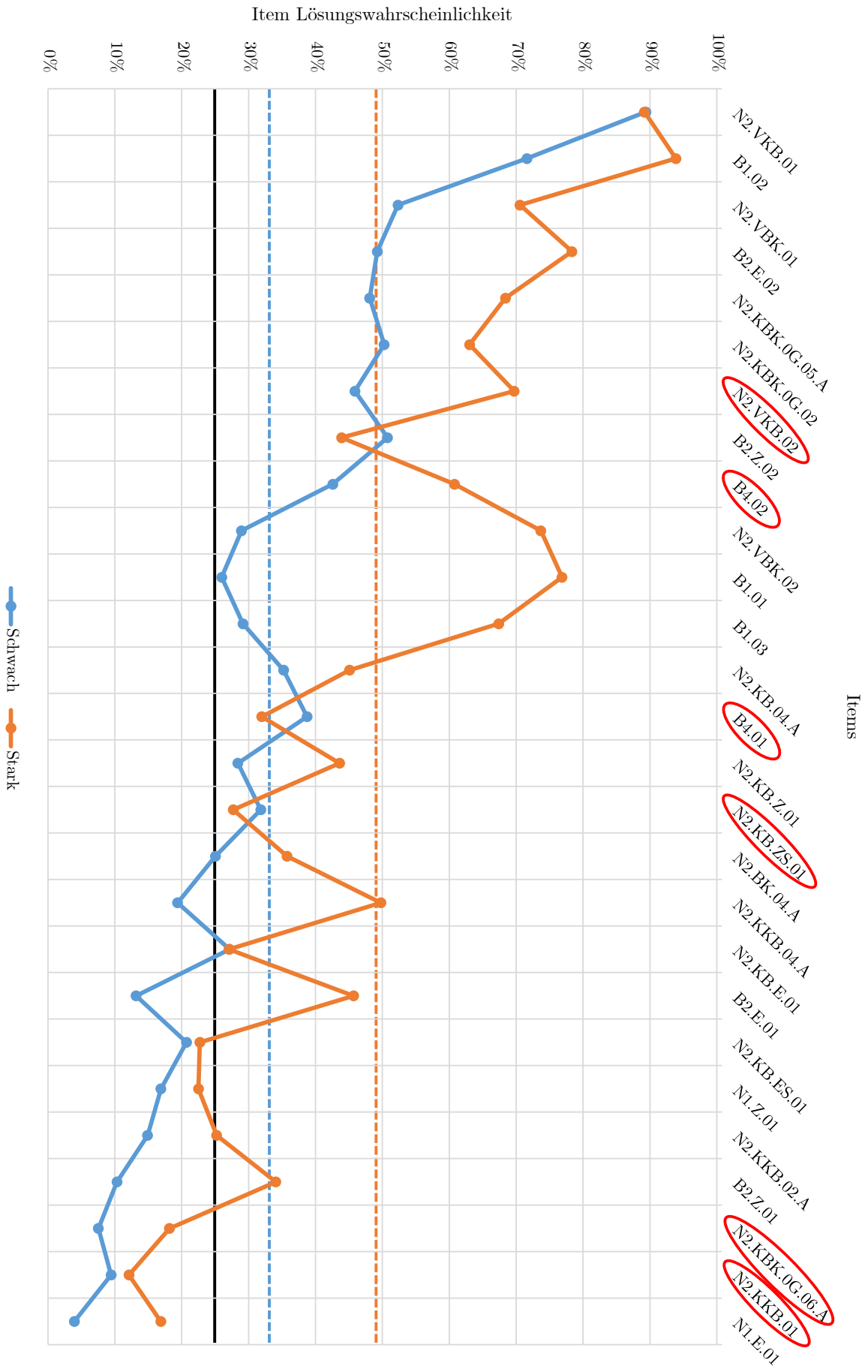


Abbildung 7.8: Itemlösungswahrscheinlichkeit der zwei Leistungsklassen im Prätest (Mittelwerte sind gestrichelt und DIF-behaftete Items rot markiert, die durchgezogene Linie entspricht der Ratewahrscheinlichkeit)

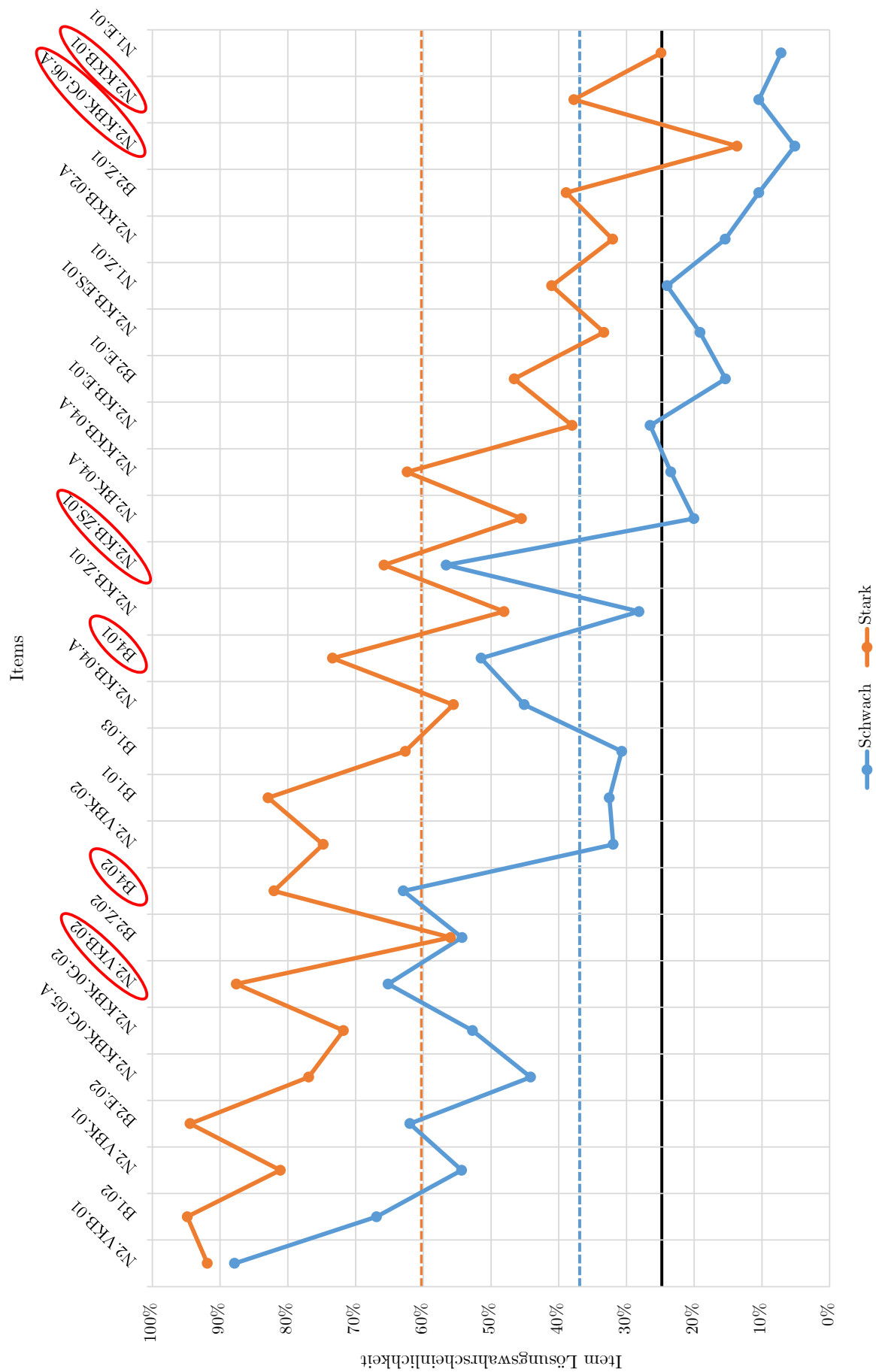


Abbildung 7.9: Itemlösungswahrscheinlichkeit der zwei Leistungsklassen im Posttest (Mittelwerte sind gestrichelt und DIF-behaftete Items rot markiert, die durchgezogene Linie entspricht der Ratewahrscheinlichkeit)

Die SchülerInnen der stärkere Klasse lösen im Prätest die zwölf leichtesten Items (mit Ausnahme von B2.Z.02) mit einer Wahrscheinlichkeit von über 50 %, wogegen die der schwache Klasse nur ungefähr die ersten acht Items zu 50 % lösen können. Im Posttest (Abb. 7.9) werden die Unterschiede in den beiden Leistungsklassen noch deutlicher. Die Lösungswahrscheinlichkeit liegt für die starke Leistungsklasse bei allen 27 Items oberhalb der Schwachen. Zusätzlich liegen nun für die starke Leistungsklasse 23 Items oberhalb der mittleren Lösungswahrscheinlichkeit der schwachen Gruppe und nur noch ein Item unterhalb der Ratewahrscheinlichkeit; für die schwache Leistungsklasse liegen im Posttest noch fünf Items oberhalb der mittleren Lösungswahrscheinlichkeit der starken Gruppe und zehn Items unterhalb der Ratewahrscheinlichkeit. Die starke Leistungsklasse hat also auf einzelnen Items mehr dazugelernt als die schwache Leistungsklasse, so dass die Differenzen in den Lösungswahrscheinlichkeiten zwischen den beiden Klassen zugenommen haben. Die Besetzung der beiden Leistungsklassen ist für den Prä- und Posttest aufgeteilt nach Treatmentgruppen in Abbildung 7.10 dargestellt.

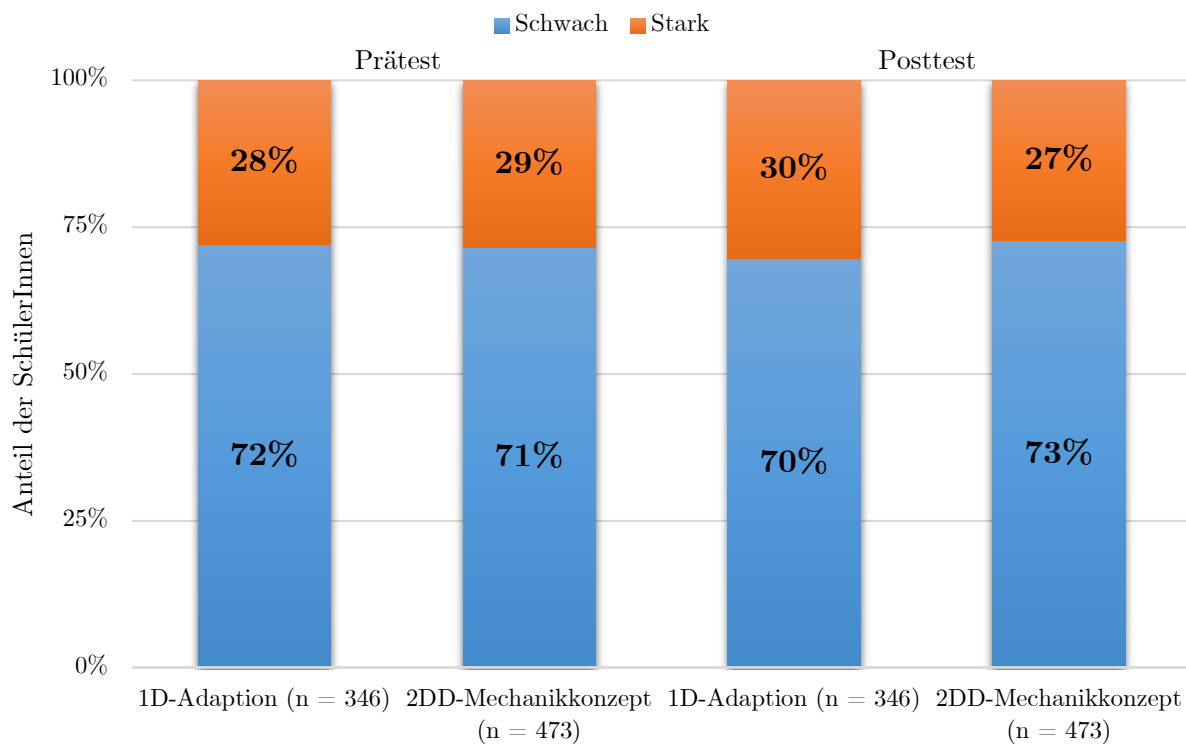


Abbildung 7.10: Verteilung der SchülerInnen beider Treatmentgruppen auf die Leistungsklassen zu beiden Testzeitpunkten

Der Hauptanteil der SchülerInnen gehört, auf beide Treatmentgruppen in etwa gleich verteilt, zu beiden Testzeitpunkten mit ca. 70 % der schwachen Leistungsklassen an, die restlichen SchülerInnen hingegen gehören mit den restlichen ca. 30 % der starken Leistungsklasse an.

Die Entwicklung der Leistungsklassen zwischen den beiden Testzeitpunkten kann Tabelle 7.5 entnommen werden. Für die 1D-Adaption verbleiben 60 % der SchülerInnen in der schwachen Leistungsklasse, hingegen wechseln 12 % dieser SchülerInnen in die starke Leistungsklasse. Bezogen auf die starke Leistungsklasse verbleiben 19 % in dieser und 9 % wechseln in die schwache Leistungsklasse. Im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts verbleiben 62 % der SchülerInnen in der schwachen Leistungsklasse und 9 % wechseln in die starke Leistungsklasse. Von den SchülerInnen der starken Leistungsklasse verbleiben 18 % und 11 % wechseln in die schwache Leistungsklasse.

Tabelle 7.5: Entwicklung der beiden Leistungsklassen zwischen dem Prä- und Posttest

| 1D-Adaption        |         |       |
|--------------------|---------|-------|
| Prätest \ Posttest | Schwach | Stark |
|                    |         |       |
| Schwach            | 60 %    | 12 %  |
| Stark              | 9 %     | 19 %  |

| 2DD-Mechanikkonzept |         |       |
|---------------------|---------|-------|
| Prätest \ Posttest  | Schwach | Stark |
|                     |         |       |
| Schwach             | 62 %    | 9 %   |
| Stark               | 11 %    | 18 %  |

Als weiteres Argument für die Differenzierung der Leistungsklassen werden die mittleren Lösungswahrscheinlichkeiten zwischen den Leistungsklassen zu den beiden Testzeitpunkten verglichen. Im Prätest zeigt ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben einen höchst signifikanten Unterschied in den mittleren Lösungswahrscheinlichkeiten der schwachen ( $\mu = 33 \%$ ,  $\sigma = 9 \%$ ) und der starken ( $\mu = 49 \%$ ,  $\sigma = 10 \%$ ) Leistungsklasse. Der Levene-Test auf Verletzung der Varianzhomogenität wird hier und im folgenden t-Test signifikant. Die Differenz beträgt im Mittel 16 [15, 17] Prozent,  $t(365.69) = 20.87$ ,  $p < .001^{30}$ ,  $d = 1.92$  [1.57, 1.92]. Im Falle des Posttest zeigt ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben ebenfalls einen höchst signifikanten Unterschied in den mittleren Lösungswahrscheinlichkeiten der schwachen ( $\mu = 37 \%$ ,  $\sigma = 10 \%$ ) und der starken ( $\mu = 60 \%$ ,  $\sigma = 11 \%$ ) Leistungsklasse. Die Differenz beträgt hier im Mittel 23 [21, 24] Prozent,  $t(379.72) = 26.98$ ,  $p < .001^{31}$ ,  $d = 2.22$  [2.03, 2.41].

<sup>30</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zum gleichen Ergebnissen.

Der t-Test ist auch höchst signifikant nach der Bonferroni-Holm Korrektur. Im Folgenden werden die mittleren Lösungswahrscheinlichkeiten innerhalb der Leistungsklassen zwischen den Treatmentgruppen verglichen, wodurch an dieser Stelle eine Bonferroni-Holm Korrektur mit  $n = 2$  vorgenommen werden muss. Die genannten t-Tests werden allerdings im weiteren Verlauf alle nicht signifikant, weshalb die Korrektur bereits hier erfolgt.

<sup>31</sup>siehe 30

Im Folgenden werden die Lösungswahrscheinlichkeiten in den zwei Leistungsklassen aufgeteilt auf beide Treatmentgruppen zu beiden Testzeitpunkten miteinander verglichen, um zu untersuchen, wie sich die mittleren Lösungswahrscheinlichkeiten der beiden Leistungsklassen auf die Treatmentgruppen verteilen. Ein Vergleich zwischen Prä- und Posttest ist nicht möglich, da es sowohl SchülerInnen gibt, die in der gleichen Leistungsklasse verblieben sind als auch diese, welche die Leistungsklasse gewechselt haben. Die mittleren Lösungswahrscheinlichkeiten können Tabelle 7.6 entnommen werden.

Tabelle 7.6: Mittlere Lösungswahrscheinlichkeiten und Standardabweichungen in den beiden Leistungsklassen aufgeteilt nach Treatmentgruppen im Prä- und Posttest

|                | Prätest     |                      | Posttest    |                      |
|----------------|-------------|----------------------|-------------|----------------------|
|                | 1D-Adaption | 2DD-Mechanik-konzept | 1D-Adaption | 2DD-Mechanik-konzept |
| <b>Schwach</b> | 33 % ± 8 %  | 33 % ± 9 %           | 37 % ± 9 %  | 38 % ± 10 %          |
| <b>Stark</b>   | 50 % ± 12 % | 48 % ± 9 %           | 60 % ± 12 % | 60 % ± 10 %          |

Für beide Testzeitpunkte zeigen zweiseitige t-Tests für unabhängige Stichproben keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Treatmentgruppen. Im Prätest beträgt der mittlere Unterschied in der Lösungswahrscheinlichkeit innerhalb der schwachen Leistungsklasse 0.8 [−0.7, 2.1] Prozent,  $t(585) = 1.01, p = .315, d = 0.08$  [−0.80, 0.25] und innerhalb der starken 2.4 [−0.3, 0.50] Prozent,  $t(230) = 1.74, p = .084, d = 0.23$  [−0.03, 0.49]. Im Falle des Posttest beträgt der mittlere Unterschied in der Lösungswahrscheinlichkeit innerhalb der schwachen Leistungsklasse 0.9 [−2.4, 0.7] Prozent,  $t(555.61) = 1.10, p = .272, d = 0.09$  [−0.80, 0.26] (signifikanter Levene-Test und Reduktion der Freiheitsgrade) und innerhalb der starken 0.6 [−2.3, 3.5] Prozent,  $t(232) = 0.389, p = .697, d = 0.05$  [−0.21, 0.31]<sup>32</sup>. Es kann also von einer Gleichverteilung der Lösungswahrscheinlichkeiten innerhalb der beiden Leistungsklassen zwischen den beiden Treatmentgruppen ausgegangen werden.

Abschließend wird untersucht, ob es Unterschiede in den Lernzuwächsen der SchülerInnen gibt, abhängig davon in welcher Leistungsklasse diese sich zum Prätestzeitpunkt befunden haben. Damit können mögliche Unterschiede innerhalb der Leistungsklassen zwischen den beiden Treatmentgruppen untersucht werden. Mit Lernzuwachs ist die Differenzen der Personenfähigkeiten aus der Rasch-Skalierung gemeint. Die Ergebnisse dieser Analyse sind in Abbildung 7.11 zusammengefasst.

Zwei zweiseitige t-Tests für unabhängige Stichproben zeigen keine signifikanten Unterschiede im Lernzuwachs zwischen den zwei Leistungsklassen innerhalb der beiden Treatmentgruppe. Der mittlere Unterschied zwischen der schwachen ( $\mu = 0.19, \sigma = 0.65$ ) und

<sup>32</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt für die vier obigen t-Tests zu den gleichen Ergebnissen mit Signifikanzniveaus  $p > .05$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenzen unterscheiden sich erst ab der ersten Nachkommastelle.

Bonferroni-Holm Korrektur der vier t-Tests siehe 30

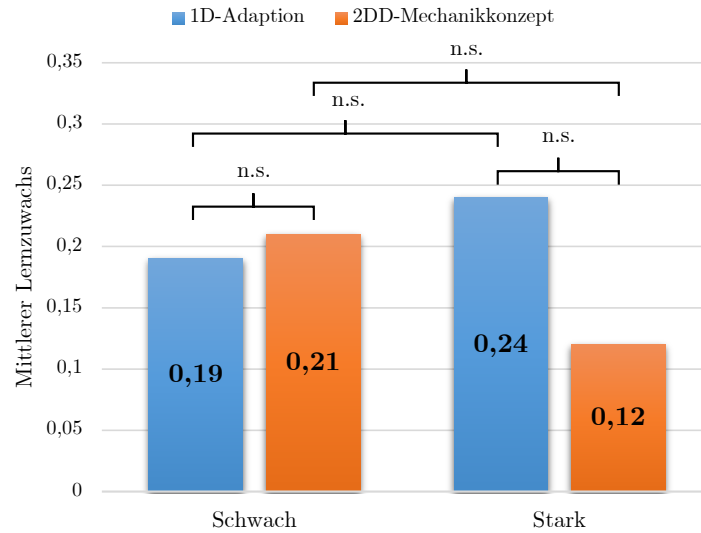


Abbildung 7.11: Mittlere Lernzuwächse der SchülerInnen in den beiden Treatmentgruppen aufgeteilt nach den Leistungsklassen bezüglich des Prätests (Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

der starken Leistungsklasse ( $\mu = 0.24, \sigma = 0.77$ ) beträgt im Falle der 1D-Adaption bei einem signifikanten Levene-Test 0.05  $[-0.13, 0.22]$  Logits,  $t(151.32) = 0.54, p = .592, d = 0.07 [-0.30, 0.17]$ . Im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts beträgt der Unterschied zwischen der schwachen ( $\mu = 0.21, \sigma = 0.75$ ) und der starken Leistungsklasse ( $\mu = 0.12, \sigma = 0.75$ ) im Durchschnitt 0.09  $[-0.06, 0.24]$  Logits,  $t(471) = 1.15, p = .251, d = 0.12 [-0.08, 0.32]$ . Auch innerhalb der beiden Leistungsklassen zeigen zwei zweiseitige t-Tests für unabhängige Stichproben keine signifikanten Unterschiede im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen. Der mittlere Unterschied im Lernzuwachs zwischen der 1D-Adaption ( $\mu = 0.19, \sigma = 0.65$ ) und dem 2DD-Mechanikkonzept ( $\mu = 0.21, \sigma = 0.75$ ) beträgt im Falle der schwachen Leistungsklasse bei einem signifikanten Levene-Test 0.02  $[-0.09, 0.14]$  Logits,  $t(570.86) = 0.39, p = .699, d = 0.03 [-0.13, 0.20]$ . Im Falle der starken Leistungsklasse beträgt der Unterschied zwischen der 1D-Adaption ( $\mu = 0.24, \sigma = 0.77$ ) und dem 2DD-Mechanikkonzept ( $\mu = 0.12, \sigma = 0.75$ ) im Durchschnitt 0.11  $[-0.09, 0.31]$  Logits,  $t(230) = 1.11, p = .268, d = 0.15 [-0.11, 0.41]$ <sup>33</sup>. Sowohl zwischen den beiden Treatmentgruppen als auch zwischen den Leistungsklassen gibt es keine signifikanten Unterschiede im Lernzuwachs der SchülerInnen.

<sup>33</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt für die vier obigen t-Tests zu den gleichen Ergebnissen mit Signifikanzniveaus  $p > .05$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenzen unterscheiden sich erst ab der zweiten Nachkommastelle.

Da keiner der t-Tests signifikant wird, ist keine Bonferroni-Holm Korrektur notwendig.

## 7.7 Einzelitemanalyse

Bei der Analyse der Einzelitems sollen Aussagen über die mittleren Lernzuwächse auf den einzelnen Items getroffen werden. Hierdurch kann die Frage danach beantwortet werden, ob die Items des Tests eine der beiden Treatmentgruppen begünstigen und ob sich Transfereffekte zwischen den Gruppen zeigen. Die Auswertung in diesem Kapitel findet nach der klassischen Testtheorie statt, da die Personenfähigkeiten in der Rasch-Analyse immer bezüglich aller Items geschätzt werden und somit eine Betrachtung von Einzelitems nicht möglich ist. Entsprechend wurden nicht bearbeitete Items mit Null codiert. Als Lernzuwachs wird in diesem Kapitel die Zunahme der Itemlösungswahrscheinlichkeit definiert. Für jedes Item wurden für die Auswertung drei verschiedene t-Tests berechnet. Jeweils ein zweiseitiger t-Tests für verbundene Stichproben, um den Lernzuwachs auf den Items innerhalb der beiden Treatmentgruppen zu untersuchen und ein zweiseitiger t-Test für unabhängige Stichproben zum Vergleich des Lernzuwachses zwischen den beiden Treatmentgruppen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.12 gezeigt und die durchgeführten t-Tests<sup>34</sup> können im Anhang den Tabellen B.8, B.9 und B.10 entnommen werden.

Aufgrund der Menge an Items werden in diesem Kapitel nicht alle im Detail betrachtet, sondern es wird eine Auswahl auch für die folgenden Diskussion getroffen. Die Auswahl basiert auf den zuvor durchgeführten Analysen, in denen sich einzelne Items besonders hervor getan haben (Mehrfachnennung möglich):

- Die sechs Items aus Kapitel 7.1.2, welche einen signifikanten  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.64$  aufgewiesen haben und somit ein besonderer Einfluss der Intervention vermutet werden kann.  
(B4.01, B4.02, N2.KKB.01, N2.KBK.0G.06.A, N2.KB.ZS.01 und N2.VKB.02)
- Die drei Items, welche in Kapitel 7.6 bei der Bildung der Leistungsklassen zum Prätestzeitpunkt von der Lösungswahrscheinlichkeit her in der schwachen oberhalb der starken Leistungsklasse lagen, sich somit also als besonders schwer herausgestellt haben.  
(B2.Z.02, B4.01 und N2.KB.ZS.01)
- Die vier Items, bei denen sich in Abbildung 7.12 die beiden Treatmentgruppen bezüglich des Lernzuwachses signifikant unterscheiden, also Items auf die sich die Treatments unterschiedlich ausgewirkt haben.  
(N1.Z.01, N2.KKB.01, N2.KB.ZS.01 und N2.VBK.01)

<sup>34</sup>Da für die Items drei verschiedene t-Tests durchgeführt wurden, muss eine entsprechende Bonferroni-Holm-Korrektur mit  $n = 3$  vorgenommen werden. Die Korrektur befindet sich im Anhang in den Tabellen B.11 und B.12. Diese wurde nur für die Items vorgenommen, welche in einem der drei t-Tests eine Signifikanz aufweisen. Aufgrund der Übersichtlichkeit wurden die Signifikanzwerte nicht ihrer Größe nach sortiert. Die Bonferroni-Holm-Korrektur wurde in der zweiten Spalte entsprechend der Größe der Signifikanzwerte angewandt. In der Folge der Korrektur kommt es zu Veränderungen von Signifikanzniveaus bei einzelnen Items, es tritt aber nicht der Fall auf, dass ein t-Test nach der Korrektur nicht mehr signifikant ist. Die t-Tests, bei denen es zu Veränderung kommt, sind in den Tabellen dick gedruckt dargestellt.

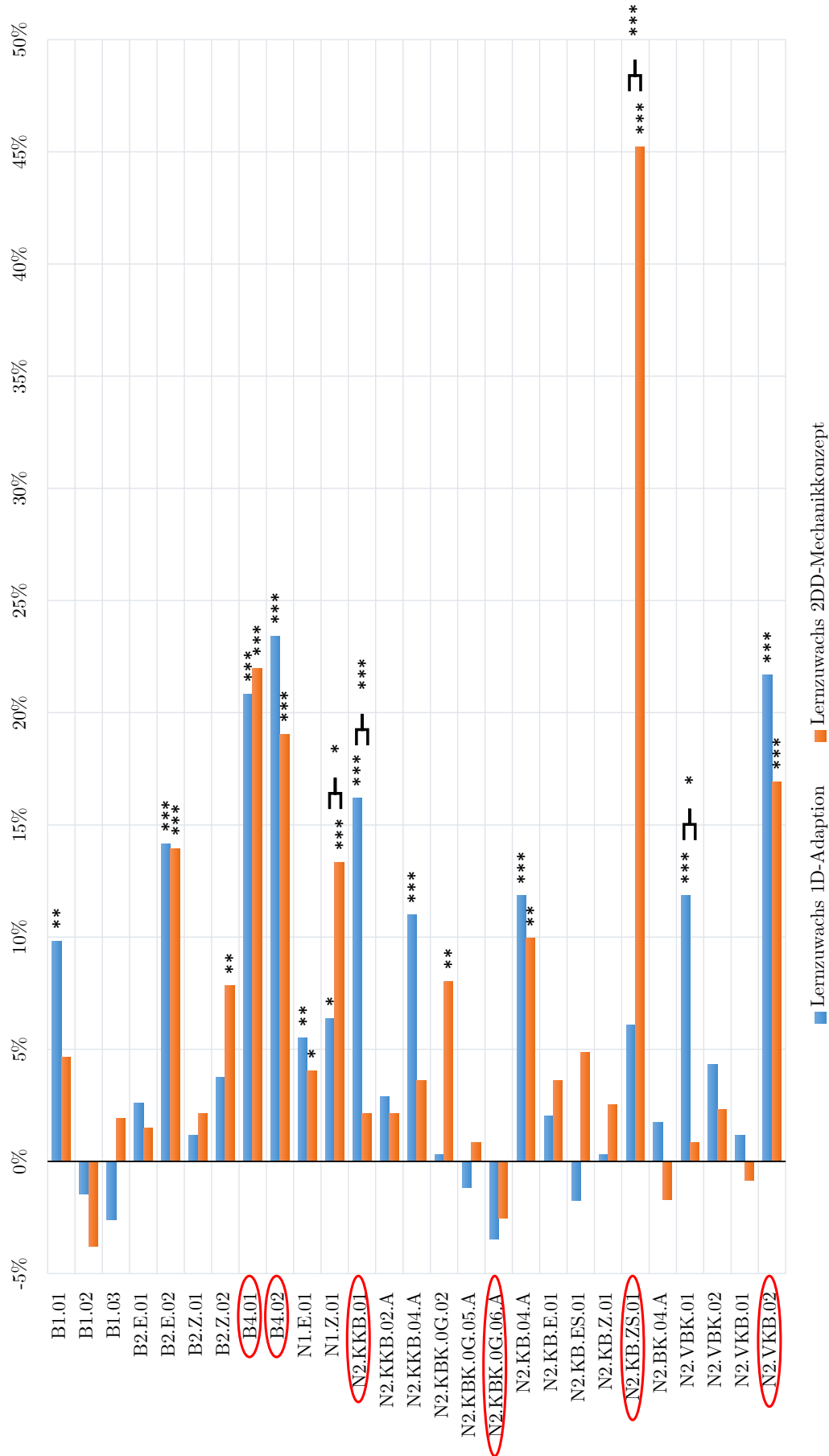


Abbildung 7.12: Lernzuwächse auf den einzelnen Items aufgeteilt nach Treatmentgruppen (DIF-behaftete Items sind rot markiert, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

Für die ausgewählten Items wird zusätzlich zu den t-Tests für beide Treatmentgruppen die Verteilung der Antwortoptionen analysiert, um hierdurch Aussagen über Effekte der Treatments auf die einzelnen Items machen zu können. Des Weiteren werden auch die Items der gleichen Kategorien sowie die analog konstruierten Items betrachtet, um Aussagen über mögliche Transferleistungen machen zu können.

### B4.01

**Zwei gleiche Körper werden aus dem Stand konstant beschleunigt. Der zweite Körper wird doppelt so lange beschleunigt wie der erste.**

**Was gilt für die Endgeschwindigkeit?**

- ☐ Beide Körper haben die gleiche Endgeschwindigkeit.
- ☐ Die Endgeschwindigkeit vom zweiten Körper ist doppelt so groß, wie die des ersten Körpers.
- ☐ Die Endgeschwindigkeit vom zweiten Körper ist halb so groß, wie die des ersten Körpers.
- ☐ Da nur die Beschleunigungen bekannt sind, kann man über die Endgeschwindigkeiten nichts sagen.

Das Item B4.01 wurde in der DIF-Analyse (siehe Kap. 7.1.2) in Kategorie 1 eingeordnet, das heißt, es gibt einen Unterschied zwischen dem Prä- und Posttest, aber keinen Unterschied zwischen den beiden Treatmentgruppen im Posttest. Es zeigt sich in Abbildung 7.12, dass dies auch für den Lernzuwachs der SchülerInnen auf diesem Item zutrifft. In beiden Treatmentgruppen erzielen die SchülerInnen einen höchst signifikanten Lernzuwachs (1D-Adaption  $d = 0.31$ , 2DD-Mechanikkonzept  $d = 0.36$ ), es zeigt sich aber kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Treatmentgruppen. Die Verteilung der gewählten Antwortoptionen aufgeteilt nach Treatmentgruppen ist in Tabelle 7.7<sup>35</sup> gezeigt. Die korrekte Antwort ist rot markiert.

Die gewählten Antwortoptionen sind zu beiden Testzeitpunkten zwischen den Treatmentgruppen in etwa gleich verteilt, wobei die korrekte Antwort am häufigsten angekreuzt wurde. Im Posttest ist eine deutliche Zunahme der richtigen Antworten im Vergleich zum Prätest sichtbar, wobei sich die Zunahme vor allem durch die Abnahme von Antwortoption 1 und 4 ergibt. Der meistgewählte Distraktor in Prä- und Posttest bildet die vierte Antwortoption, dass bei gegebener Beschleunigung keine Aussage möglich sei.

Das Konzept der Beschleunigung, welches Voraussetzung für die Lösung der Aufgabe ist, wurde im 2DD-Mechanikkonzept nicht behandelt, dennoch wurde das Items genauso gut gelöst wie in der anderen Treatmentgruppe. Eine Übertragung der Konzepte von Zusatzgeschwindigkeit und Einwirkungsdauer auf das Konzept der Beschleunigung ist also für

<sup>35</sup>Bei allen folgenden Angabe der prozentualen Anteile kann es stellenweise zu Rundungsdifferenzen kommen, um den Gesamtwert 100 % nicht zu überschreiten.

Tabelle 7.7: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B4.01 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 20 %      | 41 %      | 11 %      | 28 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 24 %      | 34 %      | 12 %      | 30 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 15 %      | 61 %      | 7 %       | 17 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 14 %      | 55 %      | 10 %      | 21 %      |

die SchülerInnen potenziell möglich.

Zusätzlich wurde dieses Item aber auch bei der Bildung der Leistungsklassen zum Prätestzeitpunkt auffällig. Die Bildung der Leistungsklassen basiert auf den uncodierten Daten, das heißt darauf, welche Antwortmöglichkeit von den SchülerInnen angekreuzt wurde. Aus diesem Grund wird nun analysiert, wie sich das Antwortverhalten bei diesem Item zwischen den beiden Leistungsklassen unterscheidet. Die Verteilung der gewählten Antwortoptionen in den beiden Leistungsklassen ist in Tabelle 7.8 gezeigt.

Tabelle 7.8: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B4.01 im Prätest aufgeteilt nach Leistungsklassen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

| Leistungsklasse | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Schwach</b>  | 20 %      | 39 %      | 13 %      | 28 %      |
| <b>Stark</b>    | 30 %      | 31 %      | 6 %       | 33 %      |

In der starken Leistungsklasse haben die SchülerInnen häufiger die Antwortmöglichkeit 1 und 4 gewählt, also die Aussagen, dass die Endgeschwindigkeit für beide Körper gleich oder keine Aussage darüber möglich sei. Die Antwortmöglichkeit 3 wurde weniger häufig gewählt als in der schwachen Leistungsklasse.

Als Erklärungsansatz könnte eine zu komplexe Vorstellung der SchülerInnen aus der starken Leistungsklasse angenommen werden. Hierdurch kommen diese SchülerInnen häufiger zu dem Schluss, dass die Informationen in der Aufgabe nicht ausreichen würden, um diese zu lösen, oder dass auf der anderen Seite die Angaben in der Aufgabe keinen Einfluss auf die Situation haben und damit irrelevant seien. Die starken SchülerInnen vermuten also eher eine höhere Anforderung der Aufgabenstellung dadurch, dass die Informationen entweder nicht ausreichen oder die gegebenen Informationen irrelevant für die Aufgabe seien. Die schwachen SchülerInnen hingegen beziehen bei ihren Lösungen häufiger die Angaben der Aufgaben als relevante Faktoren in ihre Lösungen ein, was dazu führt, dass hier auch die Umkehrung der richtigen Lösung häufiger gewählt wird, weil diese ebenfalls alle Angaben der Aufgabestellung berücksichtigt.

## B4.02

## Welche Aussage über die Geschwindigkeitsänderung ist richtig?

- ☐ Um eine Bewegung umzukehren, muss die Geschwindigkeitsänderung kleiner sein als die Anfangsgeschwindigkeit.
- ☐ Um eine Bewegung umzukehren muss die Geschwindigkeitsänderung größer sein als die Anfangsgeschwindigkeit.
- ☐ Die Geschwindigkeitsänderung kann nie größer sein als die Endgeschwindigkeit.
- ☐ Die Geschwindigkeitsänderung kann nie größer sein als die Anfangsgeschwindigkeit.

Das Item B4.02 wurde analog zu B4.01 in der DIF-Analyse in Kategorie 1 eingeordnet. Auch hier zeigt sich in Abbildung 7.12 ein höchst signifikanter Lernzuwachs innerhalb der beiden Treatmentgruppen (1D-Adaption  $d = 0.37$ , 2DD-Mechanikkonzept  $d = 0.29$ ) und kein signifikanter Unterschied zwischen diesen.

Tabelle 7.9: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B4.02 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 20 %      | 46 %      | 25 %      | 9 %       |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 17 %      | 50 %      | 23 %      | 10 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 9 %       | 70 %      | 18 %      | 3 %       |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 5 %       | 70 %      | 21 %      | 5 %       |

Betrachtet man die Verteilung der gewählten Antwortoptionen in Tabelle 7.9 zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei Item B4.01. Auch hier sind die gewählten Antwortoptionen zwischen den beide Treatmentgruppen annähernd gleich verteilt und es findet eine Zunahme der korrekten Antworten im Posttest statt, wobei bereits im Prätest die korrekte Lösung am häufigsten gewählt wurde. Der häufigste Distraktor bei diesem Item bildet die Antwortoption 3, dass die Geschwindigkeitsänderung nie größer sein könne als die Endgeschwindigkeit.

Item B4.02 ist für die Treatmentgruppe der 1D-Adaption potenziell einfacher zu lösen, da die Bewegungsumkehr hier explizit als ein Anwendungsbeispiel thematisiert wurde und sich im Eindimensionalen abspielt. Es zeigt sich aber, dass auch die SchülerInnen aus dem Treatment des 2DD-Mechanikkonzepts bei dieser Aufgabe dazulernen, obwohl sie die Situation aus dem Zweidimensionalen übertragen müssen.

**N2.KKB.01**

Ein Schlittschuh-Läufer beschleunigt aus dem Stand und gleitet anschließend ohne weitere aktive Bewegung weiter auf dem Eis. Die Reibung zwischen Schlittschuh und Eis soll hierbei vernachlässigt werden.

Welche Aussage über die Bewegung des Schlittschuh-Läufers trifft zu?

- ☐ Der Schlittschuh-Läufer wird mit der Zeit immer langsamer, da seine Antriebskraft fehlt.
- ☐ Der Schlittschuh-Läufer bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter, da keine horizontale Kraft auf ihn wirkt.
- ☐ Der Schlittschuh-Läufer wird langsamer, da er nicht mehr aktiv beschleunigt.
- ☐ Der Schlittschuh-Läufer wird langsamer, da keine horizontale Kraft auf ihn wirkt.

Bei Item N2.KKB.01 fällt der Lernzuwachs im Falle der 1D-Adaption höchst signifikant höher aus als beim 2DD-Mechanikkonzept, bei denen der Lernzuwachs nicht signifikant wird. Die Effektstärke für den Unterschied liegt nach Cohen bei  $d = 0.32$ . Die Verteilung der Antwortoptionen kann Tabelle 7.10 entnommen werden.

Tabelle 7.10: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KKB.01 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 47 %      | 8 %       | 41 %      | 4 %       |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 44 %      | 12 %      | 41 %      | 3 %       |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 39 %      | 24 %      | 34 %      | 3 %       |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 42 %      | 14 %      | 39 %      | 5 %       |

Im Falle von Item N2.KKB.01 sind die Antwortoptionen zum Prätestzeitpunkt in etwa gleich verteilt. Beim Übergang zum Posttest kann im Falle der 1D-Adaption eine deutliche Zunahme der richtigen Lösung verzeichnet werden. Dieser bessere Lernzuwachs lässt sich dadurch erklären, dass den SchülerInnen, welche nach der 1D-Adaption unterrichtet wurden, diese Art der Situation aus der Simulation (Podolefsky et al., o. D.) des Lehrgangs bekannt ist. Hier bewegt sich der Körper, nachdem man ihn zuvor auf eine Anfangsgeschwindigkeit gebracht hat, beim Entfernen der horizontalen Kraft mit einer konstanten Geschwindigkeit weiter. Diese unmittelbare Erfahrung im Umgang mit der Simulation fehlt der anderen Treatmentgruppe. Betrachtet man allerdings die Häufigkeit der Distraktoren, so sind in beiden Gruppen die SchülerInnenvorstellungen einer konstanten

Antriebskraft beziehungsweise einer aktiv aufrechtzuerhaltenden Beschleunigung selbst zum Posttestzeitpunkt deutlich häufiger vorhanden als das richtige Konzept. Die SchülerInnen der Treatmentgruppe zur 1D-Adaption sind darüber hinaus auch in der Lage das Konzept auf einen Kontext mit einer Rakete im Weltall (N2.KKB.04.A) zu übertragen, wobei der Transfer zu einer Aufgabe in einem sehr ähnlichen Kontext eines Pucks auf Eis (N2.KKB.02.A) nicht stattfindet. Der Kontext scheint also an dieser Stelle Einfluss auf die Transferleistung der SchülerInnen zu haben.

## N2.KBK.0G.06.A

**Maria drückt gegen einen schweren Stein, doch er bewegt sich nicht. Wieso?**

- ☐ Er bewegt sich nicht. Daher können keine Kräfte wirken.
- ☐ Maria übt auf den Stein eine Kraft aus, aber die vom Stein ausgeübte Kraft ist größer.
- ☐ Es muss eine zweite Kraft auf den Stein wirken, die Marias Kraft entgegengesetzt ist.
- ☐ Der Stein ist schwerer als Maria.

Bei Item N2.KBK.0G.06.A, welches ebenfalls Kategorie 1 der DIF-Analyse angehört, zeigt sich im Gegensatz zu den bisherigen Items in Abbildung 7.12 ein negativer Lernzuwachs in beiden Treatmentgruppen, wobei dieser nicht signifikant wird. Näheren Aufschluss dazu liefert die Betrachtung der gewählten Antwortoptionen in Tabelle 7.11.

Tabelle 7.11: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KBK.0G.06.A aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 2 %       | 58 %      | 11 %      | 29 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 1 %       | 65 %      | 10 %      | 24 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 1 %       | 69 %      | 8 %       | 22 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 2 %       | 72 %      | 8 %       | 18 %      |

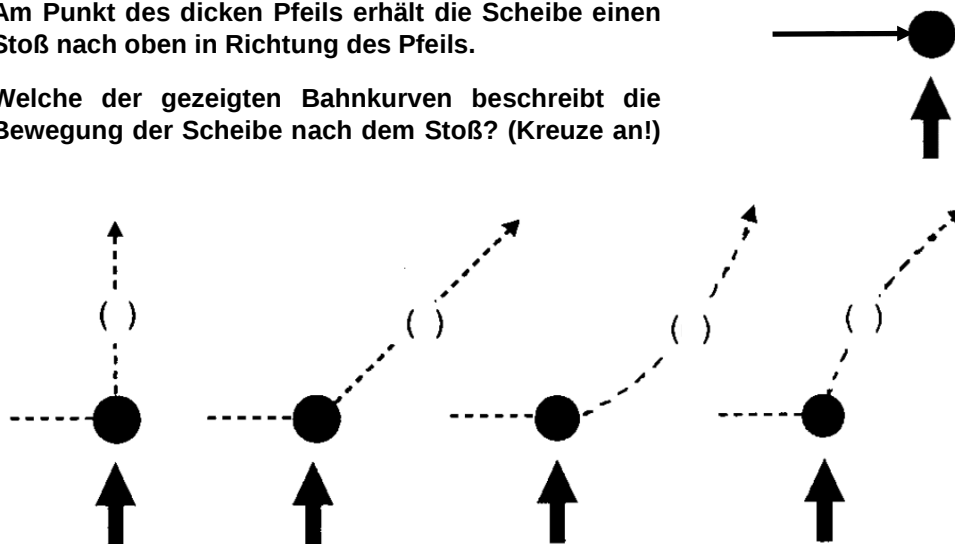
Erneut sind die gewählten Antwortoptionen zwischen den beiden Treatmentgruppen in etwa gleich verteilt. Die am häufigsten gewählte Antwortoption ist zu beiden Testzeitpunkten die zweite, dass die Kraft des Steins größer sei als die von Maria. Im Posttest zeigt sich eine deutliche Zunahme dieser Antwortoption sowie eine Abnahme der richtigen Antwort 3 und der Antwortoption 4. Die erste Antwortoption wurde zu beiden Testzeitpunkten kaum gewählt.

Bei dem Item handelt es sich um ein statisches Kräftegleichgewicht, welches in keinem der beiden Mechaniklehrgänge thematisiert wurde. Daher konnte an dieser Stelle auch kein Lernzuwachs bei den SchülerInnen erwartet werden. Die zweite Antwortoption beinhaltet die SchülerInnenvorstellung der aktiven Gegenkraft eines Körpers, um sich einer Änderung seines Bewegungszustandes zu widersetzen. Da die Wahl dieses Distraktors zunimmt, wird diese SchülerInnenvorstellung durch die beiden Treatments noch weiter verstärkt. Betrachtet man im Vergleich dazu die anderen Items dieser Kategorie, zeigt sich bei N2.KBK.0G.05.A im Falle der 1D-Adaption erneut ein negativer und im Fall des 2DD-Mechanikkonzepts ein geringer positiver Lernzuwachs (beides nicht signifikant). Bei Item N2.KBK.0G.02 zeigt sich hingegen im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts ein hoch signifikanter Lernzuwachs allerdings mit einer geringen Effektstärke ( $d = 0.13$ ).

### N2.KB.ZS.01

**Eine Scheibe bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit auf einer reibungsfreien Oberfläche. Am Punkt des dicken Pfeils erhält die Scheibe einen Stoß nach oben in Richtung des Pfeils.**

**Welche der gezeigten Bahnkurven beschreibt die Bewegung der Scheibe nach dem Stoß? (Kreuze an!)**



Der Lernzuwachs von Item N2.KB.ZS.01 fällt, wie in Abbildung 7.12 deutlich sichtbar, für die Treatmentgruppe des 2DD-Mechanikkonzepts mit einer höchst signifikanten Zunahme der Lösungswahrscheinlichkeit von knapp über 45 % wesentlich größer als bei der 1D-Adaption. Die Effektstärke liegt für den Lernzuwachs innerhalb des 2DD-Mechanikkonzepts bei  $d = 0.77$  und im Vergleich zur 1D-Adaption bei  $d = 0.66$ . Dieser Trend hatte sich auch bereits in der DIF-Analyse abgezeichnet.

Betrachtet man die Anteile der Antwortoptionen in Tabelle 7.12 sind diese im Prätest zwischen den beiden Treatmentgruppen zunächst noch gleich verteilt. Im Posttest nimmt allerdings die Häufigkeit der korrekten Antwort im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts deutlich zu. Abgesehen von einer leichten Zunahme der richtigen Lösung bleibt die Verteilung der gewählten Antwortoptionen bei der 1D-Adaption hingegen gleich.

Tabelle 7.12: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KB.ZS.01 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 21 %      | 29 %      | 20 %      | 30 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 22 %      | 32 %      | 20 %      | 26 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 21 %      | 36 %      | 16 %      | 27 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 9 %       | 77 %      | 10 %      | 4 %       |

Dieser Effekt lässt sich mit dem Inhalt des Treatments begründen. Der Versuch, in dem ein sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegendes Körper senkrecht zur Bewegungsrichtung einen Stoß erfährt, bildet einen elementaren Bestandteil des gesamten 2DD-Mechaniklehrgangs. An diesem Versuch wird nicht nur das Konzept der Zusatzgeschwindigkeit eingeführt, er wird auch mehrfach genau in dieser Form durchgeführt beziehungsweise ist auch in der Simulation (Rachel, o. D.) zum Lehrgang enthalten. Vergleichbare Inhalte sind im Mechaniklehrgang der 1D-Adaption nicht enthalten. Der sehr große Lernzuwachs spricht also dafür, dass das Konzept des senkrechten Stoßes von dieser Treatmentgruppe sehr gut verstanden wurde. Betrachtet man an dieser Stelle hingegen aber die analog zu diesem Item formulierten Aufgaben im Eindimensionalen und/oder mit konstanten Kräften (N2.KB.ES.01, N2.KB.Z.01 und N2.KB.E.01) zeigen sich keine Transferleistung der SchülerInnen. Das Konzept kann also von den SchülerInnen nicht auf andere Situationen übertragen werden.

Dieses Item wurde aber auch bei der Bildung der Leistungsklassen auffällig, da die Lösungswahrscheinlichkeit der starken Leistungsklasse zum Prätestzeitpunkt unterhalb der schwachen Gruppe lag. Daher wird an dieser Stelle erneut zusätzlich die Verteilung der Antwortoptionen auf die beiden Leistungsklassen betrachtet (siehe Tab. 7.13).

Tabelle 7.13: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KB.ZS.01 im Prätest aufgeteilt nach Leistungsklassen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

| Leistungsklasse | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Schwach</b>  | 27 %      | 32 %      | 21 %      | 20 %      |
| <b>Stark</b>    | 8 %       | 29 %      | 16 %      | 47 %      |

Die korrekte Antwort wird, wie oben beschrieben, von der starken Leistungsklasse weniger häufig gewählt als von der Schwachen. Betrachtet man die Wahl der Distraktoren wird Antwortoption 1 weniger häufig von der starken Leistungsklasse dafür aber die Antwortoption 4 umso häufiger gewählt und führt tendenziell dazu, dass die starke Leistungsklasse bei diesem Item schlechter abschneidet.

Der Unterschied zwischen den Antwortoptionen 2 und 4 besteht darin, dass im ersten Fall

die Geschwindigkeit in  $y$ -Richtung konstant bleibt und im zweiten Fall mit der Zeit immer weiter abnimmt, wodurch eine gekrümmte Bahnkurve resultiert. Die Wahl der gekrümmten Bahnkurve lässt sich zum Beispiel mit der Antriebsvorstellung bei der Wirkung von Kräften erklären. Der „Antrieb“, welchen der Körper durch den Stoß erhält, nimmt mit der Zeit immer weiter ab, bis dieser schließlich aufgebraucht ist und der Körper sich in seinem ursprünglichem Bewegungszustand weiterbewegt. Eine alternative Begründung mit dem gleichen Resultat wäre die Berücksichtigung von Reibungseffekten in  $y$ - aber nicht in  $x$ -Richtung. In der Realität unterliegen alle Bewegungen von Körpern auf der Erde Reibungseffekten, wodurch möglicherweise die Vorstellung einer gekrümmten Bahnkurve für die SchülerInnen der starken Leistungsklasse realistischer erscheint als die idealisierte Vorstellung einer gradlinigen Bewegung in Folge einer Einwirkung. Die anderen beiden Distraktoren sind mit dieser Begründung noch unrealistischer und wurden entsprechend auch weniger häufig von der starken Leistungsklasse gewählt. Mit Bezug auf die Begründung, welche zu Item B4.01 gegeben wurde, liegt auch hier potenziell eine zu komplexe Vorstellung der starken im Vergleich zur schwachen Leistungsklasse vor.

Vergleicht man die Entwicklung auf diesem zweidimensionalen Stoß-Item mit der analog konstruierten eindimensionalen Aufgabe (N2.KB.ES.01) beziehungsweise mit den analogen Aufgaben bei konstanten Kräften (N2.KB.Z.01 und N2.KB.E.01) zeigen sich hingegen keine signifikanten Effekte weder innerhalb noch zwischen den beiden Treatmentgruppen.

## N2.VKB.02

**Zwei Seifenkisten werden mit gleichen CO<sub>2</sub>-Gasflaschen aus dem Stand auf gerader Strecke angetrieben. Eine Seifenkiste ist dabei doppelt so schwer wie die andere.**

**Vergleiche die Endgeschwindigkeiten der Seifenkisten, wenn die Gasflaschen sich gleich entleeren.**

- ☐ Die schwere Seifenkiste hat eine größere Geschwindigkeit als die leichte.
- ☐ Die leichte Seifenkiste hat eine größere Geschwindigkeit als die schwere.
- ☐ Beide haben die gleiche Geschwindigkeit.
- ☐ Der Vergleich ist nur möglich, wenn man das genaue Gewicht der Seifenkisten kennt.

Item N2.VKB.02 fällt in die gleiche Kategorie wie die bereits beschriebenen B4.01 und B4.02. Die Effektstärken der Lernzuwächse liegen hier für die 1D-Adaption bei  $d = 0.36$  und für das 2DD-Mechanikkonzept bei  $d = 0.30$ . Auch die Verteilung der Antwortoptionen (siehe Tabelle 7.14) gestaltet sich analog zu B4.01 und B4.02. Der am häufigsten gewählte Distraktor stellt Antwortoption 1 dar, dass die schwere Seifenkiste eine größerer Endgeschwindigkeit habe als die leichte.

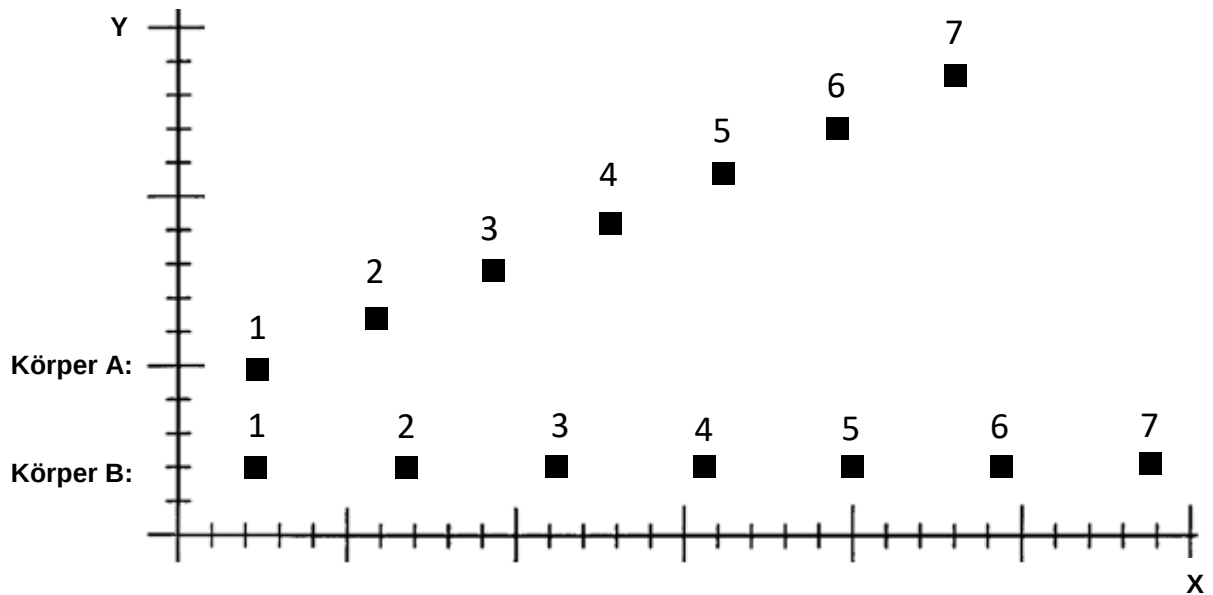
Tabelle 7.14: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.VKB.02 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 30 %      | 51 %      | 8 %       | 11 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 30 %      | 54 %      | 5 %       | 11 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 17 %      | 73 %      | 5 %       | 5 %       |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 17 %      | 70 %      | 6 %       | 7 %       |

Die Aufgabe ist potenziell für beide Treatmentgruppen in gleicher Art und Weise mit Hilfe der Newton'schen Bewegungsgleichung zu lösen. Im Falle der 1D-Adaption wird hier mit Hilfe der gleichen Beschleunigung und im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts mit der gleichen Einwirkung sowie der gleichen Einwirkungsdauer argumentiert. Bei dem Item N2.VKB.01 der gleichen Kategorie zeigt sich dieser Effekt nicht. Dies liegt allerdings daran, dass es sich bei diesem Item um das mit Abstand leichteste Item von allem handelt. Es kann sich daher kein Lernzuwachs ergeben, da bereits zum Prätestzeitpunkt ein Großteil der SchülerInnen das Item richtig löst. Grund dafür könnte sein, dass die Aufgabe sehr nah an der Erfahrungswelt der SchülerInnen liegt und der zu Grunde liegende Versuch von vielen im Sportunterricht bereits selbst ausprobiert wurde.

## B2.Z.02

Die Abbildung zeigt die Positionen zweier Körper im zeitlichen Abstand von jeweils 1s.



Welcher der beiden Körper ist schneller?

- ☐ Körper A ist schneller als Körper B.
- ☐ Darüber ist keine Aussage möglich.
- ☐ Körper B ist schneller als Körper A.
- ☐ Beide Körper sind gleich schnell.

Das Item B2.Z.02 ist das dritte auffällige Item bei der Bildung der Leistungsklassen zum Prätestzeitpunkt. Betrachtet man die Verteilung der Antwortoptionen im Prätest zwischen den beiden Leistungsklassen (siehe Tabelle 7.15) werden die Distraktor 2 und vor allem 4, dass keine Aussage möglich sei oder dass beide Körper gleich schnell seien, von der starken Leistungsklasse häufiger gewählt als von der schwachen. Antwortoption 1 wird weniger häufig gewählt. Infolgedessen schneidet die starke Leistungsklasse aber dennoch bei diesem Item schlechter ab.

Tabelle 7.15: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B2.Z.02 im Prätest aufgeteilt nach Leistungsklassen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

| Leistungsklasse | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Schwach         | 25 %      | 7 %       | 51 %      | 17 %      |
| Stark           | 18 %      | 11 %      | 43 %      | 28 %      |

Die SchülerInnen der starken Leistungsklasse tendieren bei dieser Aufgabe also eher dazu von vornherein zu sagen, dass keine Aussage möglich sei, ihnen fehlen also Informationen zur Lösung der Aufgabe, oder dass es keinen Unterschied zwischen den beiden Körper gäbe. Eine mögliche Erklärung für diese Verteilung der Antwortoptionen könnte sein, dass die starken SchülerInnen teilweise mit zu komplexen Vorstellungen an die Aufgabe herangetreten sind, wodurch die Annahme entstand, dass die Aufgabe in dieser Form gar nicht gelöst werden kann, weil relevante Informationen fehlen oder wodurch der Unterschied in den Stroboskopbildern, welchen man mit dem bloßen Auge sehen kann, einfach nicht erkannt wurde. Insgesamt beantworten aber dennoch auch die meisten SchülerInnen der starken Leistungsklasse zu Aufgabe korrekt und es wurde häufiger erkannt, dass die Umkehrung der richtigen Lösung nicht zutrifft.

Bei einem Blick auf die Effekte auf der Ebene der Lernzuwächse, zeigt sich im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts ein hoch signifikanter Lernzuwachs ( $d = 0.12$ ). In der 1D-Adaption und zwischen den beiden Treatmentgruppen ergeben sich keine signifikanten Effekte. Die Verteilung der Antwortoptionen kann Tabelle 7.16 entnommen werden.

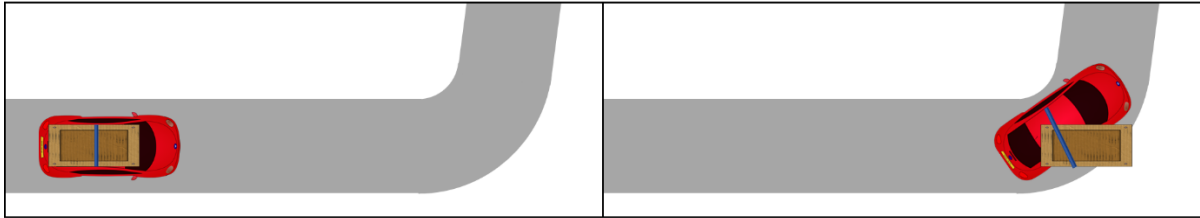
Tabelle 7.16: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B2.Z.02 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 23 %      | 6 %       | 49 %      | 21 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 22 %      | 10 %      | 49 %      | 19 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 21 %      | 11 %      | 53 %      | 16 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 17 %      | 10 %      | 56 %      | 17 %      |

Im Falle des analog konstruierten eindimensionalen Items B2.E.02 zeigt sich ein anderes Verhalten der Lernzuwächse. Hier erzielen die SchülerInnen aus beiden Treatmentgruppen einen höchst signifikanten Lernzuwachs (1D-Adaption  $d = 0.23$ , 2DD-Mechanikkonzept  $d = 0.24$ ). Die SchülerInnen aus der Treatmentgruppe des 2DD-Mechanikkonzepts können diese Art der Problemstellung also sowohl im ein- als auch im zweidimensionalen Fall lösen.

## N1.Z.01

Der Fahrer eines Autos transportiert eine Kiste auf dem Dach, ohne sie richtig fest zu machen. Beim Fahren durch eine Kurve rutscht die Kiste vom Dach des Autos.



Was ist die Ursache dafür?

- ☐ Das Paket fällt herunter, weil die Reibungskraft in der Kurve geringer ist.
- ☐ Durch die Kreisbewegung wird das Paket von der Zentrifugalkraft nach außen gedrückt.
- ☐ Das Paket verbleibt in seinem Bewegungszustand. Das Auto fährt quasi unter dem Paket weg.
- ☐ Der Fahrer übt über das Lenken eine Kraft auf die Kiste aus, wodurch diese herunterfällt.

Item N1.Z.01 weist einen signifikanten Unterschied im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen auf ( $d = 0.14$ ). Innerhalb der Treatmentgruppen zeigt sich im Falle der 1D-Adaption ein signifikanter ( $d = 0.13$ ) und im Fall des 2DD-Mechanikkonzepts ein höchst signifikanter Lernzuwachs ( $d = 0.28$ ). Dieser Unterschied zwischen den beiden Treatmentgruppen findet sich in der analog konstruierten eindimensionalen Aufgabe N1.E.01 nicht.

Tabelle 7.17: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N1.Z.01 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 4 %       | 61 %      | 22 %      | 13 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 22 %      | 32 %      | 20 %      | 26 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 6 %       | 39 %      | 28 %      | 27 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 6 %       | 31 %      | 29 %      | 34 %      |

Bei Item N1.Z.01 zeigte sich schon beim Prätest eine Auffälligkeit in der Form, dass die Verteilung der Antwortoptionen in den beiden Treatmentgruppen nicht gleich ausfiel (siehe Tab. 7.17). Das lässt sich damit begründen, dass Distraktor 2 explizit die Schüler-Innenvorstellung einer nach außen wirkenden Zentrifugalkraft bei der Durchfahrt einer

Kurve anspricht. Diese SchülerInnenvorstellung ist anscheinend in der Treatmentgruppe der 1D-Adaption häufiger vertreten als in der anderen, so dass entsprechend die anderen Distraktoren von dieser Gruppe weniger häufig gewählt wurden. In der anderen Treatmentgruppe wird die Ursache hingegen häufiger einer mangelnden Reibungskraft anstatt der Zentrifugalkraft zugeschrieben. Beim Übergang zum Posttest gleichen sich die Häufigkeiten der Antwortoptionen an, bleiben aber teilweise noch verschieden, was auf unterschiedliche starke Ausprägungen von bestimmten Konzepten schließlich lässt. Einen weiteren nennenswerten Aspekt dieser Aufgabe bildet der vierte Distraktor, welcher in beiden Treatmentgruppen zum Posttestzeitpunkt häufiger gewählt wurde als im Prätest. Hiernach übe der Fahrer eine Kraft auf die Kiste über das Lenkrad aus, so dass diese dann herunterfällt. Die SchülerInnen versuchen also die Bewegung der Kiste auf eine wirkenden Kraft als Ursache zurückzuführen, was in dem Sinne mit dem Konzept des zweiten Newton'schen Axioms übereinstimmt (Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung). An dieser Stelle wird allerdings missachtet, dass sich die Kiste bereits mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt und daher keine Kraft auf die Kiste notwendig ist. An dieser Stelle muss aber auch betont werden, dass dieser Aspekt, also die Thematisierung des ersten Newton'schen Axioms, nicht Teil der beiden Mechaniklehrgänge war und dennoch ein Lernzuwachs auf dem Item vorliegt. Insgesamt schneidet bei dieser Aufgabe die Treatmentgruppe zum 2DD-Mechanikkonzept im Lernzuwachs signifikant besser ab, wenn auch bei einem eher kleinen Effekt, als die zur 1D-Adaption, was dafür spricht, dass im Vergleich zwischen Prä- und Posttest mehr SchülerInnen das obige Konzept richtig anwenden können. Bei der entsprechenden Aufgabe im Eindimensionalen zeigt sich dieser Unterschied zwischen den beiden Treatmentgruppen nicht, das Konzept kann von den SchülerInnen der Treatmentgruppe zum 2DD-Mechanikkonzept also nicht auf die Situation mit reduzierter Dimension übertragen werden und fällt auch der Treatmentgruppe zur 1D-Adaption trotz der reduzierten Dimension nicht leichter.

## N2.VBK.01

**Zwei Einkaufswagen bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit und sollen gleichzeitig gestoppt werden, indem gleich lang eine Kraft ausgeübt wird. Einkaufswagen „A“ ist dabei doppelt so schwer wie Einkaufswagen „B“.**

**Vergleiche die Kräfte, die für das Stoppen der Wagen benötigt wird. Welche Aussage stimmt?**

- ☐ Es ist keine Aussage über die Kräfte möglich, wenn man die Reibung nicht kennt.
- ☐ Auf beide Einkaufswagen muss die gleiche Kraft ausgeübt werden.
- ☐ Auf Einkaufswagen „B“ muss eine größere Kraft ausgeübt werden als auf „A“.
- ☐ Auf Einkaufswagen „A“ muss eine größere Kraft ausgeübt werden als auf „B“.

Das letzte Item dieser Analyse bildet N2.VBK.01. Umgekehrt zum vorigem Item N1.Z.01 zeigt sich im Falle der 1D-Adaption ein höchst signifikanter Lernzuwachs ( $d = 0.19$ ) und im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts nicht. Dies führt zu einem ebenfalls höchst signifikanten Unterschied im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen ( $d = 0.17$ ). Bei dem Item derselben Kategorie N2.VBK.02 zeigen sich keine Effekte in den Lernzuwachsen. Schaut man hier auf die Verteilung der Antwortoptionen (siehe Tab. 7.18), resultiert der Lernzuwachs in erste Linie daraus, dass im Falle der 1D-Adaption 10 % von der Antwortoption 3 zu 4 gewechselt haben. Die Antwortoptionen sind dabei genau umgekehrt formuliert, dass im Falle von 3 auf Einkaufswagen B eine größere Kraft ausgeübt werden müsse als auf A und bei Antwortoption 4 genau umgekehrt.

Tabelle 7.18: Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.VBK.01 aufgeteilt nach Treatmentgruppen (richtige Antwortoption ist rot markiert)

|                            | Antwort 1 | Antwort 2 | Antwort 3 | Antwort 4 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Prätest</b>             |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 6 %       | 7 %       | 32 %      | 56 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 6 %       | 10 %      | 25 %      | 59 %      |
| <b>Posttest</b>            |           |           |           |           |
| <b>1D-Adaption</b>         | 6 %       | 6 %       | 22 %      | 66 %      |
| <b>2DD-Mechanikkonzept</b> | 4 %       | 8 %       | 29 %      | 59 %      |

Dieser bessere Lernzuwachs auf Seiten der 1D-Adaption lässt sich anhand der zur Verfügung gestellten *Phet*-Simulation in Verbindung mit den Aufgaben aus dem Workbook erklären. In der Workbookaufgabe werden die Körper zwar in Bewegungsrichtung beschleunigt und nicht entgegengesetzt, die Unterscheidung zwischen verschiedenen großen Massen bei gleicher Anfangsgeschwindigkeit findet aber analog statt und wäre auch genauso in der Simulation umsetzbar. Im Treatment zum 2DD-Mechanikkonzept wird diese Aufgabe hingegen im Zusammenhang der Simulation gar nicht thematisiert, da hier die Einwirkung stets senkrecht zur Bewegungsrichtung wirkt. Die Argumentation kann durch diese Treatmentgruppe somit ausschließlich anhand der Newton'schen Bewegungsgleichung erfolgen.

## 7.8 Einfluss der Kontrollvariablen

In diesem Teil der Auswertung werden die Effekte der erhobenen Kontrollvariablen (siehe Tabelle 6.4) zusätzlich zu den Unterschieden zwischen den beiden Treatmentgruppen in Form von Varianzanalysen (ANOVA) beziehungsweise Kovarianzanalysen (ANCOVA) (siehe Kap. A.2.3 im Anhang) auf die Lernzuwächse der SchülerInnen untersucht. Die Analyse erfolgt zum einen auf der Individualebene der SchülerInnen und auf der Klassenebene, je nachdem auf welche Ebene sich die Kontrollvariablen beziehen. Zuvor werden die möglichen Kovariaten für die Analyse bestimmt.

### 7.8.1 Einflüsse auf der Individualebene

Auf der Individualebene der SchülerInnen können neben der Zugehörigkeit zu einer der beiden Treatmentgruppen das Geschlecht und das Alter als demographische Daten miteinbezogen werden. Da sich die beiden Treatmentgruppen in den Prätest Personenfähigkeiten nicht signifikant voneinander unterscheiden<sup>36</sup>, werden diese ebenfalls als Kovariate berücksichtigt. Bezüglich Interesse und Selbstkonzept können nur die Werte zum Prätestzeitpunkt als Kovariaten in der Analyse betrachtet werden, da diese sich zum Posttestzeitpunkt zwischen den beiden Treatmentgruppen signifikant voneinander unterscheiden. Die Ergebnisse in den beiden KFTs (N-Test 2 und N-Test 3) können ebenfalls als Kovariaten aufgenommen werden.

Im ersten Schritt der Analyse wurden nur die Haupteffekte betrachtet. Das Regressionsmodell wird signifikant und besitzt mit einem  $R^2$  von .263 (korrigiertes  $R^2 = .250$ ) nach Cohen eine hohe Varianzaufklärung. Der Levene-Test auf Verletzung der Varianzhomogenität wird nicht signifikant, weshalb Homoskedastizität angenommen werden kann. Des Weiteren liegt der Wert der Durbin-Watson-Statistik bei 2.05 und alle Toleranzwerte der Kollinearitätsstatistik oberhalb von 0.1 wodurch Autokorrelation und Multikollinearität der Prädiktoren ausgeschlossen werden können. Damit sind an dieser Stelle alle Voraussetzungen der ANCOVA erfüllt. Die Ergebnisse können Tabelle 7.19 entnommen werden. Es ergeben sich höchst signifikante Effekte für die Kontrollvariablen Geschlecht<sup>37</sup>, Prä-Selbstkonzept, N-Test 3, die Prätest Personenfähigkeiten und ein signifikanter Effekt für die Variable N-Test 2. Für die übrigen Kovariaten Alter und Prä-Interesse ergeben sich keine signifikanten Effekte. Unter Berücksichtigung der Kovariaten wird auch der Effekt zwischen den beiden Treatmentgruppen signifikant allerdings bei einer ebenfalls sehr geringen Effektstärke. Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben liefert die gleichen Ergebnisse mit entsprechend gleichen Signifikanzniveaus.

Eine weitere Analyse mit zusätzlichen Interaktionsthermen zwischen der Zugehörigkeit der Treatmentgruppe und den übrigen Kovariaten liefert keine weiteren signifikanten Effekte oder relevante Beiträge zur Varianzaufklärung.

<sup>36</sup>Voraussetzung für die Wahl einer Kovariaten siehe Kap. A.2.3 im Anhang

<sup>37</sup>Der Code 0 entspricht „männlich“.

Tabelle 7.19: Regressionstabelle für die ANCOVA auf der Individualebene

| Variable                  | F-Werte              | $\beta$ | $p$        | $part\eta^2$ |
|---------------------------|----------------------|---------|------------|--------------|
| Treatment                 | $F(1, 486) = 4.88$   | -0.13   | $p < .05$  | .010         |
| Geschlecht                | $F(1, 486) = 13.48$  | -0.21   | $p < .001$ | .027         |
| Prä-Selbstkonzept         | $F(1, 486) = 12.36$  | 0.21    | $p < .001$ | .025         |
| KFT N-Test 3              | $F(1, 486) = 37.01$  | 0.05    | $p < .001$ | .070         |
| Prätest Personenfähigkeit | $F(1, 486) = 122.99$ | -0.54   | $p < .001$ | .202         |
| KFT N-Test 2              | $F(1, 486) = 6.76$   | 0.01    | $p < .05$  | .014         |
| Alter                     | $F(1, 486) = 0.18$   | -0.01   | $p = .676$ | $< .001$     |
| Prä-Interesse             | $F(1, 486) = 2.40$   | -0.08   | $p = .122$ | .005         |

### 7.8.2 Einflüsse auf der Klassenebene

Auf der Klassenebene werden neben der Zugehörigkeit zu einer der beiden Treatmentgruppen die Art des Unterrichts (Präsenz/Online)<sup>38</sup>, die Art, in der der Posttest durchgeführt wurde (Präsenz/Online)<sup>39</sup> und die Unterrichtszeit als Kovariaten berücksichtigt.

Das Regressionsmodell wird nicht signifikant und besitzt mit einem  $R^2$  von .098 (korrigiertes  $R^2 = -.002$ ) nach Cohen eine geringe Varianzaufklärung. Der Levene-Test auf Verletzung der Varianzhomogenität wird nicht signifikant. Der Wert der Durbin-Watson-Statistik liegt bei 1.865 und alle Toleranzwerte der Kollinearitätsstatistik oberhalb von 0.1. Damit kann Autokorrelation und Multikollinearität der Prädiktoren ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse der ANCOVA können Tabelle 7.20 entnommen werden.

Tabelle 7.20: Regressionstabelle für die ANCOVA auf der Klassenebene

| Variable            | F-Werte           | $\beta$ | $p$        | $part\eta^2$ |
|---------------------|-------------------|---------|------------|--------------|
| Treatment           | $F(1, 27) = 0.87$ | -0.06   | $p = .359$ | .031         |
| Art des Unterrichts | $F(1, 27) = 0.27$ | -0.03   | $p = .608$ | .010         |
| Unterrichtszeit     | $F(1, 27) = 2.64$ | -0.04   | $p = .116$ | .089         |

Es ergeben sich keine signifikanten Effekte für die Kovariate Art des Unterrichts, Art der Posttestung<sup>40</sup> und die Unterrichtszeit. Unter Berücksichtigung der Kovariaten wird der Effekt zwischen den beiden Treatmentgruppen auch nicht signifikant. Keine der Variablen trägt damit zur Varianzaufklärung auf Klassenebene bei. Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben liefert die gleichen Ergebnisse mit Signifikanzniveaus  $p > .05$ .

Eine weitere Analyse mit zusätzlichen Interaktionsthermen zwischen der Zugehörigkeit der Treatmentgruppe und den übrigen Kovariaten liefert auch auf der Klassenebene keine weiteren signifikanten Effekte oder relevante Beiträge zur Varianzaufklärung.

<sup>38</sup>Der Code 0 entspricht „Präsenzunterricht“.

<sup>39</sup>Der Code 0 entspricht der Testdurchführung „in Präsenz“.

<sup>40</sup>Die Differenz im mittleren Lernzuwachs zwischen der in Präsenz und den online durchgeführten Posttests ergibt sich genau zu Null, weshalb dies in der ANCOVA nicht berechnet werden kann.

## 7.9 Analyse der Gesamtschulklassen

Abschließend werden die Ergebnisse der Gesamtschulklassen vorgestellt. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Gymnasial- und Gesamtschulklassen wurde eine Rasch-Skalierung mit den verankerten Prätest-Itemschwierigkeiten aus Kapitel 7.1.1 vorgenommen. Bei der Analyse zeigte sich allerdings, dass bei diesem Vorgehen der Log-Likelihood Chi-Quadrat-Test sowohl für die Prä- ( $p < .05$ ) als auch für die Posttestergebnisse ( $p < .01$ ) der Gesamtschulklassen signifikant wird und damit die Modellpassung der Daten verletzt ist. Aus diesem Grund wurde eine separate Rasch-Skalierung der Gesamtschuldaten durchgeführt. Wie schon zuvor wurde eine DIF-Analyse zur Bestimmung der Anker-Items zwischen den Prä- und Posttestdaten durchgeführt, woraufhin die Items ohne signifikanten DIF-Kontrast mit den Itemschwierigkeiten zum Prätestzeitpunkt für beide Analysen verankert wurden. Die Fit-Werte sowie die DIF-Kontrast Werte der Items mit den entsprechenden Signifikanztests können Tabelle B.13 im Anhang entnommen werden. Der Log-Likelihood Chi-Quadrat-Test wird für diese Analysen zu den beiden Testzeitpunkten nicht signifikant (Prätest  $p = .428$ , Posttest  $p = .699$ ), die geschätzten Werte verhalten sich nun also rasch-konform. Die Personenreliabilität liegt im Falle des Prätests bei .39 und die Itemreliabilität bei .95. Im Falle des Posttests liegen die Reliabilitätswerte für die Personen bei .54 und für die Items bei .95.

Ein zweiseitiger t-Test für verbundene Stichproben zeigt keinen signifikanten Lernzuwachs für die SchülerInnen der Gesamtschulklassen. Die mittlere Personenfähigkeit liegt im Prätest bei  $\mu = -0.85$  ( $\sigma = .64$ ) und im Posttest bei  $\mu = -0.87$  ( $\sigma = .74$ ). Der Lernzuwachs ist mit einer mittleren Differenz von 0.02  $[-0.10, 0.14]$  Logits sogar im Prätest leicht höher,  $t(147) = 0.30, p = .767^{41}$ ,  $d = 0.02 [-0.14, 0.19]$ .

<sup>41</sup>Ein Bootstrapping mit  $N = 10.000$  Stichproben führt zu dem gleichen Ergebnis mit Signifikanzniveaus  $p > .05$ . Die 95 % Konfidenzintervalle der durchschnittlichen Differenz unterscheiden sich ab der ersten Nachkommastelle.

## 8 Diskussion

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Diskussion der zuvor vorgestellten Ergebnisse und der Beantwortung der Forschungsfragen beziehungsweise der Diskussion der aufgestellten Hypothesen dieser Arbeit. Es folgt die Diskussion und Interpretation der Varianzanalysen unter der Berücksichtigung der Kontrollvariablen sowie eine methodische Diskussion. Den letzten Teil des Kapitels bildet die kritische Reflexion von Einschränkungen und Grenzen dieser Arbeit.

Als Einleitung zu diesem Diskussionskapitel soll noch einmal auf die Ergebnisse der Mehrebenenanalyse (siehe Kap. 7.2) hingewiesen werden. Hiernach liegt in den Daten keine hierarchische Struktur vor und es konnte gezeigt werden, dass die Individualebene der SchülerInnen in einem viel höheren Maß zur Aufklärung der Gesamtvarianz beiträgt als die Klassenebene. Aus diesem Grund ist es zulässig die zuvor vorgestellten Ergebnisse der anderen Analysen ausschließlich auf der Individualebene der SchülerInnen mit der entsprechenden Stichprobengröße zu diskutieren. Ausnahme bildet die Varianzanalyse mit Kovariaten, welche sich explizit auf die Klassenebene beziehen.

### 8.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Es folgt die Beantwortung der beiden in Kapitel 5.2 formulierten Forschungsfragen:

1. In welchem Umfang führt der Unterricht nach den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) in beiden Treatmentgruppen zu einem Lernzuwachs der SchülerInnen in der Sekundarstufe I?
2. Welche Unterschiede im Lernzuwachs bei den SchülerInnen gibt es zwischen dem Unterricht nach den beiden Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) in der Sekundarstufe I, wenn die anderen Gestaltungsmerkmale (methodische Elementarisierung und Repräsentationsformen) kontrolliert werden?

#### 8.1.1 Forschungsfrage 1: Lernzuwachs innerhalb der beiden Treatmentgruppen

Für beide Treatmentgruppen konnte in den Ergebnissen ein höchst signifikanter Lernzuwachs (Zunahme der mittleren Personenfähigkeit vom Prä- zum Posttestzeitpunkt) bei

Effektstärken von  $d = 0.30$  im Falle der 1D-Adaption und von  $d = 0.25$  im Falle der 2DD-Mechanikkonzept gezeigt werden. Die Effektstärken liegen nach Hattie (2009) in der Größenordnung eines LehrerInneneffekts. Dies kann man vergleichen mit dem Unterschied zwischen den SchülerInnen mit und ohne Mechanikunterricht aus der Vorstudie. Dort ergab sich eine Effektstärke von  $d = 0.31$ . Die Effektstärke des Lernzuwachses in den beiden Treatmentgruppen entspricht demnach einer erwartbaren Größenordnung nach einem Schuljahr Mechanikunterricht. Ausgehend von der Studie von Tobias (2010) wurden in Kapitel 5.2 zwei Hypothesen zur Größenordnung der zu erwartenden Effektstärken aufgestellt. Diese Hypothesen, nach denen die Effektstärke der Lernzuwächse der beiden Treatmentgruppen oberhalb eines LehrerInneneffekts läge, werden also an dieser Stelle falsifiziert. Die Effektstärken liegen unter denen aus der Studie von Tobias (2010). Hierbei wurden allerdings noch nicht die unterschiedlichen Auswertungsmethoden (Rasch vs. klassische Testtheorie) berücksichtigt. Bei einer Auswertung der Ergebnisse nach der klassischen Testtheorie führen die beiden Treatments in dieser Studie zu höheren Lernzuwächsen (1D-Adaption  $d = 0.51$ , 2DD-Mechanikkonzept  $d = 0.53$ ), welche nun auch oberhalb eines LehrerInneneffekts liegen. Für diese Art der Auswertung treffen die aufgestellten Hypothesen also zu. Die 95 % Konfidenzintervalle der Effektstärken überschneiden sich hierbei nicht, es handelt sich demnach nicht um eine natürliche statistische Schwankung. Diese Diskrepanz der Ergebnisse aufgrund von verschiedenen Auswertungsmethoden wird genauer in Kapitel 8.3 diskutiert.

Betrachtet man die Verteilung der SchülerInnen in den Wright-Maps kann man zusammenfassend sagen, dass die Leistungsentwicklung der SchülerInnen auseinander läuft. Während die SchülerInnen im Durchschnitt in beiden Treatments dazulernen und sich eine deutliche Leistungsentwicklung an der Spitze zeigt, gibt es anscheinend ebenso SchülerInnen am unteren Ende, die nicht dazu lernen.

Für beide Treatmentgruppen verbessert sich die Reliabilität (d. h. die interne Konsistenz) des Fachwissenstests von Prä- zum Posttestzeitpunkt<sup>42</sup>. Dies kann nach Taber (2018) als Indiz dafür angesehen werden, dass sich das konzeptuelle Verständnis der SchülerInnen stabilisiert und an Konsistenz gewinnt.

Vergleicht man die Lernzuwächse in den Leistungsklassen, die zum Präzeitpunkt gebildet wurde, so zeigt sich für beide Treatments kein Unterschied. Von beiden Treatments scheinen starke und schwache Lerner also in gleicher Weise zu profitieren. Die Besetzung der Leistungsklassen bleibt in den zwei Treatmentgruppen zu beiden Testzeitpunkten in etwa gleich. Es gibt also sowohl schwache SchülerInnen, welche nach den beiden Treatments so gut gelernt haben, dass sie in die höherer Leistungsklasse gewechselt haben als auch starke SchülerInnen, welche durch die Treatment schlechter gelernt haben und in die schwache Leistungsklasse abgestiegen sind.

Ausnahme von den bisherigen positiven Ergebnissen bilden die Gesamtschulklassen. Hier konnte kein Lernzuwachs bei den SchülerInnen nachgewiesen werden, die Personenfähigkeit ist im Posttest sogar leicht rückgängig. Der Mechaniklehrgang der 1D-Adaption ist

<sup>42</sup>In der Hauptstudie liegt zum Prätestzeitpunkt (siehe Kap. 7.1.1) ein Wert von .46 und zum Posttestzeitpunkt (siehe Kap. 7.1.3) im Fall der 1D-Adaption ein Wert von .67 beziehungsweise im Falle des 2DD-Mechanikkonzepts eine Personenreliabilität von .65 vor.

somit bezogen auf diese Stichprobe nur für Gymnasialklassen geeignet und möglicherweise für Gesamtschulklassen zu anspruchsvoll.

### **8.1.2 Forschungsfrage 2: Unterschiede im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen**

Die Ausgangslage der beiden Treatmentgruppen bezogen auf die Prätest Personenfähigkeiten und die erfassten Kontrollvariablen ist als vergleichbar anzunehmen.

Vergleicht man die Stärke des Lernzuwachses in den beiden Treatmentgruppen, so kann kein signifikanter Unterschied zwischen der 1D-Adaption und dem 2DD-Mechanikkonzept festgestellt werden ( $d = 0.02$ ).

Besonders deutlich wird das Ergebnis bei der Betrachtung von Abbildung 7.6. Sowohl zum Prä- als auch zum Posttestzeitpunkt liegt die mittlere Personenfähigkeit der SchülerInnen aus der Treatmentgruppe zur 1D-Adaption höher als die der Gruppe zum 2DD-Mechanikkonzept. Diese Unterschiede sind, wie bereits erwähnt, aber nicht signifikant. Vergleicht man nun die Zunahme also den Lernzuwachs als Steigung in diesem Diagramm, fällt diese für beide Treatmentgruppen nahezu identisch aus.

Bei der Diskussion von Forschungsfrage 1 wurde die Zunahme der Reliabilitätskoeffizienten vom Prä- zum Posttestzeitpunkt als Entwicklung eines konsistenteren Konzeptverständnisses verstanden. Die Zunahme liegt ebenfalls für beide Treatmentgruppen im vergleichbaren Rahmen. Das bedeutet also, dass nicht nur der Lernzuwachs, sondern auch die Steigerung des konsistenten Konzeptverständnisses in beiden Treatmentgruppen gleichermaßen vorliegt.

Vergleicht man nun den Lernzuwachs zwischen den Treatmentgruppen innerhalb der beiden Leistungsklassen zeigt sich auch hier in beiden Fällen kein signifikanter Unterschied. Insgesamt kann also kein Unterschied im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen festgestellt werden kann, wodurch die in Kapitel 5.2 aufgestellt Hypothese zur zweiten Forschungsfragen falsifiziert wird.

Auch wenn es bezüglich der Lernzuwächse keine Unterschiede zwischen den Treatmentgruppen gibt, so konnten doch in der Einzelitemanalyse (siehe Kap. 7.7) Unterschiede in den Lernzuwächse zwischen den beiden Treatmentgruppen bezüglich einzelner Items gezeigt werden.

## **8.2 Diskussion der Kontrollvariablen**

An dieser Stelle werden die signifikanten Effekte der Kontrollvariablen als Kovariaten auf den Lernzuwachs der SchülerInnen auf Individual- und Klassenebene diskutiert.

Auf der Individualebene der SchülerInnen werden die Kontrollvariablen Prätest-Personenfähigkeiten, KFT N-Test 3, Geschlecht und Prätest-Selbstkonzept diskutiert.

Der größte Effekt auf den Lernzuwachs der SchülerInnen ergibt sich für die Prätest-

Personenfähigkeiten. Der negative Regressionskoeffizient (siehe Kap. 7.8) bedeutet, dass SchülerInnen, die zu Beginn des Mechanikunterrichts schon viel wissen, weniger dazu lernen als SchülerInnen mit geringerem Vorwissen. Eine weitere Variable mit Einfluss auf den Lernzuwachs besteht im Abschneiden der SchülerInnen im kognitiven Fähigkeitentest N-Test 3 mit einem mittleren Effekt. Dieser KFT steht unter anderem mit der Fähigkeit zum räumlichen Denken in Verbindung. Der Regressionskoeffizient ist positiv, eine höhere kognitive Fähigkeit im N-Test 3 führt also zu einem besseren Lernzuwachs der SchülerInnen. Die räumliche Intelligenz ist insbesondere bei der Darstellung von Bewegungen durch Stroboskopbilder und den Konstruktionen der ikonischen Repräsentationen hilfreich, wodurch dieser Effekt erklärt werden könnte. Die Effekte der Kovariaten Geschlecht und Prä-Selbstkonzept werden zwar signifikant, tragen aber nur sehr wenig zur Varianzaufklärung bei. Hiernach erzielen die männlichen Schüler einen besseren Lernzuwachs als die weiblichen und SchülerInnen mit höherem Selbstkonzept zum Prätestzeitpunkt ebenfalls. Die übrigen Kovariaten Alter und Prä-Interesse haben keinen Effekt auf den Lernzuwachs. Wenn die Kovariaten berücksichtigt werden, wird auch der Effekt im Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen signifikant allerdings bei einer sehr geringen Effektstärke ( $part\eta^2 = .010$ ). Wenn also für den Vergleich der beiden Treatmentgruppen alle Kovariaten als konstant angenommen werden, wird der Unterschied zwischen diesen signifikant. Die höchste Varianzaufklärung liegt zum Beispiel mit Abstand auf Seiten der Prätest-Personenfähigkeiten. Es wird also angenommen, dass alle SchülerInnen zu Beginn in beiden Treatmentgruppen über die gleiche Personenfähigkeit verfügen. Durch die ANCOVA wird aber nicht nur die Varianz der Kovariaten aus der abhängigen, sondern auch aus der unabhängigen Variable entfernt (vgl. Miller & Chapman, 2001). Man kann sich an dieser Stelle also fragen, wie realistisch dies bezogen auf die Ausgangsstichprobe ist, gerade wenn man die Verteilung der Personenfähigkeiten in den Rasch-Analysen betrachtet. Dieser signifikante Effekt sollte daher mit Vorsicht betrachtet werden, da eine Stichprobe, in der alle Kovariaten konstant sind, alles andere als repräsentativ ist.

Auf der Klassenebene liefert die ANCOVA keinerlei signifikante Effekt. Insgesamt wird das vollständige Regressionsmodell auch nicht signifikant und weist nur eine geringe Varianzaufklärung auf. Dies lässt darauf schließen, dass sich die Varianz zwischen den Klassen durch die vorhandenen Variablen nicht aufklären lässt oder anders formuliert bezüglich der erfassten Variablen auf der Klassenebene kein Unterschied im Lernzuwachs zwischen den Klassen besteht. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der Mehrebenenanalyse nach der die Individualebene der SchülerInnen in einem viel größeren Maß zur Aufklärung der Gesamtvarianz beiträgt als die Klassenebene. In Bezug auf die Kovariaten bedeutet dies, dass die Art des Unterricht (Präsenz/Online), die Art der Posttestung (Präsenz/Online) und die Unterrichtszeit keinen Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen haben. Die SchülerInnen, welche coronabedingt online unterrichtet werden mussten, lernen also im Mittel genauso viel dazu wie die SchülerInnen, die normal in Präsenz unterrichtet wurden, was als ermunterndes Ergebnis dieser Studie in Bezug auf die Folgen der Corona-Pandemie gewertet werden kann.

## 8.3 Methodische Diskussion

### Rasch-Analyse vs. klassische Testtheorie

Die Aussagen auf Grundlage der Rasch-Analysen sind belastbarer als bei der Auswertung nach der klassischen Testtheorie. Durch die Bildung der Personenfähigkeiten erhält man eine intervallskalierte Variable. Im Gegensatz dazu kann man bei der dichotomen Auswertung der Items aus dem Fachwissenstest nicht von einer Intervallskalierung ausgehen, da die Items potenziell unterschiedlich schwierig sind und damit eigentlich unterschiedlich bepunktet werden müssten. Einen weiteren Aspekt bildet die Identifizierung der DIF-behafteten Items in Folge der Rasch-Analyse. Diese Items verhalten sich zu den verschiedenen Testzeitpunkten und/oder zwischen den beiden Treatmentgruppen unterschiedlich und dürfen bezüglich ihrer Itemschwierigkeit variieren. Dies ermöglicht einen einheitlichen Vergleich zwischen den verschiedenen Testzeitpunkten und Treatmentgruppen, da ein Items mit einer niedrigen Schwierigkeit für die eine Gruppe nicht automatisch mit der gleichen Schwierigkeit auf die andere Gruppe bezogen wird, sondern immer in Relation zur Gesamtstichprobe der Gruppe gesetzt werden kann. Alle soeben genannten Aspekte führen potenziell dazu, dass die Effektstärken bei einer Auswertung nach klassischer Testtheorie über- oder unterschätzt werden können. Betrachtet man in dieser Studie das Verhalten der Lernzuwächse auf den einzelnen Items (Abb. 7.12) kann man durch die teilweise sehr hohen Lernzuwächse auf den DIF-behafteten Items (rot markiert) auf eine Überschätzung der Effektstärken schließen. Die kleinen Effektstärken erscheinen somit bei Diskussion von Forschungsfrage (Kap. 8.1.1) eine realistischere Abbildung der Lernzuwächse zu sein.

### Nutzen des Verstehensmodells eines Konzepts nach Drollinger-Vetter (2011)

Eine Neuerung dieser Arbeit bestand in der Verwendung des Verstehensmodells eines Konzepts nach Drollinger-Vetter (2011). Dieses Modell wurde dazu genutzt den Prozess der Elementarisierung auf verschiedenen Ebenen zu differenzieren und somit ein adäquateres Begriffsnetz für die Arbeit aufbauen zu können. Die Unterscheidung zwischen den Ebenen der Verstehens Elemente, Repräsentationsformen und Konzepte hat im Verlauf dieser Arbeit zu einer besseren Vergleichbarkeit von verschiedenen Elementarisierungen geführt, indem die Ebene der Repräsentationsformen als Verbindung zwischen den Verstehens Elementen und den Konzepten konstant gehalten wurde, wodurch es möglich war direkte Analogien auf den anderen Ebenen zwischen den Elementarisierungen zu bilden. Neben der begrifflichen Differenzierung von verschiedenen Aspekten der Elementarisierung nach Bleichroth et al. (1991) stellt die Unterscheidung von verschiedenen Ebenen, auf denen die Elementarisierung stattfinden kann, ein gewinnbringende Neuerung zur allgemeinen Auffassung und zur Anwendung vom Prozess der Elementarisierung in der Fachdidaktik dar.

## Nutzen der Validierungslogik zur Planung des Studiendesigns

Die zweite Neuerung dieser Arbeit bestand in der Formulierung einer Validierungslogik in Anlehnung an der Arbeit von Dickmann (2016). Die Validierungslogik lieferte hierbei einen roten Faden für die gesamte Bewertung der Validität von Aussagen, die auf Grundlage der Ergebnisse getätigt werden konnten und zeigte dabei auf der anderen Seite auch Einschränkungen in der Validität auf. Auch für die LeserInnen einer Arbeit dient dieser rote Faden dazu, die Argumente hinter der Validität der Aussagen in der auftretenden Reihenfolge nachvollziehen zu können. Die Argumente hinter den verschiedenen Übersetzungsschritten von der Zielebene hin zu den gemessenen Testwerten, verbunden mit der Bewertung der Validität, entstammen in dieser Arbeit zu großen Teilen den Einschränkungen der bisherigen Forschungsarbeiten, hat aber auch neue Argumente, welche einer Diskussion bedurften, aufgezeigt.

Das Aufstellen einer Validierungslogik eignet sich über diese Arbeit hinaus als standardisierte Methode für die Planung einer Studie und sollte am besten vor der Durchführung der eigentlichen Erhebung aufgestellt werden, um die Argumente im Anschluss auf Grundlage der gewonnenen Ergebnissen diskutieren zu können. In diesem Fall kann es auch dazu kommen, dass im Zuge der Diskussion einzelnen Argumente nicht zutreffen, wie es auch in dieser Arbeit der Fall ist, was aber dennoch immer berichtet werden sollte. Die Stärke des Vorgehens liegt des Weiteren darin, dass durch die Betrachtung der einzelnen Übersetzungsschritte alle auftretenden Ebenen in die Validierung miteinbezogen werden müssen. Die Forschungsfragen einer Arbeit werden somit nicht direkt anhand der erhobenen Testwerte beantwortet, sondern es wird geschaut, wie sich Aussagen auf Grundlage der Testwerte in anderen Ebenen übersetzen lassen und ob diese im Falle einer anderen Ebene weiterhin ihre Gültigkeit behalten. Dabei kann es dazu kommen, dass einzelnen Ebenen potenziell nicht so gut durch Argumente gestützt werden können wie andere. Im Fall der vorliegenden Arbeit konnte beispielsweise die Ebene der Performanz nicht ausreichend durch Argumente validiert werden, da dies den Umfang der durchgeführten Studie deutlich überschritten hätte. Dies bereitet aber den Weg für kommende Forschung, die auf den Einschränkungen der anderen Arbeiten aufbauen können, welche erst durch das Aufstellen einer Validierungslogik sichtbar und transparent gemacht werden. Insgesamt kann man dieser Diskussion den Appell entnehmen, diese Methode der Validierung für zukünftige Forschungsarbeiten als Standard zu übernehmen.

## 8.4 Limitationen der Studie

Abschließend sollen die Limitationen der durchgeführten empirischen Studie im Hinblick auf das Design verbunden mit der Auswahl der Stichprobe, die aufgestellte Validierungslogik inklusive des eingesetzten Fachwissenstests und die Möglichkeit der Verallgemeinerung auf „konventionellen“ Mechanikunterricht diskutiert werden.

### Limitationen bezogen auf Design und Stichprobe

Bei der Untersuchung handelte es sich um eine quasi-experimentelle Feldstudie. Die Ergebnisse sind also bezüglich der Feldbedingungen, in diesem Fall realer Schulunterricht, repräsentativ. Für die Erhebung der Stichprobe wurden im Raum Bochum und im Raum Frankfurt am Main Lehrkräfte angeschrieben, wobei die Teilnahme an der Studie daran gebunden war, dass die Lehrkräfte nach einem potenziell unbekannten Konzept und anhand von verpflichtenden Materialien unterrichten sollten. Es ist daher nicht auszuschließen, dass es sich bei den an der Studie teilnehmenden Lehrkräften um eine positiv Auswahl besonders motivierter und engagierter PhysiklehrerInnen handelt, was von vornherein einen positiven Einfluss auf den Unterricht und damit auf den Lernzuwachs der SchülerInnen bewirkt haben könnte. Um diese Variable der unterrichtenden Lehrkräfte besser kontrollieren zu können, hätten in Bezug auf das Angebots-Nutzungs-Modell nach Helmke (2009) in Abbildung 6.2 weitere Kontrollvariablen bezüglich der **Lehrpersonen** wie die fachliche, didaktische, diagnostische Kompetenz, die Klassenführungscompetenz oder das Professionswissen erfasst werden können. Bei der Auswahl der Lehrkräfte und Schulen wurden zudem äußere Faktoren, welche im Angebots-Nutzungs-Modell Helmke (2009) unter dem Punkt **Kontext** aufgeführt sind wie zum Beispiel der regionale Kontext, weitestgehend nicht berücksichtigt, da das Ziel der Studie war, die beiden Mechanikkonzepte anhand einer möglichst heterogenen Stichprobe zu testen. Hieraus ergeben sich allerdings Einschränkungen bezüglich Aussagen über die Repräsentativität der ausgewählten Lehrkräfte und Schulen. Die einzige Einschränkung war, dass sich das Angebot nur an Gymnasial- oder Gesamtschullehrkräfte in der Sekundarstufe I richtete mit der Bedingung, dass die SchülerInnen noch keinen Mechanikunterricht hatten.

Die Aufteilung der Lehrkräfte auf die beiden Mechanikkonzepte wurde nicht randomisiert vorgenommen, stattdessen konnten die Lehrkräfte eine Präferenz dazu äußern, ob sie die Mechanik eindimensional mit konstanten Kräften oder zweidimensional mit Stößen unterrichten möchten, und wurden entsprechend dieser auf die beiden Treatments aufgeteilt. Das vollständige Konzept war ihnen zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt. Diese Entscheidung wurde getroffen, um zu verhindern, dass eine Lehrkraft später nach einem Konzept unterrichten musste, von dem er oder sie nicht überzeugt war. Das führte allerdings dazu, dass bis auf eine Ausnahme alle Gesamtschullehrkräfte sich für die 1D-Adaption entschieden mit der Begründung, dass ihnen das 2DD-Mechanikkonzept für ihre Klassen zu schwierig erscheine. Darüber hinaus konnte für die Gesamtschulklassen auch kein Lernzuwachs der SchülerInnen nach Durchführung des Treatments gezeigt werden, weshalb die Ergebnisse dieser Studie auf die teilnehmenden Gymnasialklassen beschränkt sind. Auch die SchülerInnen verblieben für die Studie innerhalb ihrer Klassengemeinschaften und wurden nicht randomisiert auf die beiden Treatmentgruppen aufgeteilt. Im Zuge der Mehrebenenanalyse konnte allerdings gezeigt werden, dass in den Daten keine hierarchische Struktur vorliegt, damit also für diese Stichprobe die Ebene der Klassenzugehörigkeit keinen Einfluss auf den gemessenen Lernzuwachs der SchülerInnen hat. Auch auf der Ebene der SchülerInnen hätten nach dem Angebots-Nutzungs-Modell nach Helmke (2009) weitere Kontrollvariablen bezüglich der **Familie** und des **Lernpotenzials** der

SchülerInnen erfasst werden können, um hierdurch genauere Aussagen über die Repräsentativität der Stichprobe machen zu können. Wie bereits oben erwähnt, war das vorrangige Ziel dieser Studie die Implementation in einer möglichst heterogenen Stichprobe.

Eine weitere große Einschränkung der Studie bildet der durch die Corona-Krise notwendige Onlineunterricht der SchülerInnen. Hierdurch ergibt sich eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren auf den Unterricht und das Lernen der SchülerInnen wie zum Beispiel die technische Ausstattung und der Umgang mit neuen Medien seitens der Lehrkräfte oder der SchülerInnen. Da diesbezüglich keine Kontrollvariablen im Zuge des Onlineunterrichts verfasst wurden, ergeben sich auch hier Einschränkungen bezüglich Aussagen über die Repräsentativität der Stichprobe dieser Studie. Im Kapitel zur Varianzanalyse (7.8) konnte aber zumindest gezeigt werden, dass die unterschiedlichen Formate des Unterricht und der Testungen keinen Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen hatten.

### **Limitationen im Zuge der Validierungslogik**

Im Kapitel zur Diskussion der Folge von Übersetzungsschritte (siehe Kap. 6.5.6) wurden bereits Einschränkungen bezogen auf die Validität aufgezeigt, welche sich aus den teilweise oder gar nicht erfüllten Argumenten ergeben haben. In der Ebene der Mechaniklehrgänge wurde bezogen auf das zur Verfügung gestellte Material versucht die Lehrgänge zur 1D-Adaption und zum 2DD-Mechanikkonzept möglichst analog zueinander zu gestalten. Durch die unterschiedlichen Elementarisierungen laufen die beiden Lehrgänge allerdings an manchen Stellen auseinander, wobei gezeigt werden konnte, dass dennoch die gleiche Menge an Materialien für die Thematisierung der jeweiligen Inhalte vorliegt und auch die zeitliche Planung der Unterrichtseinheiten für beide Treatmentgruppen insgesamt gleich ausfällt. Eine Einschränkung gab es an dieser Stelle bezüglich der zur Verfügung gestellten Simulationen, da diese, bezogen auf ihre Funktion, nicht analog zueinander aufgebaut waren. Ein Einfluss der Unterschiede der Simulationen auf den Lernzuwachs der SchülerInnen kann daher nicht ausgeschlossen werden.

In der Ebene des Unterrichts wurde den Lehrkräften eine verpflichtende Lernprozessesstruktur anhand der Unterrichtsverlaufspläne vorgegeben. Es wurde allerdings nicht erfasst, ob sich die Lehrkräfte auch wirklich an diese Art der Strukturierung gehalten haben oder ob von dieser abgewichen wurde. Eine Möglichkeit der Sicherung dieser Variable wäre die Videografie der Unterrichtsstunden verbunden mit der Analyse der Lernprozessesstruktur gewesen, wie sie zum Beispiel bei Zander (2015) durchgeführt wurde. Ein solches Vorgehen wäre allerdings durch die hohe Anzahl der Klassen mit einem sehr großen logistischem Aufwand verbunden gewesen und hätte durch die zusätzliche Analyse der Unterrichtsvideos den Rahmen dieser Arbeit erheblich vergrößert. Im Sinne des Angebots-Nutzungs-Modell nach Helmke (2009) können für diese Studie auf der Ebene des **Angebots** nur Aussagen über die Qualität des Lehr-Lern-Materials gemacht werden, weil dieses den Lehrkräften zur Verfügung gestellt wurde, nicht aber über die übrigen Qualitäten des Unterrichts. Es kann an dieser Stelle aber gesagt werden, dass durch nicht vorhandenen Varianz auf Klassenebene der Unterschied in der Qualität des Unterrichts nivelliert wurde. Um eine Aussage darüber machen zu können, ob die Lehrkräfte das Material auch wie geplant

in ihrem Unterricht eingesetzt haben, wurden stichprobenartig Workbooks der SchülerInnen eingesammelt und im Zuge eines ersten Treatment-Checks bezüglich des Bearbeitungsstands ausgewertet (siehe Kap. 6.5.3.3). Anhand der Ergebnisse konnte dieser erste Treatment-Check durch einen Bearbeitungsstand von Minimum 66 % in der Treatmentgruppe zum 2DD-Mechanikkonzept und im Falle der anderen mit über 80 % bestätigt werden. Hierdurch ergibt sich allerdings die Einschränkung, dass der Umfang der Bearbeitung in der einen Treatmentgruppe höchst signifikant höher ausfällt als in der anderen. Insgesamt stellen die eingesammelten Workbooks auch nur eine gewisse Auswahl dar, welche möglicherweise nicht repräsentativ bezogen auf die Gesamtstichprobe ist. Aber auch durch diesen ersten Treatment-Check kann letztendlich keine Aussage darüber gemacht werden, mit welcher Funktion und Intention das Material von den Lehrkräften in ihrem Unterricht eingesetzt wurde.

Die Einschränkungen in der Ebene der Performanz aufgrund der fehlenden Untersuchung des Aufbaus eines konzeptionelles Verständnisses über das jeweilige Mechanikkonzept bei den SchülerInnen wurde bereits hinreichend bei der Aufstellung der Validierungslogik (siehe Kap. 6.4.2) diskutiert. Möglichkeiten der Untersuchung wären Leitfaden gestützte Interviews oder Befragungen mit lautem Denken gewesen, wobei diese Methoden wie schon zuvor die Videografie der Unterrichtsstunden den Umfang der Arbeit erheblich vergrößert hätten. Um dennoch Aussagen über die Anwendung der Konzepte durch die SchülerInnen machen zu können, wurde in einem zweiten Treatment-Check die Korrektheit der bearbeiteten Workbookaufgaben bewertet. Dabei konnte zumindest gezeigt werden, dass die Aufgaben in den Workbooks zu einem hinreichend großen Anteil durch die SchülerInnen korrekt nach den jeweiligen Mechanikkonzepten gelöst werden konnten. Dabei ist allerdings zu beachten, dass nur das Endprodukt nach Abschluss der Unterrichtsreihe erhoben wurde und keine Aussagen über den Lösungsprozess selbst möglich sind. So bleibt unklar, ob die SchülerInnen wirklich über die Konzepte zur Lösung der Aufgaben verfügen oder ob es sich um die im Plenum besprochenen Lösungen handelt, welche gar nicht von den SchülerInnen selbst angefertigt wurden.

In der letzten Ebene der Testwerte wurde gezeigt, dass der eingesetzte Fachwissenstest in der Lage ist Lernzuwächse im Bereich der Mechanik abzubilden, indem mit den Daten der Vorstudie quasi-längsschnittlich ein Lernzuwachs der SchülerInnen in Folge eines Schuljahres gezeigt wurde. Es bleibt allerdings unklar, welche Konzepte die SchülerInnen im Zuge ihres Mechanikunterrichts erworben haben, die zur Steigerung der Personenfähigkeit beigetragen haben. Es kann nur gesagt werden, dass das Mechanikwissen der SchülerInnen vor dem Mechanikunterricht geringer ist als danach. Eine weitere Einschränkung ist an dieser Stelle bezüglich der Stichprobe der Vorstudie zu nennen. Bei der Stichprobe handelte es sich um eine Gelegenheitsstichprobe ohne Erfassung von äußeren Faktoren, bei der die Daten in den letzten beiden Wochen vor den Sommerferien erfasst wurden.

Bezüglich des eingesetzten Fachwissenstests ergeben sich weitere Limitationen. Zum einen konnte die inhaltliche Struktur des Fachwissenstests nicht in Form von latenten Variablen abgebildet werden (siehe Kap. 6.5.5.3). Damit bleibt unklar, was der Fachwissenstest genau erfasst. Im Endeffekt kann nur die Annahme getroffen werden, dass durch den Fachwissenstest ein komplexes Konstrukt, welches als Mechanikwissen bezeichnet werden

kann, erfasst wird. Aussagen über einzelnen Skalen sind allerdings nicht möglich. Die Arbeiten von Thauern (2021) & Vogel (2021) weisen darauf hin, dass latente Konstrukte bei der Bearbeitung des Fachwissenstests auf Seiten der SchülerInnen vorliegen, es war aber nicht möglich diese explizit auszudifferenzieren. An dieser Stelle wären weitere Untersuchungen des Fachwissenstests nötig. Dies könnte auch für die mangelnde Reliabilität des Fachwissenstests zum Prätestzeitpunkt verantwortlich sein, da stets nur die Gesamtreliabilität betrachtet wurde. Die Reliabilitäten auf den einzelnen latenten Konstrukten könnte dabei theoretisch deutlich höher liegen. Testtheoretisch betrachtet, bildet die mangelnde Reliabilität eine Verletzung der notwendigen Gütekriterien eines Testinstruments, wobei die Reliabilität ihrerseits Voraussetzung für die Validität ist. Auf der anderen Seite zeigt sich aber in Folge der Treatments eine deutliche Zunahme der Reliabilitäten zum Posttest, so dass diese hier nahe am Grenzwert des Annehmbaren liegen. Fraglich ist, ob die SchülerInnen ohne fachliche Konzepte im Bereich der Mechanik überhaupt zu reliablen Antworten kommen können oder ob nicht generell eher die Ansicht von Taber (2018) mit dem Reliabilitätskoeffizienten als Grad der konsistenten Konzeptentwicklung der SchülerInnen verstanden werden kann.

### **Limitationen zur Verallgemeinerung der Ergebnisse auf „konventionellen“ Mechanikunterricht**

In dieser Studie wurden die 1D-Adaption und das 2DD-Mechanikkonzept als dynamische Zugänge zur Mechanik untersucht. Die 1D-Adaption sollte sich zwar möglichst nah am „konventionellen“ Mechanikunterricht orientieren, aufgrund der analogen Themenstruktur der beiden Mechanikkonzepte und dem Einsatz von ikonischen Repräsentationen musste aber von diesem abgewichen werden. Die 1D-Adaption repräsentiert damit nicht den „konventionellen“ Mechanikunterricht, wie er in den Schulbüchern vorkommt, da in diesen der Kraftbegriff in der Regel immer noch über die Statik eingeführt wird. Es sind somit aus dieser Studie heraus keine Aussagen über den Vergleich der beiden Mechanikkonzepte zu einem statischen „konventionellen“ Zugang möglich. Eine solche Studie wäre auch generell schwer zu realisieren, da im „konventionellen“ Mechanikunterricht grundsätzlich eine andere Strukturierung und andere Darstellungsformen verwendet werden, welche bei einem Vergleich mit einem dynamischen Zugang nicht konstant gehalten werden können. Insbesondere werden bei einem statischen Zugang keine Verbindungen zwischen den Begrifflichkeiten der Kinematik und Dynamik hergestellt. Des Weiteren kommen in der schulischen Praxis auch Mischformen aus dynamischen und statischen Elementen vor, weshalb eine Verallgemeinerung der Ergebnisse im Vergleich zu realem Schulunterricht ebenfalls nicht möglich ist (vgl. Seiter et al., 2021a, S. 13).

## **Teil III**

# **Zusammenfassung und Ausblick**



## 9 Zusammenfassung

An dieser Stelle werden die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit mit Rückbezug auf das vorgenommene Design und die Ziele der Studie zusammengefasst.

Die Zusammenfassung der bisherigen Studien zum 2DD-Mechanikkonzept lässt insgesamt auf eine hohe Lernwirksamkeit und eine gute Anwendbarkeit des Konzepts im Unterricht schließen, wobei diese Ergebnisse gewissen Einschränkungen unterliegen. Eine der wesentlichen Einschränkungen der bisherigen Forschungsarbeiten bestand darin, dass immer eine Vielzahl von verschiedenen Variablen zwischen der Treatment- und Kontrollgruppe variiert wurden (Elementarisierung, Darstellungsformen, Medien usw.), so dass die positiven Ergebnisse nicht einer Einzelnen dieser Veränderungen zugeschrieben werden konnten. Die Kontrollgruppe bestand in den meisten Fällen in Form von undefiniertem „konventionellem“ Mechanikunterricht. Zusätzlich wurde in manchen Studien die Treatmentgruppe durch die Bereitstellung umfassender Materialien oder durch die eingesetzten Testinstrumente bevorzugt. Es fand also kein fairer Vergleich statt. Ziel dieser Arbeit war es nun den Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen zu untersuchen, indem alle anderen Einflussfaktoren möglichst konstant gehalten werden und ein fairer Vergleich ermöglicht wird.

Als Ausgangspunkt wurde der 2DD-Mechaniklehrgang aus der Arbeit von Tobias (2010) gewählt, da dieser zum Zeitpunkt dieser Arbeit die aktuellste Studie zur Elementarisierung der Mechanik in der Sekundarstufe I bildete und durch die diversen Vorarbeiten zu diesem Konzept bereits vielseitig empirisch erforscht und positiv bewertet wurde. Da ein fairer Vergleich zum „konventionellen“ Mechanikunterricht nicht möglich war, wurde als zweites Treatment eine 1D-Adaption entwickelt, welche sich bezogen auf die Elementarisierung in eindeutig benennbaren Parametern vom 2DD-Mechanikkonzept unterscheidet, gleichzeitig aber ein Konstanthalten aller anderen Gestaltungsmerkmale ermöglicht. Um zunächst einen möglichst großen Abstand zwischen den Elementarisierungen zu erzeugen, wurde die 1D-Adaption so konzipiert, dass sie sich möglichst nah am „konventionellen“ Mechanikunterricht orientiert.

Die Validierung der Studie erfolgte mit Hilfe einer Validierungslogik in Anlehnung an die Arbeit von Dickmann (2016), in deren Verlauf auf die zuvor herausgearbeiteten Kritikpunkte der bisherigen Studien eingegangen wurde. Hierbei wurde in Folge der verschiedenen Übersetzungsschritte von der Zielebene dieser Arbeit (Einfluss der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen) über die Ebenen Mechanikkonzepte, Mechaniklehrgänge, Unterricht, Performanz bis zum Endpunkt der Testwerte anhand von Argumenten diskutiert, wie valide von den letztendlich erhobenen Testwerten auf die Effekte in der Zielebene geschlossen werden kann. Insgesamt konnten die Übersetzungsschritte

hinreichend validiert werden, auch wenn sich an dieser Stelle gewisse Einschränkungen bezüglich der Validität ergeben haben.

Die Studie zur Beantwortung der obigen Forschungsfragen wurde als quasi-experimentelle Feldstudie im Prä-/Posttest-Design mit zwei verschiedenen Treatmentgruppen geplant und in den beiden Schuljahren 2019/20 und 2020/21 durchgeführt. Die ausgewerteten Daten umfassen insgesamt 967 SchülerInnen aus 56 Klassen bei 28 Lehrkräften, wobei nur SchülerInnen berücksichtigt wurden, für die zu beiden Testzeitpunkten Daten vorlagen. An der Studie nahmen Gymnasial- und Gesamtschulklassen teil. Des Weiteren bestand schon bezogen auf die Prätest-Ergebnisse keine Vergleichbarkeit zwischen den Gymnasial- und Gesamtschulklassen, so dass sich der Hauptteil der Auswertung ausschließlich auf die Gymnasialklassen bezieht und die Gesamtschulklassen separat ausgewertet wurden. Die Studie war so konzipiert, dass möglichst alle Variablen zwischen den beiden Treatmentgruppen mit Ausnahme der Elementarisierung (inhaltliche Elementarisierung und didaktische Reduktion) konstant gehalten werden sollten, um schließlich von Unterschieden im eingesetzten Fachwissenstest zwischen den beiden Treatmentgruppen auf Effekte der Elementarisierung schließen zu können.

Die Auswertung erfolgte anhand einer Rasch-Analyse, da die intervallskalierten Personenfähigkeiten und Itemschwierigkeiten belastbarere Aussagen ermöglichen als die Auswertung nach klassischer Testtheorie. Zudem konnte in einer Mehrebenenanalyse eine hierarchische Struktur der Daten durch die Zusammensetzung der einzelnen SchülerInnen in Klassenverbänden ausgeschlossen und gezeigt werden, dass die Individualebene der SchülerInnen in einem viel höherem Maß zur Aufklärung der Gesamtvarianz beiträgt als die Klassenebene.

Beide Mechanikkonzepte führen zu einem höchst signifikanten Lernzuwachs in der Größenordnung eines LehrerInneneffekts nach Hattie (2009). Eine Einschränkung bildeten hierbei die Gesamtschulklassen, für die kein Lernzuwachs nachgewiesen werden konnte. Die Ergebnisse zur 1D-Adaption gelten somit nur für die Gymnasialklassen. Vergleicht man nun allerdings die Lernzuwächse zwischen den beiden Treatmentgruppen, so zeigt sich kein signifikanter Unterschied im Lernzuwachs. Im Falle der beiden in dieser Arbeit vorgenommenen Elementarisierungen der Kinematik und Dynamik konnte also durch den Unterschied in den Elementarisierungen kein Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen festgestellt werden.

In Folge einer latenten Klassenanalyse konnten zum Prä- und Posttestzeitpunkt zwei Leistungsklassen identifiziert werden. Vergleicht man hierbei die Lernzuwächse der SchülerInnen bezüglich der Aufteilung nach den Leistungsklassen zum Prätestzeitpunkt zeigt sich weder ein Unterschied zwischen den zwei Leistungsklassen innerhalb der beiden Treatmentgruppen noch zwischen diesen innerhalb der Leistungsklassen. Sowohl die schwachen als auch die starken SchülerInnen schneiden dabei im Mittel gleich gut ab.

In einer Einzelitemauswertung wurden auffällig gewordene Items detaillierter analysiert. Es zeigten sich hierbei insbesondere Items, welche sich bezogen auf den Lernzuwachs zwischen den beiden Treatmentgruppen unterschieden haben, obwohl im Mittel über den gesamten Test kein Unterschied festgestellt werden konnte. Diese Unterschiede konnten auf spezielle Einflüsse der beiden Treatments zurückgeführt werden, welche die überdurch-

schnittlichen Lernzuwächse innerhalb der Treatmentgruppen bewirkt haben.

Ein wesentliches Ergebnis bei der Auswertung der Kontrollvariablen war, dass sich kein Unterschied im Lernzuwachs der SchülerInnen zwischen dem regulärem Präsenzunterricht und dem coronabedingten Onlineunterricht zeigt. Die SchülerInnen haben in beiden Unterrichtsformaten gleich gut dazugelernt.

In Verlauf dieser Studie konnte erstmalig die isolierte Wirkung der Elementarisierung auf den Lernzuwachs der SchülerInnen am Beispiel des Mechanikunterrichts in der Sekundarstufe I gezeigt werden, wobei nach den Erkenntnissen in dieser Studie ein Unterschied in der Elementarisierung (inhaltliche Elementarisierung und didaktische Reduktion) zunächst keinen Einfluss auf den Lernzuwachs hat. Ein weiterer Ertrag dieser Arbeit besteht in Form der aufgestellten Validierungslogik mit deren Hilfe die notwendigen Übersetzungsschritte von der Zielebene des Erkenntnisinteresses hin zu den gemessenen Testwerten validiert werden konnten. Das Vorgehen nach diesem Schema liefert potenziell eine standardisierte Methode für zukünftige empirische Forschung, indem vor der Durchführung der eigentlichen Studie eine entsprechende Validierungslogik aufgestellt wird, welche im Verlauf der Übersetzungsschritte mögliche Brüche in der Validität sichtbar macht. Am Beispiel dieser Arbeit findet sich alle Einschränkungen der bisherigen Studien in Form von Argumenten in der Validierungslogik wieder.



## 10 Ausblick

Die beiden Mechanikkonzepte (1D-Adaption und 2DD-Mechanikkonzept) führen in beiden Treatmentgruppen zu einem höchst signifikanten Lernzuwachs in der Größenordnung eines LehrerInneneffekts nach Hattie (2009). Die beiden dynamischen Zugänge für sich genommen, funktionieren folglich. Es konnte jedoch kein Unterschied im Lernzuwachs zwischen diesen nachgewiesen werden. Aus den Ergebnissen lässt sich zunächst die Hypothese aufstellen, dass die Wahl von unterschiedlichen Elementarisierungen im Allgemeinen keinen Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen habe. Die wesentlichen Unterschiede in den Elementarisierungen in dieser Arbeit bestanden in der Dimension der Bewegung und der Art der Einwirkung (konstante Kräfte vs. Stöße) in der inhaltliche Elementarisierung und der didaktische Reduktion. Diese beiden Unterschiede könnten separat voneinander untersucht werden, indem zwei zweidimensionale Mechanikkonzepte mit zum einen konstanten Kräften und zum anderen mit Stößen als Einwirkung miteinander verglichen werden. Analoges gilt für verschiedene Dimensionen bei gleicher Einwirkung. Damit wäre eine detaillierter Einblick auf einzelnen Parameter von Elementarisierungen möglich. Des Weiteren wurden in dieser Studie nach dem Verstehensmodell nach Drollinger-Vetter (2011) die Ebene der Repräsentationsformen konstant gehalten. Es stellt sich also die Frage, ob ein Unterschied auf dieser Ebene der Elementarisierung zu einem Unterschied im Lernzuwachs führt. Hierzu müsste dann entsprechend alle anderen Ebenen der Elementarisierung konstant gehalten werden.

Neben der Elementarisierung wurden in dieser Studie noch weitere Veränderungen gegenüber dem „konventionellen“ Mechanikunterricht vorgenommen, welche auch schon bereits in den Vorarbeiten (Tobias, 2010) angelegt waren, aber im Verlauf dieser Studie bewusst zwischen den beiden Treatmentgruppen konstant gehalten wurden. Zu diesen Veränderungen zählen zum einen der Einsatz von Vektorpfeilen als ikonische Repräsentationen, der Einsatz von neuen Medien in Form von Simulationen und die Art der Strukturierung, welche in den SchülerInnentexten angelegt war (siehe Kap. 6.5.2.2). Da nun also der Unterschied in den Elementarisierungen nach dem Ergebnis dieser Studie potenziell keinen Einfluss auf den Lernzuwachs der SchülerInnen hat, könnte eine der anderen Veränderungen für die positiven Ergebnisse der bisherigen Evaluationsstudien verantwortlich sein, so dass sich weitere Forschung mit dem systematischen Vergleich dieser Veränderungen bei Konstanthalten der Elementarisierung beschäftigen könnte. Dabei muss allerdings, wie in dieser Arbeit ausführlich diskutiert, beachtet werden, welche Variationen von einzelnen Variablen ein Konstanthalten (z.B. der Elementarisierung) überhaupt ermöglichen. Das Konstanthalten der anderen Variablen wäre beispielsweise ohne Probleme bei der Veränderung der Unterrichtsstruktur oder dem Einsatz von verschiedenen Medien möglich.



# Literaturverzeichnis

- Alboteanu-Schirner, A., Buric, R., Burisch, C., Emse, A., Geck, E., Käßbe, K., Lauterjung, D., Lauterjung, S., Schöpper, J. & Trendel, G. (2016). *Universum Physik - Gymnasium Nordrhein-Westfalen: Band 2* (1. Aufl.). Berlin: Cornelsen Schulverlag GmbH.
- Alonzo, A. C. & Steedle, J. T. (2009). Developing and assessing a force and motion learning progression. *Science Education*, 93, 389–421.
- Amenda, T. (2017). *Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik*. Studien zum Physik-und Chemielernen, Band 230. Berlin: Logos-Verlag.
- Björklund, L. (2008). The Repertory Grid Technique: Making Tacit Knowledge Explicit: Assessing Creative work and Problem solving skills. In: H. Middleton (Hrsg.), *Researching Technology Education: Methods and techniques*. Netherlands: Sense Publishers, 46–69.
- Bleichroth, W., Dahncke, H., Jung, W., Kuhn, W., Merzyn, G. & Weltner, K. (1991). *Fachdidaktik Physik*. Köln: Aulis Deubner.
- Bloom, H. S., Hill, C. J., Black, A. R. & Lipsey, M. W. (2008). Performance Trajectories and Performance Gaps as Achievement Effect-Size Benchmarks for Educational Interventions. *Journal of Research on Educational Effectiveness*, 1(4), 289–328.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler* (4. Aufl.). Berlin: Springer.
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Brown, T. (2006). *Confirmatory factor analysis for applied research*. The Guilford Press.
- Clement, J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Physics*, 50(1), 66–70.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Aufl.). Hillsdale, NY: L. Erlbaum Associates.
- Demtröder, W. (2015). *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme* (7. Aufl.). Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag.
- Dickmann, M. (2016). *Messung von Experimentierfähigkeiten - Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*. Studien zum Physik-und Chemielernen, Band 210. Berlin: Logos-Verlag.
- diSessa, A. A. (1993). Toward an Epistemology of Physics. *Cognition and Instruction*, 10(2-3), 105–225.

- Drollinger-Vetter, B. (2011). *Verstehenselemente und strukturelle Klarheit: Fachdidaktische Qualität der Anleitung von mathematischen Verstehensprozessen im Unterricht*. Münster: Waxmann.
- Duit, R. (2010). Didaktische Rekonstruktion. PIKO-Brief Nr. 3. In: Duit, R. (Hrsg.), *PIKO-Briefe. Der fachdidaktische Forschungsstand kurzgefasst* [veröffentlicht unter: <https://www.ipn.uni-kiel.de/de/das-ipn/abteilungen/didaktik-der-physik/piko/pikobriefe032010.pdf> - Zugriff am: 21.01.2021].
- Fabrigar, L. R. & Wegener, D. T. (2011). *Exploratory factor analysis*. Oxford University Press.
- Feldmann, C., Janzen, U., Kirschbaum, T. & Kohl, R. (2009). *Impulse Physik 2 für die Klassen 7 - 9 im achttjährigen Bildungsgang der Gymnasien in Nordrhein-Westfalen*. Stuttgart: Ernst Klett Verlag GmbH.
- Field, A. (2009). *Discovering Statistics using SPSS (and sex and drugs and rock 'n' roll)* (3. Aufl.). London: SAGE.
- Frey, A. et al. (2009). *PISA 2006 Skalenhandbuch: Dokumentation der Erhebungsinstrumente*. Münster: Waxmann.
- Granger, C. (2008). Rasch Analysis is Important to Understand and Use for Measurement. *Rasch Measurement Transactions*, 21(3), 1122–1123.
- Hattie, J. A. C. (2009). *Visible Learning - A synthesis of over 800 meta-analyses relating to achievement*. New York: Routledge.
- Heintze, J. (2014). *Lehrbuch zur Experimentalphysik Band 1: Mechanik* (1. Aufl.). Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag.
- Heller, K. A. & Perleth, C. (2000). *Kognitiver Fähigkeitstest für 4.-12. Klassen, Revision KFT 4-12 + R*. Göttingen: Hogrefe.
- Helmke, A. (2009). *Unterrichtsqualität und Lehrerprofessionalität. Diagnose, Evaluation und Verbesserung des Unterrichts*. Seelze: Klett-Kallmeyer.
- Hermann, F. (2002). Altlasten der Physik (61): Momentan- und Durchschnittsgeschwindigkeit. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 51(5), 46.
- Hestenes, D., Wells, M. & Smackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30, 141–158.
- Holm, S. (1979). A Simple Sequentially Rejective Multiple Test Procedure. *Scandinavian Journal of Statistics*, 6(2), 65–70.
- Hopf, M., Wilhelm, T., Waltner, C., Tobias, V. & Wiesner, H. (2012). *Einführung in die Mechanik* (4. Aufl.) [veröffentlicht unter: [www.thomas-wilhelm.net/Mechanikbuch\\_Druckversion.pdf](http://www.thomas-wilhelm.net/Mechanikbuch_Druckversion.pdf) - Zugriff am: 14.10.2020]. München & Würzburg.
- IBM Corp. (2020). *IBM SPSS Statistics for Windows (Version 27.0)* [Computer Programm]. Armonk, NY: IBM Corp.
- Jung, W. (1973). *Fachliche Zulässigkeit aus didaktischer Sicht*. Kiel: IPN Seminar II.
- Jung, W. (1977a). Wege in die Mechanik. *Physica didactica*, 4, 219–229.
- Jung, W. (1977b). Zur Einführung des Kraftbegriffs. *Physica didactica*, 4, 171–187.
- Jung, W. (1980). *Mechanik für die Sekundarstufe I*. Frankfurt am Main: Diesterweg.
- Jung, W. (1992). Probing acceptance: A technique for investigating learning difficulties. In: R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Ed.), *Research in physics learning: theo-*

- retical issues and empirical studies; proceedings of an international workshop*. Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften, 278–295.
- Jung, W. & Callsen, H. (1976). Newtonsche Mechanik. Versuch eines neuen Zugangs für den Unterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht*, 24(6), 231–236.
- Jung, W., Reul, H. & Schwedes, H. (1977). *Untersuchungen zur Einführung in die Mechanik in den Klassen 3-6*. Frankfurt am Main: Diesterweg.
- Kane, M. T. (2012). Validating score interpretations and uses. *Language Testing*, 29(1), 3–17.
- Kane, M. T. (2013). Validating the Interpretations and Uses of Test Scores. *Journal of Educational Measurement*, 50(1), 1–73.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3), 3–18.
- Kircher, E. (2015). Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In: E. Kircher, R. Girwidz, P. Häußler (Hrsg.), *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. (3. Aufl.). Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag, 107–139.
- Klafki, W. (1969). Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung. In: H. Roth & A. Blumental (Hrsg.), *Auswahl, Didaktische Analyse*. Hannover: Schroedel, 5–34.
- Krabbe, H., Zander, S. & Fischer, H. E. (2015). *Lernprozessorientierte Gestaltung von Physikunterricht - Materialien zur Lehrerfortbildung*. Münster: Waxmann Verlag.
- Linacre, J. (2002). What do Infit and Outfit Mean-Square and Standardized mean? *Rasch Measurement Transactions*, 16(2), 878.
- Linacre, J. (2020). *A User's Guide to Winsteps® Ministep Rasch-Model Computer Programs (Version 4.5.4)* [Zugriff unter: <https://www.winsteps.com>]. Beaverton, Oregon: Winsteps.com.
- Linacre, J. (2021). *Winsteps® (Version 4.5.4)* [Computer Programm, Zugriff unter: <https://www.winsteps.com>]. Beaverton, Oregon: Winsteps.com.
- Linzer, D. A. & Lewis, J. B. (2011). poLCA: An R Package for Polytomous Variable Latent Class Analysis. *Journal of Statistical Software*, 42(10), 1–29. <http://www.jstatsoft.org/v42/i10/>
- Lütgerath, H. (2019). *LEIFIphysik - Mechanik* [<https://www.leifiphysik.de/mechanik> - Zugriff am: 02.03.2019].
- Miller, A. G. & Chapman, J. P. (2001). Misunderstanding analysis of covariance. *Journal of abnormal psychology*, 110(1), 40–48.
- Muckenfuß, H. (1995). *Lernen im sinnstiftenden Kontext*. Berlin: Cornelsen Verlag.
- Müller, C. T. (2004). *Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht*. Studien zum Physik-und Chemielernen, Band 33. Berlin: Logos-Verlag.
- Nachtigall, D. (1986). Die Rolle von Präkonzepten beim Lernen von Physik. In: W. Bleichroth (Hrsg.), Aufsätze zur Didaktik der Physik. Festschrift zum 60. Geburtstag von Walter Jung. *Physica didactika - Zeitschrift für Didaktik der Physik*, 13. Jahrgang. Sonderheft 1986. Bad Salzdetfurth: Franzbecker, 97–102.

- Oser, F. & Patry, J.-L. (1990). *Choreographien unterrichtlichen Lernens. Basismodelle des Unterrichts*. Freiburg: Pädagogisches Institut der Universität Freiburg (Berichte zur Erziehungswissenschaft Nr. 89).
- Peters, J. (2013). *Vorstellungen zu Kraft und Gegenkraft*. unveröffentlichte Masterarbeit (M.Ed.), Ruhr-Universität Bochum.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D. & R Core Team. (2021). *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models* [R package version 3.1-152]. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Podolefsky, N., Reid, S., Loeblein, P., Paul, A. & Perkins, K. (o. D.). *Phet interactive Simulations - Kräfte und Bewegungen: Grundlagen* [Computer Programm - veröffentlicht unter: <https://phet.colorado.edu/de/simulation/forces-and-motion-basics> - Zugriff am: 05.05.2021].
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rachel, A. (o. D.). *Bewegung nach Kraftstoß* [Computer Programm - veröffentlicht unter: [www.thomas-wilhelm.net/simu\\_stoss.zip](http://www.thomas-wilhelm.net/simu_stoss.zip) - Zugriff am: 30.11.2020]. München & Würzburg.
- Raudenbush, S. W. & Bryk, A. S. (2002). *Hierarchical linear models: Applications and data analysis methods* (2. Aufl.). Thousand Oaks: SAGE.
- Reinhold, P. (2006). Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion. In: H. F. Miskis (Hrsg.), *Physikdidaktik*. Berlin: Cornelsen Scriptor, 86–102.
- Reusch, W., Gößwein, O. & Heuer, D. (2000). Grafisch unterstütztes Modellieren und Messen – VisEdit und PAKMA. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik*, 49(6), 32–36.
- Rosseel, Y. (2012). lavaan: An R Package for Structural Equation Modeling. *Journal of Statistical Software*, 48(2), 1–36. <https://www.jstatsoft.org/v48/i02/>
- Rost, J. (2004). *Lehrbuch Testtheorie - Testkonstruktion*. Bern: Huber.
- Schecker, H. (1975). *Das Schülervorverständnis zur Mechanik, Eine Untersuchung in der Sekundarstufe II unter Einbeziehung historischer und wissenschaftlicher Aspekte*. Dissertation, Universität Bremen.
- Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M., Duit, R. & Fischler, H. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Schulz, E. (1990). DIF detection: Rasch versus Mantel–Haenszel. *Rasch Measurement Transactions*, 4(2), 107.
- Seiter, M. (2018). *Vergleichende Rekonstruktionen von Zugängen zur Kinematik und Dynamik in der Sekundarstufe I*. unveröffentlichte Masterarbeit (M.Ed.), Ruhr-Universität Bochum.
- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2020a). Vergleich von Zugängen zur Mechanik in der Sekundarstufe I. In: S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019, 1051–1054.

- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2020b). Vergleich von Zugängen zur Mechanik in der Sekundarstufe I. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2020*, 271–280.
- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2021a). Elementarisierung der Mechanik in der Sekundarstufe I - Ergebnisse einer Studie. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 20(1), 1–14.
- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2021b). Vergleich von Elementarisierungen der Mechanik in der Sekundarstufe I. In: S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, online Jahrestagung 2020, 133–136.
- Stamm, L. (2020). *Entwicklung und Evaluation eines Leitfadens zum Umwandeln von analogen Lernmaterialien in eine digitale Lernumgebung*. unveröffentlichte Masterarbeit (M.Ed.), Ruhr-Universität Bochum.
- Taber, K. S. (2018). The use of Cronbach's alpha when developing and reporting research instruments in science education. *Research in Science Education*, 48(6), 1273–1296.
- Thauern, L. (2021). *Analyse der von SuS wahrgenommenen Aufgabenmerkmale zur Mechanik mithilfe der Repertory-Grid-Technique*. unveröffentlichte Masterarbeit (M.Ed.), Ruhr-Universität Bochum.
- Tobias, V. (2010). *Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. Die Wirksamkeit einer Einführung über zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*. Studien zum Physik-und Chemielernen, Band 105. Berlin: Logos-Verlag.
- Vogel, V. (2021). *Analyse zu latenten kognitiven Strukturen im Fachwissen zur Mechanik von Schülerinnen und Schülern der Sekundarstufe I*. unveröffentlichte Bachelorarbeit (B.A.), Ruhr-Universität Bochum.
- Wackermann, R. (2008). *Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer*. Studien zum Physik-und Chemielernen, Band 75. Berlin: Logos-Verlag.
- Waltner, C., Tobias, V., Wiesner, H., Hopf, M. & Wilhelm, T. (2010). Ein Unterrichtskonzept zur Einführung in die Dynamik in der Mittelstufe. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 59(7), 9–22.
- Wiesner, H., Schecker, H. & Hopf, M. (2013). *Physikdidakt kompakt*. Aulis-Verlag.
- Wiesner, H., Wilhelm, T., Rachel, A., Waltner, C., Tobias, V. & Hopf, M. (2011). *Mechanik I: Kraft und Geschwindigkeitsänderung*. In: Reihe Unterricht Physik, Band 5. München: Aulis-Verlag (später erschienen unter: Wiesner, H., Wilhelm, T., Waltner, C., Tobias, V., Rachel, A., Hopf, M. (2016). *Kraft und Geschwindigkeitsänderung*. München: Aulis-Verlag.)
- Wilhelm, T. (2005). *Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung*. Studien zum Physik-und Chemielernen, Band 46. Berlin: Logos-Verlag.
- Wilhelm, T. (2016). Elementarisierung in der Mechanik - Weglassen ist eine Kunst. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 65(6), 22–24.
- Wilhelm, T. (2018). *Stolpersteine überwinden im Physikunterricht: Anregungen für fachgerechte Elementarisierungen*. Seelze: Aulis.

- Wilhelm, T., Tobias, V., Waltner, C., Hopf, M. & Wiesner, H. (2011). Zweidimensional-dynamische Mechanik – Ergebnisse einer Studie. In: D. Höttecke (Hrsg.), *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung*. Jahrestagung der GDCP in Potsdam 2010, Reihe: Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Band 31. Münster: Lit-Verlag, 438–440.
- Wilhelm, T., Wiesner, H., Hopf, M. & Rachel, A. (2013). *Mechanik II: Dynamik, Erhaltungssätze, Kinematik*. Reihe Unterricht Physik, Band 6. München: Aulis-Verlag.
- Wilson, M. (2005). *Constructing measures: An item response modeling approach*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum.
- Wodzinski, R. (1995). Untersuchungen von Lernprozessen bei der Einführung in die Newtonsche Dynamik – Untersuchungskonzeption und erste Ergebnisse. In: H. Behrendt (Hrsg.), *Zur Didaktik der Physik und Chemie, Probleme und Perspektiven, Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Freiburg i.Br., September 1994*. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Leuchtturm-Verlag, 247–249.
- Wodzinski, R. (1996). *Untersuchungen von Lernprozessen beim Lernen Newtonscher Dynamik im Anfangsunterricht*. Münster: Lit Verlag.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994a). Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Beschreibung von Bewegungen und Geschwindigkeitsänderungen. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 32(5), 164–169.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994b). Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Die Newtonsche Bewegungsgleichung in Anwendung und Beispielen. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 32(10), 331–335.
- Wodzinski, R. & Wiesner, H. (1994c). Einführung in die Mechanik über die Dynamik: Zusatzbewegung und Newtonsche Bewegungsgleichung. *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule*, 32(6), 202–207.
- Wright, B. D., Linacre, J. M., Gustafson, J. E. & Martin-Lof, P. (1994). Reasonable mean-square fit values. *Rasch measurement transactions*, 8(3), 370.
- Zander, S. (2015). *Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen*. Studien zum Physik-und Chemielernen, Band 201. Berlin: Logos-Verlag.
- Zindel, C. (2020). Identifikation von Teilprozessen des situationsbezogenen funktionalen Denkens in der Sekundarstufe I. *mathematica didactica*, 43(1), 1–19.

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                                 |     |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1  | Verstehensmodell eines Konzepts mit Elementarisierung (orange) . . . . .                                                                        | 10  |
| 2.2  | Modell der didaktischen Rekonstruktion . . . . .                                                                                                | 12  |
| 2.3  | Das fachdidaktische Triplet: Das Beziehungsgefüge der drei Teilaufgaben<br>im Modell der Didaktischen Rekonstruktion . . . . .                  | 13  |
| 4.1  | Reflexion an einer Wand . . . . .                                                                                                               | 37  |
| 4.2  | Stroboskopbild eines Fußballs . . . . .                                                                                                         | 40  |
| 4.3  | Geschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Fußballs . . . . .                                                                                 | 42  |
| 4.4  | Die Zusatzgeschwindigkeit . . . . .                                                                                                             | 43  |
| 4.5  | Simulation zu Kraft und Bewegung: Zusammenhang zwischen Einwirkung<br>und Zusatzgeschwindigkeit . . . . .                                       | 44  |
| 4.6  | Konstruktionsbeispiel zum Änderungsvektor . . . . .                                                                                             | 47  |
| 4.7  | Geschwindigkeit und Beschleunigung bei der Bewegung . . . . .                                                                                   | 48  |
| 6.1  | Übersetzungsschritte von der Zielebene bis zur Erfassung von Testwerten .                                                                       | 77  |
| 6.2  | Angebots-Nutzungs-Modell . . . . .                                                                                                              | 78  |
| 6.3  | Übersetzungsschritt 1 mit den Argumenten zur Ebene der Mechanikkonzepte                                                                         | 80  |
| 6.4  | Übersetzungsschritt 2 mit den Argumenten zur Ebene der Mechaniklehrgänge                                                                        | 82  |
| 6.5  | Übersetzungsschritt 3 mit den Argumenten zur Ebene des Unterrichts . . .                                                                        | 84  |
| 6.6  | Übersetzungsschritt 4 mit den Argumenten zur Ebene des Lernens . . . . .                                                                        | 86  |
| 6.7  | Übersetzungsschritt 5 mit den Argumenten zur Ebene der Testwerte . . . .                                                                        | 88  |
| 6.8  | Übersicht der Validierungslogik . . . . .                                                                                                       | 90  |
| 6.9  | Modell zu Elementarisierungen der Mechanik . . . . .                                                                                            | 92  |
| 6.10 | Beispiel einer Stroboskoptabelle . . . . .                                                                                                      | 94  |
| 6.11 | Gegenüberstellung der Wright-Maps für beide Teilstichproben der Vorstu-<br>die mit Anker-Items . . . . .                                        | 117 |
| 6.12 | Abschließende Bewertung der Validierungslogik . . . . .                                                                                         | 124 |
| 7.1  | Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Prätest Personenfähigkeiten<br>beider Treatmentgruppen . . . . .                                      | 127 |
| 7.2  | Itemlösungswahrscheinlichkeit aufgeteilt nach den drei Gruppen der DIF-<br>Analyse . . . . .                                                    | 130 |
| 7.3  | Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Prä- und Posttest Personen-<br>fähigkeiten für die Treatmentgruppe der 1D-Adaption . . . . .          | 137 |
| 7.4  | Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Prä- und Posttest Personen-<br>fähigkeiten für die Treatmentgruppe des 2DD-Mechanikkonzepts . . . . . | 139 |

|      |                                                                                                                                                |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.5  | Gegenüberstellung der Wright-Maps mit den Posttest Personenfähigkeiten<br>beider Treatmentgruppen . . . . .                                    | 141 |
| 7.6  | Zusammenfassung der t-Tests zum Vergleich der Personenfähigkeiten . . .                                                                        | 142 |
| 7.7  | Zusammenfassung der Auswertung nach klassischer Testtheorie durch die<br>Bildung von Summenwerten . . . . .                                    | 145 |
| 7.8  | Itemlösungswahrscheinlichkeit der zwei Leistungsklassen im Prätest . . . .                                                                     | 148 |
| 7.9  | Itemlösungswahrscheinlichkeit der zwei Leistungsklassen im Posttest . . . .                                                                    | 149 |
| 7.10 | Verteilung der SchülerInnen beider Treatmentgruppen auf die Leistungs-<br>klassen zu beiden Testzeitpunkten . . . . .                          | 150 |
| 7.11 | Mittlere Lernzuwächse der SchülerInnen in den beiden Treatmentgruppen<br>aufgeteilt nach den Leistungsklassen bezüglich des Prätests . . . . . | 153 |
| 7.12 | Lernzuwächse auf den einzelnen Items aufgeteilt nach Treatmentgruppen .                                                                        | 155 |

# Tabellenverzeichnis

|      |                                                                                                                                                                    |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1  | Überblick über die bisherigen Evaluationsstudien . . . . .                                                                                                         | 26  |
| 6.1  | Ablauf der Studie und erfasste Variablen . . . . .                                                                                                                 | 68  |
| 6.2  | Übersicht über die Gesamtstichprobe . . . . .                                                                                                                      | 71  |
| 6.3  | Kontrollvariablen und Instrumente der Studie . . . . .                                                                                                             | 73  |
| 6.4  | Werte der Kontrollvariablen zu den jeweiligen Testzeitpunkten . . . . .                                                                                            | 75  |
| 6.5  | Gegenüberstellung der Elementarisierung . . . . .                                                                                                                  | 98  |
| 6.6  | Gegenüberstellung der Struktur für beide Mechanikkonzepte . . . . .                                                                                                | 100 |
| 6.7  | Aufgabenentwicklungsmodell . . . . .                                                                                                                               | 111 |
| 6.8  | Stichprobe der Vorstudie . . . . .                                                                                                                                 | 114 |
| 6.9  | Verteilung der ausgewählten Aufgaben im Aufgabenentwicklungsmodell . .                                                                                             | 115 |
| 6.10 | Ausgewählte Items für die Analyse nach der Repertory-Grid-Technique . .                                                                                            | 119 |
| 6.11 | Kreuztabelle der Clusteranalyse mit allen zehn Kategorien . . . . .                                                                                                | 121 |
| 7.1  | Items mit signifikantem $ DIF\text{-Kontrast}  \geq 0.64$ . . . . .                                                                                                | 129 |
| 7.2  | Bonferroni-Holm-Korrektur für die Vergleiche der Personenfähigkeiten . . .                                                                                         | 143 |
| 7.3  | Bonferroni-Holm-Korrektur für den Vergleich der Prätestergebnisse und der<br>Lernzuwächse im Fachwissenstest . . . . .                                             | 146 |
| 7.4  | BIC-Werte für Modelle mit verschiedenen Anzahlen von latenten Klassen .                                                                                            | 147 |
| 7.5  | Entwicklung der beiden Leistungsklassen zwischen dem Prä- und Posttest .                                                                                           | 151 |
| 7.6  | Mittlere Lösungswahrscheinlichkeiten und Standardabweichungen in den<br>beiden Leistungsklassen aufgeteilt nach Treatmentgruppen im Prä- und<br>Posttest . . . . . | 152 |
| 7.7  | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B4.01 aufgeteilt nach<br>Treatmentgruppen . . . . .                                                              | 157 |
| 7.8  | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B4.01 im Prätest auf-<br>geteilt nach Leistungsklassen . . . . .                                                 | 157 |
| 7.9  | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B4.02 aufgeteilt nach<br>Treatmentgruppen . . . . .                                                              | 158 |
| 7.10 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KKB.01 aufgeteilt<br>nach Treatmentgruppen . . . . .                                                          | 159 |
| 7.11 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KBK.0G.06.A auf-<br>geteilt nach Treatmentgruppen . . . . .                                                   | 160 |
| 7.12 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KB.ZS.01 aufge-<br>teilt nach Treatmentgruppen . . . . .                                                      | 162 |

|      |                                                                                                                            |     |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.13 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.KB.ZS.01 im Prätest aufgeteilt nach Leistungsklassen . . . . .        | 162 |
| 7.14 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.VKB.02 aufgeteilt nach Treatmentgruppen . . . . .                     | 164 |
| 7.15 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B2.Z.02 im Prätest aufgeteilt nach Leistungsklassen . . . . .            | 165 |
| 7.16 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item B2.Z.02 aufgeteilt nach Treatmentgruppen . . . . .                       | 166 |
| 7.17 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N1.Z.01 aufgeteilt nach Treatmentgruppen . . . . .                       | 167 |
| 7.18 | Verteilung der gewählten Antwortoptionen von Item N2.VBK.01 aufgeteilt nach Treatmentgruppen . . . . .                     | 169 |
| 7.19 | Regressionstabelle für die ANCOVA auf der Individualebene . . . . .                                                        | 171 |
| 7.20 | Regressionstabelle für die ANCOVA auf der Klassenebene . . . . .                                                           | 171 |
| B.1  | Rasch Kennwerte für die Gesamtstichprobe der Vorstudie zum Fachwissenstest mit DIF-Analyse . . . . .                       | 214 |
| B.2  | Rasch Kennwerte und klassische Trennschärfe aufgeteilt auf die Teilstichproben der Vorstudie zum Fachwissenstest . . . . . | 215 |
| B.3  | Rasch Kennwerte für die Prätest-Ergebnisse der Hauptstudie mit DIF-Analyse (nur Gymnasium) . . . . .                       | 216 |
| B.4  | DIF-Analyse für die Gesamtstichprobe der Hauptstudie - Teil 1 (nur Gymnasium) . . . . .                                    | 217 |
| B.5  | DIF-Analyse für die Gesamtstichprobe der Hauptstudie - Teil 2 (nur Gymnasium) . . . . .                                    | 218 |
| B.6  | DIF-Analyse für die Gesamtstichprobe der Hauptstudie - Teil 3 (nur Gymnasium) . . . . .                                    | 219 |
| B.7  | Itemschwierigkeiten der DIF-behafteten Items in den Posttestanalysen . . .                                                 | 219 |
| B.8  | t-Tests der Einzelitemanalyse - Teil 1 (nur Gymnasium) . . . . .                                                           | 220 |
| B.9  | t-Tests der Einzelitemanalyse - Teil 2 (nur Gymnasium) . . . . .                                                           | 221 |
| B.10 | t-Tests der Einzelitemanalyse - Teil 3 (nur Gymnasium) . . . . .                                                           | 222 |
| B.11 | Bonferroni-Holm Korrektur für die Analyse der Einzelitems - Teil 1 . . . .                                                 | 223 |
| B.12 | Bonferroni-Holm Korrektur für die Analyse der Einzelitems - Teil 2 . . . .                                                 | 224 |
| B.13 | Rasch Kennwerte für die Prätest-Ergebnisse der Hauptstudie mit DIF-Analyse (nur Gesamtschulen) . . . . .                   | 225 |

## **Teil IV**

## **Anhang**



# A Datenauswertung

In diesem Kapitel wird allgemein auf die in der Arbeit eingesetzten Auswertungsmethoden eingegangen, um im Verlauf der Auswertung nur die Ergebnisse darstellen zu können und nicht auch noch zusätzlichen die methodischen Aspekte diskutieren zu müssen.

## A.1 Rasch-Analyse

In dieser Arbeit werden für die Auswertungen der Ergebnisse des Fachwissenstests vor der Anwendung von interferenzstatistischen und varianzanalytische Methoden Rasch-Analysen (siehe z.B. Wilson, 2005) mit Winsteps (Linacre, 2021) vorgenommen. Die Entscheidung für dieses Vorgehen soll hier mit Bezug auf die Vorteile der Rasch-Analyse kurz begründet werden. Anschließend folgt ein Überblick über das Verfahren und die relevanten Kennwerte.

Das Problem bei der Auswertung von Fachwissenstests mit dichotom codierten Items (richtig oder falsch) besteht darin, dass für die Lösung jeder Aufgabe die gleiche Punktzahl vergeben wird, obwohl einige Aufgaben potenziell bezogen auf die erhobene Stichprobe schwieriger sind als andere, also eine geringere Lösungswahrscheinlichkeit aufweisen. Die Bildung von Summenwerten für die ProbandInnen über alle Aufgaben ist daher im Allgemeinen aufgrund von verschiedenen Lösungswahrscheinlichkeiten nicht intervallskaliert, was für interferenzstatistische Verfahren wie z.B. t-Tests allerdings Voraussetzung ist. Wird diese dennoch angenommen, ergeben sich Einschränkungen für die Interpretation der Ergebnisse. Für ein Intervallskalenniveau müsste die Lösung einer Aufgabe mit einer geringen Lösungswahrscheinlichkeit höher bewertet werden als bei einer Aufgabe mit hoher Lösungswahrscheinlichkeit.

Diese Forderung nach einer Intervallskalierung wird durch die Verwendung von Rasch-Analysen erreicht (siehe z.B. Granger, 2008). Hierbei wird für alle ProbandInnen eine individuelle Personenfähigkeiten geschätzt abhängig von den gleichzeitig geschätzten Itemschwierigkeiten der einzelnen Aufgaben. Die Schätzung beider Parameter erfolgt anhand einer gemeinsamen Logit-Skala, welche üblicherweise in z-standardisierten Werten angegeben wird.

Des Weiteren ist es möglich die individuellen Personenfähigkeit und die entsprechenden

Itemschwierigkeiten in einer Wright-Map (Wilson, 2005) aufzutragen. Hierbei werden auf der linken Seite die Personenfähigkeiten der Stichprobe als Histogramm entlang der Logit-Skala dargestellt und auf der rechten Skala die Itemschwierigkeiten. Dies liefert eine übersichtliche Darstellung über die Verteilung Personenfähigkeiten der Gesamtstichprobe in Relation zur Verteilung der Itemschwierigkeiten.

Ein weiterer Vorteil der Rasch-Analyse besteht darin, durch die Wahl von sogenannten Anker-Items eine Vergleichbarkeit zwischen mehreren Teilanalysen der Gesamtstichprobe (z.B. zwischen Messzeitpunkten oder Treatmentgruppen) zu gewährleisten. Die Itemschwierigkeiten der Anker-Items werden in den entsprechenden Analysen als fix angesetzt, wodurch die Personenfähigkeiten und die Schwierigkeiten der verbleibenden Items in allen Teilanalysen entlang der gleichen Skala geschätzt werden. Die Anker-Items bestimmt man anhand einer DIF-Analyse (Linacre, 2020, S. 443ff) über die Gesamtstichprobe, indem das sogenannte *differential item functioning* (kurz: DIF) für die unterschiedlichen Teilanalysen verglichen wird. Dieser Wert ist ein Maß dafür, wie sich das Item in den verschiedenen Teilanalysen bezüglich der Reihenfolge in der Itemschwierigkeit verhält. Ab einem Differenzwert, auch bezeichnet als DIF-Kontrast, von  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.64$  (Linacre, 2020, S. 446) wird das Verhalten des Items in den Teilanalysen als unterschiedlich angenommen. In Linacre (2020, S. 446) wird diesem Grenzwert die Kategorie „mittel bis groß“ zugeordnet. Es ist aber auch ein niedrigerer Grenzwert mit  $|\text{DIF-Kontrast}| \geq 0.43$  möglich, welcher in Linacre (2020, S. 446) mit der Kategorie „leicht bis mittel“ bezeichnet wird. Items, für die der entsprechende Grenzwert überschritten wird, können nicht als Anker-Item fixiert werden, da diese sich in den Teilstichproben zu stark unterschiedlich verhalten. In dieser Arbeit wird immer der höhere Grenzwert in den DIF-Analysen angewendet. Durch das Erzeugen einer gleichen Skala mit Hilfe einer geeigneten Wahl von Anker-Items ist ein direkter Vergleich beispielsweise von Personenfähigkeiten in zwei oder mehreren Teilanalysen möglich.

Als einen weiteren Aspekt der Rasch-Analyse werden Fit-Statistiken für die einzelnen Items ausgegeben, welche als Infit- und Outfit-Meansquare (kurz: MNSQ) bezeichnet werden. Diese Werte geben Aufschluss darüber, wie gut das aufgestellte Rasch-Modell und die vorhergesagten Daten zueinander passen. Der Erwartungswert liegt für beide Fit-Werte bei 1.0. Ein Wert kleiner als 1.0 deutet darauf hin, dass die Beobachtung zu vorhersehbar sind (Redundanz) und ein Wert größer als 1.0 hingegen auf eine Unvorhersehbarkeit der Werte. Der Wert für den Infit-MNSQ ist sensitiv gegenüber informationsgewichteten Anpassungen, das heißt gegenüber dem Muster von Antworten einer Person und umgekehrt. Der Outfit-MNSQ ist hingegen sensitiv gegenüber Ausreißern, das heißt für Items mit Schwierigkeiten, die weit von der Personenfähigkeit von ProbandInnen entfernt sind und umgekehrt (vgl. Linacre, 2002). Als kritisches Intervall für die beiden Fit-Werte wird von Linacre (2002)  $[0.5, 1.5]$  empfohlen, es gibt aber auch strengere Forderungen bei denen  $[0.8, 1.2]$  als kritisches Intervall gesetzt wird (siehe Wright et al., 1994). In dieser Arbeit wird zunächst für die Bewertung der Fit-Statistiken vom größeren Intervall ausgegangen, wobei auch immer eine Passung der Werte zum strengeren Intervall betont werden kann. Linacre (2002) weist darauf hin, dass die Werte für Infit und Outfit MNSQ bei verankerten Itemschwierigkeiten in den Teilstichproben irreführend sein können, wenn beispielsweise

die verankerten Items zu weit gestreut bezogen die Personenfähigkeiten sind. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die Infit und Outfit MNSQ nur für die Analyse ohne verankerte Items dargestellt und diskutiert.

Als letzter für diese Arbeit relevanter Aspekt der Rasch-Analysen bleibt die Bewertung der globalen Passung, der in einer Analyse geschätzten Daten, auf das Rasch-Modell. Dies wird in dieser Arbeit anhand des Log-Likelihood Chi-Quadrat-Tests (Linacre, 2020, S. 469) vorgenommen. Liegt eine Modellpassung vor, spricht man auch von einer spezifischen Objektivität (Rost, 2004). Dies bedeutet, dass die Personenfähigkeiten von zwei Personen unabhängig davon sind, anhand welcher Items sie miteinander verglichen werden. Gleiches gilt für den Vergleich der Itemschwierigkeiten anhand von zwei Personen. Die Ergebnisse der Rasch-Analyse sind damit bei vorliegender Modellpassung item- und personenstichprobenunabhängig.

## A.2 Interferenzstatistische und varianzanalytische Auswertungen

Alle folgenden Berechnungen dieses Abschnitts wurde mit Hilfe der Statistik-Software SPSS, Version 27 (IBM Corp, 2020) durchgeführt. Eine Voraussetzung aller folgenden Analysemethoden ist die Intervallskalierung der abhängigen Variable.

### A.2.1 t-Test

Für die Überprüfung von Unterschiedshypothesen in Bezug auf die Mittelwerte zweier Stichproben werden in dieser Arbeit t-Tests, genauer zweiseitige t-Tests für abhängige beziehungsweise für unabhängige Stichproben, eingesetzt (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 117ff). Eine abhängige Stichprobe liegt dann vor, wenn für die gleichen ProbandInnen zu zwei verschiedenen Zeitpunkten die gleiche Variable erfasst wird (z.B. in dieser Arbeit die Ergebnisse im Fachwissenstest zum Prä- und Posttestzeitpunkt). Bei der unabhängigen Stichprobe unterscheiden sich die ProbandInnen in den beiden zu vergleichenden Stichproben (z.B. unterschiedliche Treatmentgruppen). Im Folgenden werden die Voraussetzungen für die Durchführung der t-Tests benannt.

Neben der allgemeinen Voraussetzung einer Zufallsstichproben, haben beide Arten von t-Tests die Voraussetzung, dass die vorliegenden Daten normalverteilt sein müssen (Bortz & Schuster, 2010, S. 119ff). Der t-Test ist allerdings bei ausreichend großen Stichprobengrößen ( $N \geq 30$ ) robust gegenüber einer Verletzung dieser Voraussetzung (Bortz & Schuster, 2010, S. 113ff), weshalb in dieser Arbeit, sollte die entsprechende Stichprobengröße vorliegen, die Normalverteilung der Daten auch nicht überprüft und die Voraussetzung

als erfüllt angesehen wird. Eine zusätzliche Voraussetzung des t-Tests für unabhängige Stichproben besteht in der Varianzhomogenität der beiden zu vergleichenden Stichproben. Diese wurde in der Arbeit mit Hilfe des Levene-Tests überprüft (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 129f). Auf die Verletzung der Varianzhomogenität wird immer bei den betreffenden t-Tests eingegangen und ist, wenn nicht anders angegeben, als erfüllt anzusehen. Beim t-Test besteht eine Korrekturmöglichkeit für den Fall einer verletzen Varianzhomogenität darin, die Freiheitsgrade zu reduzieren (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 123f), was auch immer direkt bei den betreffenden t-Tests vorgenommen wurde. Die t-Tests werden in dieser Arbeit immer nach dem gleichem Schema berichtet. Neben den Mittelwerten und Standardabweichung, der zu testenden Stichproben, wird die mittlere Differenz der Mittelwerte inklusive eines 95 %-Konfidenzintervalls in eckigen Klammern angegeben. Es folgt der Bericht der Freiheitsgrade  $df$ , des t-Werts  $t(df)$ , des Signifikanzwertes  $p$  und der Effektstärke nach Cohens  $d$ , wobei hier ebenfalls ein 95 %-Konfidenzintervall angegeben ist. Für  $p$  gelten in dieser Arbeit folgende Signifikanzniveaustufen:

$$\begin{aligned} p \geq .05 & \quad \hat{=} \quad \text{nicht signifikant} \\ p < .05 & \quad \hat{=} \quad \text{signifikant} \\ p < .01 & \quad \hat{=} \quad \text{hoch signifikant} \\ p < .001 & \quad \hat{=} \quad \text{höchst signifikant} \end{aligned}$$

Die Effektstärke berechnet sich aus der Differenz der beiden zu vergleichenden Mittelwerte  $\mu_1 - \mu_2$  geteilt durch die Standardabweichung, wobei im Falle des t-Tests für abhängige Stichproben die Standardabweichung  $\sigma$  der Differenz und im Fall von unabhängigen Stichproben die gepoolte Standardabweichung  $\sigma_{\text{pooled}}$  mit potenziell unterschiedlichen Stichprobengrößen  $n_A$  und  $n_B$  sowie verschiedenen Standardabweichungen  $\sigma_A$  und  $\sigma_B$  der beiden zu vergleichenden Stichproben  $A$  und  $B$  verwendet wird:

$$d = \frac{\mu_A - \mu_B}{\sigma} \tag{A.1}$$

$$\sigma_{\text{pooled}} = \sqrt{\frac{(N_A - 1) \cdot \sigma_A^2 + (N_B - 1) \cdot \sigma_B^2}{(N_A - 1) + (N_B - 1)}} \tag{A.2}$$

Eine mögliche Einordnung der Effektstärke kann nach Cohen anhand folgender Niveaustufen erfolgen (vgl. Bortz & Schuster, 2010, S. 109):

$$\begin{aligned} d < 0.2 & \quad \hat{=} \quad \text{kein Effekt} \\ d \geq 0.2 & \quad \hat{=} \quad \text{kleiner Effekt} \\ d \geq 0.5 & \quad \hat{=} \quad \text{mittlerer Effekt} \\ d \geq 0.8 & \quad \hat{=} \quad \text{großer Effekt} \end{aligned}$$

Dieser Art der Einordnung wurde in den Sozialwissenschaften entwickelt, bezieht sich also nicht unmittelbar auf Unterricht oder Lernzuwächse. Eine Bewertung der Effektstärken

sollte immer im Fachkontext erfolgen, weshalb in dieser Arbeit ein anderer Maßstab zur Bewertung herangezogen wird.

Die Effektstärken in dieser Arbeit werden anhand des *barometers of influenz* von Hattie (2009) eingeordnet, der in einer Synthese von über 800 Meta-Analysen den Einfluss verschiedener Einflussfaktoren auf das Lernen von SchülerInnen analysiert hat. Die entsprechenden Niveaubereiche lauten (vgl. Hattie, 2009, S. 19f):

|                         |           |                                                        |
|-------------------------|-----------|--------------------------------------------------------|
| $d < 0.0$               | $\hat{=}$ | Reverse effect (Umgekehrter Effekt)                    |
| $0 \leq d \leq 0.15$    | $\hat{=}$ | Developmental effect (Entwicklungseffekt)              |
| $0.15 \leq d \leq 0.40$ | $\hat{=}$ | Teacher effect (LehrerInneneffekt)                     |
| $d > 0.40$              | $\hat{=}$ | Zone of desired effects (Zone der gewünschten Effekte) |

Ein *Entwicklungseffekt* kann sich in der Regel unabhängig vom Lernen in der Schule bei den SchülerInnen ergeben. Im Bereich des *LehrerInneneffekts* liegen Effektstärken, die sich typischerweise durch den Unterricht einer Lehrkraft im Verlauf eines Schuljahres ergeben. Dies deckt sich auch mit Ergebnissen der PISA-Studie, nach denen in Verlauf eines Schuljahres ein Lernzuwachs mit einer Effektstärke von  $d = 0.40$  zu erwarten ist (Bloom et al., 2008). Eine Effektstärke über  $d = 0.40$  geht demnach über einen erwarteten Effekt nach einem Schuljahr Unterricht hinaus und spricht für einen höheren Einfluss auf das Lernen SchülerInnen als typischerweise durch eine Lehrkraft erzeugt.

### A.2.2 Mann-Whitney U-Test

Der Mann-Whitney U-Test (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 130ff) ist ein nicht-parametrischer Test für den Vergleich von zwei unabhängigen Stichproben und wird im Zuge dieser Arbeit im Fall von kleinen Stichproben ( $N < 30$ ) bei verletzter Voraussetzung der Normalverteilung verwendet. Zur Testung der Voraussetzung wird in dieser Arbeit der Shapiro-Wilk-Test<sup>43</sup> (siehe z.B. Field, 2009, S. 545f) berechnet, welcher bei Signifikanz die Verletzung der Normalverteilungsannahme anzeigt. Für den Mann-Whitney U-Test wird der U-Wert sowie der Signifikanzwert  $p$  angegeben. Die Angabe einer Effektstärke ist im Falle von nicht-parametrischen Tests nicht möglich.

---

<sup>43</sup>Ein weiterer Test auf Verletzung der Normalverteilung besteht im Kolmogorov-Smirnov-Test, welcher von SPSS immer zusammen mit dem Shapiro-Wilk-Test ausgegeben wird. Field (2009, S. 546) empfiehlt von den beiden Testverfahren den akkurateren Shapiro-Wilk-Test zu verwenden.

### A.2.3 ANOVA bzw. ANCOVA

Für den Vergleich von mehr als zwei Gruppen werden Varianzanalysen (ANOVA) (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 205ff) beziehungsweise unter Einbeziehung von Kovariaten Kovarianzanalysen (ANCOVA) (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 305ff) berechnet. Im Folgenden werden die Voraussetzung der beiden Analysemethoden benannt.

Zunächst müssen die Messwerte der zu vergleichenden Gruppen sowie auch die abhängigen Variablen und Kovariaten unabhängig voneinander sein. Es muss zusätzlich Homoskedastizität gelten (also Varianzhomogenität zwischen den Gruppen) und die abhängige Variable muss in allen Gruppen normalverteilt sein. Wie schon beim t-Tests wird die Varianzhomogenität mit Hilfe des Levene-Tests überprüft, wobei hier bei Verletzung der Voraussetzung keine Korrekturmöglichkeit besteht. Auch in diesem Fall sind die Analysen robust gegenüber der Verletzung der Normalverteilung (Bortz & Schuster, 2010, S. 214), weshalb die Normalverteilung bei ausreichend großer Stichprobe ( $N \geq 10$  pro Gruppe) nicht überprüft wird. Es folgen die zusätzlichen Voraussetzungen der ANCOVA.

Eine zusätzliche Voraussetzung der ANCOVA zur Aufnahme von Kovariaten besteht darin, dass die Kovariate sich nicht zwischen den zu vergleichenden Gruppen unterscheidet, da bei der Analyse nicht nur die Varianz der Kovariaten aus der unabhängigen, sondern auch aus der abhängigen Variable entfernt wird. Sollte die Voraussetzung nicht erfüllt sein, kommt es in diesem Zuge zu Interpretationsschwierigkeiten (vgl. Miller & Chapman, 2001), wenn die Varianz der Kovariaten aus der abhängigen Variable entfernt wird, dies aber nicht mehr länger die realistische Verteilung der Stichprobe repräsentiert. Als weitere Voraussetzungen gelten die Unabhängigkeit der Residuen, bei Verletzung auch Autokorrelation genannt, und das Nichtvorhandensein von Multikollinearität. Die Unabhängigkeit der Residuen wird mit Hilfe der Durbin-Watson-Statistik (siehe z.B. Field, 2009, S. 220f) und die Multikollinearität anhand der Toleranz/VIF (Varianz-Inflations-Faktor) Werte der Kollinearitätsstatistik (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 350ff) überprüft. Der Wert der Durbin-Watson-Statistik sollte dabei im Bereich von 2 und die Toleranzwerte nicht unter 0.1 liegen, damit die Voraussetzungen erfüllt sind.

Für den Bericht der varianzanalytischen Tests wird zunächst die Varianzaufklärung des zugrundeliegenden Regressionsmodells mittels des multiplen Determinationskoeffizienten  $R^2$  beziehungsweise des korrigierten  $R^2$  angegeben (siehe z.B. Field, 2009, S. 206ff). Für  $R^2$  gelten die folgenden Niveaustufen (vgl. Cohen, 1988, S. 412ff):

|                |           |                               |
|----------------|-----------|-------------------------------|
| $R^2 < .02$    | $\hat{=}$ | mangelhafte Varianzaufklärung |
| $R^2 \geq .02$ | $\hat{=}$ | geringe Varianzaufklärung     |
| $R^2 \geq .13$ | $\hat{=}$ | mittlere Varianzaufklärung    |
| $R^2 \geq .26$ | $\hat{=}$ | hohe Varianzaufklärung        |

Für jeden Prädiktor wird im Anschluss der Regressionskoeffizient  $\beta$ , die beiden Freiheitsgrade  $df_1$  und  $df_2$ , der F-Wert  $F(df_1, df_2)$ , der Signifikanzwert  $p$  und das  $part\eta^2$  (aufge-

klärte Varianz) als Effektstärke angegeben. Auch dem  $part\eta^2$  können wieder Niveaustufen bezogen auf die Größe des Effekts zugeordnet werden (vgl. Field, 2009, S. 390):

|                       |           |                  |
|-----------------------|-----------|------------------|
| $part\eta^2 < .01$    | $\hat{=}$ | kein Effekt      |
| $part\eta^2 \geq .01$ | $\hat{=}$ | kleiner Effekt   |
| $part\eta^2 \geq .06$ | $\hat{=}$ | mittlerer Effekt |
| $part\eta^2 \geq .14$ | $\hat{=}$ | großer Effekt    |

## A.2.4 Bootstrapping

Für die oben genannten interferenzstatistische und varianzanalytische Auswertungen wird in dieser Arbeit zur zusätzlichen Bestätigung der Ergebnisse Bootstrapping betrieben (siehe z.B. Bortz & Schuster, 2010, S. 115). Hierbei werden aus der eigentlichen Stichprobe  $N$  Zufallsstichproben durch Ziehen mit Zurücklegen gebildet und für diese ebenfalls die entsprechenden Auswertungen durchgeführt. Die resultierenden Kennwerte des Bootstrappings erhält man schließlich durch die Bildung von Mittelwerten über alle  $N$  Zufallsstichproben. Relevant in dieser Arbeit ist, inwiefern sich der resultierende Signifikanzwert bezüglich des vorherigen Signifikanzniveaus und das 95 %-Konfidenzintervall der mittleren Differenz verändert. Liegt beides im vergleichbaren Rahmen kann das Bootstrapping als Argument zur Untermauerung der Ergebnisse verwendet werden. Die Anzahl der Zahlfallstichproben ist in dieser Arbeit standardmäßig auf  $N = 10.000$  gesetzt.

## A.2.5 Bonferroni-Holm-Korrektur

Werden mehrere zusammengehörige Hypothesentests hintereinander durchgeführt, in denen beispielsweise aus einer Gesamtheit von drei Gruppen jede wechselseitig mit den anderen beiden verglichen wird, muss eine Korrektur des  $\alpha$ -Niveaus vorgenommen werden, da mit jedem Test die Wahrscheinlichkeit steigt einen Fehler erster Art zu begehen. Man spricht in diesem Fall auch von der Kumulierung des Alpha-Fehlers. Eine Möglichkeit der Korrektur besteht in der Bonferroni-Holm-Prozedur, welche eine Erweiterung der sehr konservativen Bonferroni-Korrektur darstellt (Holm, 1979). Die Korrektur erfolgt nach dem folgenden Algorithmus:

1. Durchführung aller zusammengehörigen Einzeltestungen und Ermittlung der Signifikanzwerte

2. Sortierung der ermittelten  $p$ -Werte vom Kleinsten zum Größten
3. Adjustierung der  $p$ -Werte in der Reihenfolge vom Kleinsten ( $k = 1$ ) zum Größten ( $k = n$ ) nach dem folgendem Algorithmus:

$$\begin{aligned}k &= 1, \dots, n \\ p_1^* &= p \cdot n \\ p_2^* &= p \cdot (n - 1) \\ p_k^* &= p \cdot (n - k + 1)\end{aligned}$$

4. Vergleich der adjustierten  $p^*$ -Werte mit den Signifikanzniveaustufen und gegebenenfalls Anpassung der Aussagen über die bei dem betreffenden Test vorliegende Signifikanz.

## A.3 Latente Klassenanalyse

Zur Bildung von Subklassen auf Grundlage des Antwortmusters der teilnehmenden SchülerInnen wird die Methode der latenten Klassenanalyse angewendet (siehe z.B. Bortz & Döring, 2006, S. 210f). Die Ausgangslage bilden hierbei nicht die bereits codierten Daten des Fachwissenstests, sondern die kategoriale Datenstruktur, welche Antwortoption jeweils angekreuzt wurde. Für alle ProbandInnen der Stichprobe wird berechnet, mit welcher Wahrscheinlichkeit er oder sie anhand des Antwortmusters einer latenten Klasse zugehört. Die Anzahl der latenten Klassen muss für die Durchführung der Analyse vorgegeben werden (vgl. Bortz & Döring, 2006, S. 210f). Die ProbandInnen werden schließlich so angeordnet, dass die Personen innerhalb einer latenten Klasse möglichst homogen und die Klassen untereinander möglichst heterogen sind (vgl. Bortz & Döring, 2006, S. 211). Durch den Vergleich von Modellen mit verschiedenen großen Anzahlen von latenten Klassen kann über geeignete Vergleichskriterien das Modell ermittelt werden, welches die Daten am besten wiedergibt.

Da SPSS (IBM Corp, 2020) diese Art der Analyse nicht beherrscht, wurde auf die Statistik-Software R (R Core Team, 2018) zurückgegriffen, indem das R-Paket *poLCA* (Linzer & Lewis, 2011) verwendet wurde. Für den Modellvergleich wird in dieser Arbeit das Bayesian Information-Criterion (BIC) (siehe z.B. Field, 2009, S. 737) herangezogen. Hierbei gilt, dass je kleiner der BIC-Wert ist, desto besser repräsentiert das Modell die Daten.

## A.4 Mehrebenenanalyse

Die letzte Methode dieses Kapitels bildet die Mehrebenenanalyse (siehe z.B. Raudenbush & Bryk, 2002). In dieser Arbeit wurde für die Auswertung nach dieser Methode das R-Paket *nlme* (Pinheiro et al., 2021) verwendet.

Mehrebenenanalysen werden eingesetzt, wenn den Daten eine hierarchische Struktur zu Grunde liegt, wobei jedes Element einer untergeordneten Ebene genau einem Element der übergeordneten Ebene angehört. Im Falle dieser Arbeit bilden die SchülerInnen die erste und die Klassen der SchülerInnen die zweite Ebene. Potenziell liegt an dieser Stelle die Vermutung nahe, dass sich SchülerInnen der gleichen Klasse ähnlicher verhalten als jene aus anderen Klassen, da diese im Allgemeinen auch von einer anderen Lehrkraft unterrichtet werden. Wird eine vorliegende hierarchische Struktur der Daten ignoriert, fällt die Varianz der beobachteten Werte möglicherweise geringer aus als bei der echten Stichprobe, da die Varianz zwischen den Elementen auf einer höheren Ebene durchaus größer sein kann als zwischen den Elementen einer untergeordneten Ebene. Zusätzlich kann sich auch die Stichprobenanzahl verringern, wenn die Datenstruktur besser durch eine höhere Ebene repräsentiert wird. Dies führt im Allgemeinen bei Missachtung zu einer Unterschätzung der Standardfehler. Insgesamt können dadurch fälschliche Annahme von signifikanten Effekten entstehen, weshalb die Daten in dieser Arbeit auf eine hierarchische Struktur untersucht werden.

Bei der Mehrebenenanalyse werden für die verschiedenen Ebenen lineare Regressionsgleichung erstellt, wobei die Koeffizienten einer niedrigeren Ebene mit Hilfe der übergeordneten Ebenen definiert werden. Ausgangspunkt einer Mehrebenenanalyse bildet ein Nullmodell oder auch Intercept-only Modell genannt, womit untersucht werden kann, wie sich die Varianz der abhängigen Variable auf die verschiedenen Ebenen aufteilt. Das Nullmodell enthält in diesem Fall noch keine Prädiktorvariable. Es folgen die Regressionsgleichungen:

$$\text{Ebene 1: } Y_{ij} = \beta_{0j} + r_{ij} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Ebene 2: } \beta_{0j} = \gamma_{00} + u_{0j} \quad (\text{A.4})$$

$$\text{Gesamtmodell: } Y_{ij} = \gamma_{00} + u_{0j} + r_{ij} \quad (\text{A.5})$$

wobei:

$Y_{ij}$  = Abhängige Variable eines Elements  $i$  auf Ebene 1 aus Element  $j$  auf Ebene 2

$\beta_{0j}$  = Regressionskoeffizient auf Ebene 1

$r_{ij}$  = Residuum/Zufallseffekt auf Ebene 1

$\gamma_{00}$  = Gesamtmittelwert der Elemente auf Ebene 2

$u_{0j}$  = Residuum/Zufallseffekt auf Ebene 2

Die abhängige Variable auf Ebene 1 wird somit durch die Mittelwerte der Elemente auf Ebene 2 vorausgesagt. Aus dem Nullmodell kann die Intraklassenkorrelation (ICC) ent-

nommen werden, welche Informationen über den Anteil der Varianzen zwischen den Elementen der Ebene 2 an der Gesamtvarianz angibt. Die ICC lässt sich aus der Varianz zwischen ( $\sigma_{u_{0j}}^2$ ) und der Varianz innerhalb der Elemente auf Ebene 2 ( $\sigma_{r_{ij}}^2$ ) berechnen und ist wie folgt definiert:

$$\text{ICC} = \frac{\sigma_{u_{0j}}^2}{\sigma_{u_{0j}}^2 + \sigma_{r_{ij}}^2} \quad (\text{A.6})$$

Umso größer die ICC ist, desto höher ist die Varianz zwischen den Elementen auf Ebene 2 im Verhältnis zu der Gesamtvarianz. Eine hohe ICC ist daher ein Indiz für eine vorliegende hierarchische Struktur und damit für eine notwendige Mehrebenenanalyse.

Im Verlauf einer Mehrebenenanalyse können die Regressionsgleichungen auf den verschiedenen Ebenen mit Prädiktorvariablen versehen werden, wobei auch mehrere Gleichung auf einer höheren Ebene zur Definition von Koeffizienten einer niedrigeren Ebene möglich sind. Auf eine Vorstellung aller Variationen von möglichen Mehrebenenmodellen wie Random-Intercept oder Random-Slope Modelle wird an dieser Stelle verzichtet und auf Raudenbush & Bryk (2002) verwiesen.

Analog zur latenten Klassenanalyse (siehe Kap. A.3) besteht die Möglichkeit anhand von Kriterien wie dem Akaike'sches Information-Criterion (AIC), dem Bayesian Information-Criterion (BIC) (siehe z.B. Field, 2009, S. 737) oder der Maximum-Likelihood-Schätzung (logLik) (siehe z.B. Field, 2009, S. 267) verschiedene Mehrebenenmodelle bezüglich ihrer Passung auf die Daten miteinander zu vergleichen. Für alle Kriterien gilt, dass ein niedrigerer Wert für eine bessere Passung des Modells im Vergleich zu anderen steht.

## **B Statistische Tabellen**

Tabelle B.1: Rasch Kennwerte für die Gesamtstichprobe der Vorstudie zum Fachwissenstest mit DIF-Analyse (Für |DIF|-Kontrast  $< 0.01$  gibt Winsteps keinen Signifikanztest aus. Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item                  | Logits | Infit-MNSQ | Outfit-MNSQ | DIF -Kontrast  | Rasch-Welch-Test        |
|-----------------------|--------|------------|-------------|----------------|-------------------------|
| <b>B1.01</b>          | -0.55  | 0.94       | 0.96        | $< 0.01$       | -                       |
| <b>B1.02</b>          | -2.03  | 1.02       | 1.01        | 0.24           | t(211) = 0.71, p = .476 |
| <b>B1.03</b>          | -0.06  | 0.98       | 0.94        | 0.29           | t(223) = 0.98, p = .329 |
| <b>B2.E.01</b>        | 0.57   | 0.92       | 0.98        | 0.46           | t(218) = 1.42, p = .156 |
| <b>B2.E.02</b>        | -0.87  | 0.96       | 0.96        | 0.07           | t(219) = 0.23, p = .816 |
| <b>B2.Z.01</b>        | 1.29   | 1.01       | 1.19        | 0.44           | t(205) = 1.09, p = .278 |
| <b>B2.Z.02</b>        | -0.30  | 1.19       | 1.20        | <b>1.07***</b> | t(214) = 3.68, p < .001 |
| <b>B4.01</b>          | -0.16  | 1.04       | 1.03        | 0.34           | t(221) = 1.18, p = .240 |
| <b>B4.02</b>          | -0.54  | 0.99       | 0.98        | <b>0.65*</b>   | t(216) = 2.25, p < .05  |
| <b>N1.E.01</b>        | 2.05   | 0.95       | 0.78        | <b>1.51*</b>   | t(178) = 2.31, p < .05  |
| <b>N1.Z.01</b>        | 0.53   | 0.89       | 0.81        | <b>0.68*</b>   | t(227) = 2.09, p < .05  |
| <b>N2.KKB.01</b>      | 0.99   | 0.99       | 1.11        | 0.24           | t(222) = 0.68, p = .499 |
| <b>N2.KKB.02.A</b>    | 0.85   | 0.99       | 0.93        | 0.27           | t(225) = 0.78, p = .436 |
| <b>N2.KKB.04.A</b>    | 0.05   | 1.02       | 1.00        | 0.05           | t(224) = 0.18, p = .854 |
| <b>N2.KBK.0G.02</b>   | -0.73  | 0.97       | 0.99        | 0.14           | t(220) = 0.49, p = .625 |
| <b>N2.KBK.0G.05.A</b> | -0.55  | 0.91       | 0.88        | 0.39           | t(222) = 1.38, p = .169 |
| <b>N2.KBK.0G.06.A</b> | 1.26   | 0.95       | 0.93        | 0.27           | t(220) = 0.69, p = .488 |
| <b>N2.KB.04.A</b>     | -0.27  | 1.04       | 1.09        | 0.22           | t(223) = 0.77, p = .442 |
| <b>N2.KB.E.01</b>     | 0.95   | 1.23       | 1.48        | <b>0.79*</b>   | t(208) = 2.22, p < .05  |
| <b>N2.KB.ES.01</b>    | 0.70   | 1.01       | 1.04        | <b>0.78*</b>   | t(201) = 2.24, p < .05  |
| <b>N2.KB.Z.01</b>     | 0.99   | 1.06       | 1.02        | 0.31           | t(211) = 0.86, p = .389 |
| <b>N2.KB.ZS.01</b>    | -0.02  | 1.04       | 1.03        | $< 0.01$       | -                       |
| <b>N2.BK.04.A</b>     | 0.26   | 1.00       | 0.97        | 0.28           | t(223) = 0.91, p = .365 |
| <b>N2.VBK.01</b>      | -0.81  | 1.06       | 1.09        | 0.08           | t(220) = 0.29, p = .772 |
| <b>N2.VBK.02</b>      | 0.26   | 0.87       | 0.88        | 0.31           | t(228) = 1.01, p = .314 |
| <b>N2.VKB.01</b>      | -2.44  | 0.95       | 1.01        | 0.53           | t(197) = 1.34, p = .181 |
| <b>N2.VKB.02</b>      | -1.44  | 0.95       | 0.93        | 0.31           | t(212) = 1.01, p = .315 |

Tabelle B.2: Rasch Kennwerte und klassische Trennschärfe aufgeteilt auf die Teilstichproben der Vorstudie zum Fachwissenstest (A steht für Anker-Item.)

| Ohne Mechanikunterricht |      |        | Mit Mechanikunterricht |        |
|-------------------------|------|--------|------------------------|--------|
| Item                    | Dis. | Logits | Dis.                   | Logits |
| B1.01                   | .36  | -0.55A | .38                    | -0.55A |
| B1.02                   | .26  | -2.03A | .42                    | -2.03A |
| B1.03                   | .31  | -0.06A | .33                    | -0.06A |
| B2.E.01                 | .43  | 0.57A  | .43                    | 0.57A  |
| B2.E.02                 | .44  | -0.87A | .36                    | -0.87A |
| B2.Z.01                 | .39  | 1.29A  | .09                    | 1.29A  |
| B2.Z.02                 | .17  | -0.81  | .07                    | 0.31   |
| B4.01                   | .32  | -0.16A | .30                    | -0.16A |
| B4.02                   | .22  | -0.22  | .38                    | -0.89  |
| N1.E.01                 | .06  | 3.08   | .34                    | 1.58   |
| N1.Z.01                 | .34  | 0.89   | .53                    | 0.19   |
| N2.KKB.01               | .14  | 0.99A  | .40                    | 0.99A  |
| N2.KKB.02.A             | .22  | 0.85A  | .33                    | 0.85A  |
| N2.KKB.04.A             | .20  | 0.05A  | .39                    | 0.05A  |
| N2.KBK.0G.02            | .32  | -0.73A | .40                    | -0.73A |
| N2.KBK.0G.05.A          | .39  | -0.55A | .50                    | -0.55A |
| N2.KBK.0G.06.A          | .34  | 1.26A  | .27                    | 1.26A  |
| N2.KB.04.A              | .35  | -0.27A | .35                    | -0.27A |
| N2.KB.E.01              | .15  | 0.59   | .14                    | 1.40   |
| N2.KB.ES.01             | .18  | 0.37   | .41                    | 1.14   |
| N2.KB.Z.01              | .15  | 0.99A  | .35                    | 0.99A  |
| N2.KB.ZS.01             | .21  | -0.02A | .34                    | -0.02A |
| N2.BK.04.A              | .13  | 0.26A  | .27                    | 0.26A  |
| N2.VBK.01               | .27  | -0.81A | .26                    | -0.81A |
| N2.VBK.02               | .41  | 0.26A  | .52                    | 0.26A  |
| N2.VKB.01               | .20  | -2.44A | .31                    | -2.44A |
| N2.VKB.02               | .39  | -1.44A | .33                    | -1.44A |

Tabelle B.3: Rasch Kennwerte für die Prätest-Ergebnisse der Hauptstudie mit DIF-Analyse (nur Gymnasium, für |DIF|-Kontrast  $< 0.01$  gibt Winsteps keinen Signifikanztest aus, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item                  | Logits | Infit-MNSQ | Outfit-MNSQ | DIF -Kontrast | Rasch-Welch-Test        |
|-----------------------|--------|------------|-------------|---------------|-------------------------|
| <b>B1.01</b>          | -0.23  | 0.91       | 0.89        | 0.14          | t(731) = 0.95, p = .341 |
| <b>B1.02</b>          | -2.01  | 0.95       | 0.91        | 0.20          | t(755) = 1.16, p = .246 |
| <b>B1.03</b>          | -0.21  | 0.97       | 0.95        | 0.22          | t(744) = 1.45, p = .148 |
| <b>B2.E.01</b>        | 0.70   | 0.92       | 0.85        | 0.14          | t(728) = 0.78, p = .437 |
| <b>B2.E.02</b>        | -0.98  | 0.95       | 0.92        | 0.29          | t(718) = 1.89, p = .060 |
| <b>B2.Z.01</b>        | 1.06   | 0.94       | 0.88        | 0.12          | t(721) = 0.61, p = .544 |
| <b>B2.Z.02</b>        | -0.60  | 1.09       | 1.10        | $< 0.01$      | -                       |
| <b>B4.01</b>          | -0.07  | 1.10       | 1.14        | 0.28          | t(731) = 1.82, p = .070 |
| <b>B4.02</b>          | -0.55  | 1.00       | 1.00        | 0.20          | t(734) = 1.37, p = .170 |
| <b>N1.E.01</b>        | 2.02   | 0.97       | 0.92        | 0.19          | t(712) = 0.70, p = .487 |
| <b>N1.Z.01</b>        | 0.95   | 1.02       | 1.10        | 0.36          | t(781) = 1.91, p = .056 |
| <b>N2.KKB.01</b>      | 1.69   | 1.02       | 1.17        | 0.50*         | t(651) = 2.00, p < .05  |
| <b>N2.KKB.02.A</b>    | 1.00   | 1.00       | 1.02        | $< 0.01$      | -                       |
| <b>N2.KKB.04.A</b>    | 0.37   | 0.96       | 0.95        | $< 0.01$      | -                       |
| <b>N2.KBK.0G.02</b>   | -0.82  | 0.99       | 0.99        | 0.16          | t(733) = 1.05, p = .292 |
| <b>N2.KBK.0G.05.A</b> | -0.82  | 0.98       | 0.99        | 0.08          | t(737) = 0.53, p = .593 |
| <b>N2.KBK.0G.06.A</b> | 1.64   | 0.98       | 0.92        | 0.06          | t(753) = 0.27, p = .790 |
| <b>N2.KB.04.A</b>     | -0.13  | 1.03       | 1.03        | $< 0.01$      | -                       |
| <b>N2.KB.E.01</b>     | 0.42   | 1.07       | 1.09        | 0.19          | t(753) = 1.13, p = .260 |
| <b>N2.KB.ES.01</b>    | 0.76   | 1.05       | 1.09        | 0.19          | t(759) = 1.09, p = .275 |
| <b>N2.KB.Z.01</b>     | 0.14   | 1.02       | 1.02        | 0.10          | t(733) = 0.65, p = .518 |
| <b>N2.KB.ZS.01</b>    | 0.24   | 1.06       | 1.08        | 0.15          | t(729) = 0.93, p = .354 |
| <b>N2.BK.04.A</b>     | 0.36   | 1.02       | 1.02        | 0.02          | t(722) = 0.13, p = .893 |
| <b>N2.VBK.01</b>      | -0.99  | 1.00       | 1.00        | 0.17          | t(727) = 1.14, p = .254 |
| <b>N2.VBK.02</b>      | -0.28  | 0.93       | 0.92        | 0.09          | t(723) = 0.60, p = .546 |
| <b>N2.VKB.01</b>      | -2.93  | 1.01       | 1.13        | 0.24          | t(767) = 1.05, p = .293 |
| <b>N2.VKB.02</b>      | -0.77  | 1.01       | 1.03        | 0.16          | t(739) = 1.08, p = .280 |

Tabelle B.4: DIF-Analyse für die Gesamtstichprobe der Hauptstudie - Teil 1 (nur Gymnasium, INF: Freiheitsgrade werden von Winsteps als unendlich angenommen. Reihenfolge der Vergleiche pro Item: 1. Prä - Post 1D, 2. Prä - Post 2D und 3. Post 1D - Post 2D, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item             | DIF -Kontrast | Rasch-Welch-Test        |
|------------------|---------------|-------------------------|
| <b>B1.01</b>     | 0.03          | t(648) = 0.19, p = .849 |
|                  | 0.10          | t(982) = 0.78, p = .433 |
|                  | 0.12          | t(742) = 0.81, p = .416 |
| <b>B1.02</b>     | 0.50**        | t(670) = 3.19, p < .01  |
|                  | 0.45**        | t(997) = 3.17, p < .01  |
|                  | 0.05          | t(747) = 0.27, p = .786 |
| <b>B1.03</b>     | 0.32*         | t(632) = 2.27, p < .05  |
|                  | 0.38**        | t(968) = 3.05, p < .01  |
|                  | 0.06          | t(737) = 0.42, p = .674 |
| <b>B2.E.01</b>   | 0.28          | t(647) = 1.75, p = .080 |
|                  | 0.25          | t(995) = 1.78, p = .075 |
|                  | 0.03          | t(737) = 0.16, p = .875 |
| <b>B2.E.02</b>   | 0.55***       | t(579) = 3.71, p < .001 |
|                  | 0.22          | t(922) = 1.74, p = .083 |
|                  | 0.33*         | t(717) = 1.98, p < .05  |
| <b>B2.Z.01</b>   | 0.38*         | t(640) = 2.12, p < .05  |
|                  | 0.22          | t(INF) = 1.41, p = .160 |
|                  | 0.16          | t(720) = 0.82, p = .414 |
| <b>B2.Z.02</b>   | 0.15          | t(637) = 1.14, p = .257 |
|                  | 0.00          | t(966) = 0.01, p = .994 |
|                  | 0.16          | t(741) = 1.09, p = .275 |
| <b>B4.01</b>     | 0.74***       | t(644) = 5.31, p < .001 |
|                  | 0.49***       | t(990) = 3.95, p < .001 |
|                  | 0.25          | t(729) = 1.63, p = .104 |
| <b>B4.02</b>     | 0.66***       | t(601) = 4.66, p < .001 |
|                  | 0.62***       | t(921) = 4.86, p < .001 |
|                  | 0.04          | t(738) = 0.28, p = .780 |
| <b>N1.E.01</b>   | 0.15          | t(779) = 0.71, p = .478 |
|                  | 0.12          | t(INF) = 0.62, p = .536 |
|                  | 0.03          | t(745) = 0.14, p = .892 |
| <b>N1.Z.01</b>   | 0.22          | t(720) = 1.39, p = .165 |
|                  | 0.28*         | t(INF) = 2.00, p < .05  |
|                  | 0.06          | t(731) = 0.39, p = .700 |
| <b>N2.KKB.01</b> | 0.71***       | t(871) = 3.96, p < .001 |
|                  | 0.02          | t(INF) = 0.13, p = .894 |
|                  | 0.73***       | t(803) = 3.80, p < .001 |

Tabelle B.5: DIF-Analyse für die Gesamtstichprobe der Hauptstudie - Teil 2 (nur Gymnasium, INF: Freiheitsgrade werden von Winsteps als unendlich angenommen. Reihenfolge der Vergleiche pro Item: 1. Prä - Post 1D, 2. Prä - Post 2D und 3. Post 1D - Post 2D. Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item           | DIF -Kontrast  | Rasch-Welch-Test         |
|----------------|----------------|--------------------------|
| N2.KKB.02.A    | 0.18           | t(668) = 1.06, p = .291  |
|                | 0.26           | t(997) = 1.67, p = .095  |
|                | 0.08           | t(747) = 0.42, p = .671  |
| N2.KKB.04.A    | 0.22           | t(682) = 1.51, p = .133  |
|                | 0.19           | t(997) = 1.40, p = .162  |
|                | 0.40*          | t(758) = 2.54, p < .05   |
| N2.KBK.0G.02   | 0.21           | t(634) = 1.52, p = .129  |
|                | 0.06           | t(962) = 0.50, p = .614  |
|                | 0.15           | t(743) = 0.96, p = .339  |
| N2.KBK.0G.05.A | 0.32*          | t(639) = 2.35, p < .05   |
|                | 0.35**         | t(966) = 2.89, p < .01   |
|                | 0.04           | t(741) = 0.23, p = .816  |
| N2.KBK.0G.06.A | <b>0.83***</b> | t(561) = 3.44, p < .001  |
|                | <b>0.82***</b> | t(859) = 3.79, p < .001  |
|                | 0.02           | t(739) = 0.06, p = .953  |
| N2.KB.04.A     | 0.17           | t(653) = 1.20, p = .230  |
|                | 0.05           | t(992) = 0.44, p = .659  |
|                | 0.11           | t(737) = 0.73, p = .465  |
| N2.KB.E.01     | 0.14           | t(659) = 0.95, p = .343  |
|                | 0.28*          | t(986) = 2.10, p < .05   |
|                | 0.14           | t(748) = 0.87, p = .383  |
| N2.KB.ES.01    | 0.38*          | t(635) = 2.32, p < .05   |
|                | 0.19           | t(INF) = 1.31, p = .190  |
|                | 0.19           | t(718) = 1.08, p = .279  |
| N2.KB.Z.01     | 0.29*          | t(637) = 1.99, p < .05   |
|                | 0.31*          | t(971) = 2.41, p < .05   |
|                | 0.03           | t(734) = 0.16, p = .873  |
| N2.KB.ZS.01    | 0.11           | t(652) = 0.76, p = .449  |
|                | <b>1.88***</b> | t(911) = 13.53, p < .001 |
|                | <b>1.99***</b> | t(776) = 12.00, p < .001 |
| N2.BK.04.A     | 0.32*          | t(642) = 2.16, p < .05   |
|                | 0.50***        | t(944) = 3.60, p < .001  |
|                | 0.17           | t(749) = 1.03, p = .306  |
| N2.VBK.01      | 0.09           | t(619) = 0.66, p = .510  |
|                | 0.27*          | t(955) = 2.14, p < .05   |
|                | 0.36*          | t(725) = 2.30, p < .05   |

Tabelle B.6: DIF-Analyse für die Gesamtstichprobe der Hauptstudie - Teil 3 (nur Gymnasium, INF: Freiheitsgrade werden von Winsteps als unendlich angenommen. Reihenfolge der Vergleiche pro Item: 1. Prä - Post 1D, 2. Prä - Post 2D und 3. Post 1D - Post 2D, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item             | DIF -Kontrast  | Rasch-Welch-Test        |
|------------------|----------------|-------------------------|
| <b>N2.VBK.02</b> | 0.21           | t(641) = 1.52, p = .129 |
|                  | 0.24           | t(975) = 1.91, p = .056 |
|                  | 0.03           | t(738) = 0.18, p = .858 |
| <b>N2.VKB.01</b> | 0.32           | t(654) = 1.54, p = .124 |
|                  | 0.30           | t(988) = 1.56, p = .120 |
|                  | 0.03           | t(745) = 0.12, p = .907 |
| <b>N2.VKB.02</b> | <b>0.65***</b> | t(579) = 4.45, p < .001 |
|                  | 0.54***        | t(905) = 4.17, p < .001 |
|                  | 0.11           | t(730) = 0.68, p = .496 |

Tabelle B.7: Itemschwierigkeiten der DIF-behafteten Items in den Posttestanalysen

| Item                  | Itemschwierigkeiten |                            |
|-----------------------|---------------------|----------------------------|
|                       | 1D-Adaption (Post)  | 2DD-Mechanikkonzept (Post) |
| <b>B4.01</b>          | -0.94               | -0.74                      |
| <b>B4.02</b>          | -1.33               | -1.35                      |
| <b>N2.KKB.01</b>      | 0.86                | 1.55                       |
| <b>N2.KBK.0G.06.A</b> | 2.37                | 2.31                       |
| <b>N2.KB.ZS.01</b>    | 0.23                | -1.82                      |
| <b>N2.VKB.02</b>      | -1.54               | -1.49                      |

Tabelle B.8: t-Tests der Einzelitemanalyse - Teil 1 (nur Gymnasium, Reihenfolge der t-Tests: 1. Post 1D - Prä 1D, 2. Post 2D - Prä 1D, 3. Post 1D - Post 2D, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item             | Mittlere Differenz  | Signifikanztest               | Effektstärke Cohen's $d$ |
|------------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>B1.01</b>     | 0.10 [0.04, 0.16]   | $t(345) = 3.04, p < .01$      | 0.16 [0.06, 0.27]        |
|                  | 0.05 [-0.01, 0.10]  | $t(472) = 1.75, p = .080$     | 0.08 [-0.01, 0.17]       |
|                  | 0.05 [-0.03, 0.13]  | $t(817) = 1.25, p = .213$     | 0.09 [-0.05, 0.23]       |
| <b>B1.02</b>     | -0.01 [-0.07, 0.05] | $t(345) = -0.48, p = .633$    | -0.03 [-0.13, 0.08]      |
|                  | -0.04 [-0.09, 0.01] | $t(472) = -1.57, p = .117$    | -0.07 [-0.16, 0.02]      |
|                  | 0.02 [-0.05, 0.10]  | $t(817) = 0.62, p = .539$     | 0.04 [-0.10, 0.18]       |
| <b>B1.03</b>     | -0.03 [-0.09, 0.04] | $t(345) = -0.81, p = .418$    | -0.04 [-0.15, 0.06]      |
|                  | 0.02 [-0.03, 0.07]  | $t(472) = 0.70, p = .484$     | 0.03 [-0.06, 0.12]       |
|                  | -0.05 [-0.13, 0.04] | $t(817) = -1.07, p = .284$    | -0.08 [-0.22, 0.06]      |
| <b>B2.E.01</b>   | 0.03 [-0.03, 0.08]  | $t(345) = 0.93, p = .351$     | 0.05 [-0.06, 0.16]       |
|                  | 0.02 [-0.03, 0.06]  | $t(472) = 0.66, p = .507$     | 0.03 [-0.06, 0.12]       |
|                  | 0.01 [-0.06, 0.08]  | $t(817) = 0.32, p = .751$     | 0.02 [-0.12, 0.16]       |
| <b>B2.E.02</b>   | 0.14 [0.08, 0.21]   | $t(345) = 4.36, p < .001$     | 0.23 [0.13, 0.34]        |
|                  | 0.14 [0.09, 0.19]   | $t(472) = 5.11, p < .001$     | 0.24 [0.14, 0.33]        |
|                  | 0.00 [-0.08, 0.09]  | $t(817) = 0.05, p = .961$     | 0.00 [-0.14, 0.14]       |
| <b>B2.Z.01</b>   | 0.01 [-0.04, 0.06]  | $t(345) = 0.46, p = .647$     | 0.03 [-0.08, 0.13]       |
|                  | 0.02 [-0.02, 0.06]  | $t(472) = 0.99, p = .323$     | 0.05 [-0.05, 0.14]       |
|                  | -0.01 [-0.07, 0.06] | $t(817) = -0.30, p = .772$    | -0.02 [-0.16, 0.12]      |
| <b>B2.Z.02</b>   | 0.04 [-0.03, 0.11]  | $t(345) = 1.09, p = .278$     | 0.06 [-0.05, 0.16]       |
|                  | 0.08 [0.02, 0.14]   | $t(472) = 2.70, p < .01$      | 0.12 [0.03, 0.21]        |
|                  | -0.04 [-0.13, 0.05] | $t(817) = -0.90, p = .367$    | -0.06 [-0.20, 0.08]      |
| <b>B4.01</b>     | 0.21 [0.14, 0.28]   | $t(345) = 5.67, p < .001$     | 0.31 [0.20, 0.41]        |
|                  | 0.22 [0.16, 0.28]   | $t(472) = 7.76, p < .001$     | 0.36 [0.26, 0.50]        |
|                  | -0.01 [-0.10, 0.08] | $t(697.20) = -0.25, p = .800$ | -0.02 [-0.16, 0.12]      |
| <b>B4.02</b>     | 0.23 [0.17, 0.30]   | $t(345) = 6.84, p < .001$     | 0.37 [0.26, 0.48]        |
|                  | 0.19 [0.13, 0.25]   | $t(472) = 6.22, p < .001$     | 0.29 [0.19, 0.38]        |
|                  | 0.04 [-0.05, 0.14]  | $t(817) = 0.95, p = .343$     | 0.07 [-0.07, 0.21]       |
| <b>N1.E.01</b>   | 0.06 [0.02, 0.09]   | $t(345) = 2.86, p < .01$      | 0.15 [0.05, 0.26]        |
|                  | 0.04 [0.01, 0.07]   | $t(472) = 2.53, p < .05$      | 0.12 [0.03, 0.21]        |
|                  | 0.02 [-0.03, 0.06]  | $t(817) = 0.60, p = .552$     | 0.04 [-0.10, 0.18]       |
| <b>N1.Z.01</b>   | 0.06 [0.01, 0.12]   | $t(345) = 2.45, p < .05$      | 0.13 [0.03, 0.24]        |
|                  | 0.13 [0.09, 0.07]   | $t(472) = 5.98, p < .001$     | 0.28 [0.18, 0.37]        |
|                  | -0.07 [-0.14, 0.00] | $t(744.18) = -2.03, p < .05$  | -0.14 [-0.28, -0.01]     |
| <b>N2.KKB.01</b> | 0.16 [0.11, 0.21]   | $t(345) = 6.38, p < .001$     | 0.34 [0.23, 0.45]        |
|                  | 0.02 [-0.02, 0.06]  | $t(472) = 1.11, p = .270$     | 0.05 [-0.04, 0.14]       |
|                  | 0.14 [0.08, 0.20]   | $t(686.53) = 4.43, p < .001$  | 0.32 [0.18, 0.46]        |

Tabelle B.9: t-Tests der Einzelitemanalyse - Teil 2 (nur Gymnasium, Reihenfolge der t-Tests: 1. Post 1D - Prä 1D, 2. Post 2D - Prä 1D, 3. Post 1D - Post 2D, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item                  | Mittlere Differenz   | Signifikanztest               | Effektstärke Cohen's $d$ |
|-----------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|
| <b>N2.KKB.02.A</b>    | 0.03 [-0.03, 0.08]   | $t(345) = 1.03, p = .303$     | 0.06 [-0.05, 0.16]       |
|                       | 0.02 [-0.02, 0.07]   | $t(472) = 0.91, p = .362$     | 0.04 [-0.05, 0.13]       |
|                       | 0.01 [-0.06, 0.08]   | $t(817) = 0.22, p = .830$     | 0.02 [-0.12, 0.15]       |
| <b>N2.KKB.04.A</b>    | 0.11 [0.05, 0.17]    | $t(345) = 3.80, p < .001$     | 0.20 [0.10, 0.31]        |
|                       | 0.04 [-0.02, 0.09]   | $t(472) = 1.34, p = .181$     | 0.06 [-0.03, 0.15]       |
|                       | 0.08 [-0.00, 0.15]   | $t(817) = 1.85, p = .065$     | 0.13 [-0.01, 0.27]       |
| <b>N2.KBK.0G.02</b>   | 0.00 [-0.06, 0.07]   | $t(345) = 0.09, p = .927$     | 0.01 [-0.10, 0.11]       |
|                       | 0.08 [0.03, 0.14]    | $t(472) = 2.90, p < .01$      | 0.13 [0.04, 0.22]        |
|                       | -0.08 [-0.16, 0.01]  | $t(753.57) = -1.85, p = .065$ | -0.13 [-0.27, 0.01]      |
| <b>N2.KBK.0G.05.A</b> | -0.01 [-0.08, 0.06]  | $t(345) = -0.34, p = .736$    | -0.02 [-0.12, 0.09]      |
|                       | 0.01 [-0.05, 0.06]   | $t(472) = 0.31, p = .758$     | 0.01 [-0.08, 0.10]       |
|                       | -0.02 [-0.11, 0.07]  | $t(817) = -0.46, p = .645$    | -0.03 [-0.17, 0.11]      |
| <b>N2.KBK.0G.06.A</b> | -0.04 [-0.07, 0.00]  | $t(345) = -1.86, p = .064$    | -0.10 [-0.21, 0.01]      |
|                       | -0.03 [-0.06, 0.01]  | $t(472) = -1.48, p = .140$    | -0.07 [-0.16, 0.02]      |
|                       | -0.01 [-0.06, 0.04]  | $t(817) = -0.36, p = .716$    | -0.03 [-0.16, 0.11]      |
| <b>N2.KB.04.A</b>     | 0.12 [0.05, 0.18]    | $t(345) = 3.56, p < .001$     | 0.19 [0.09, 0.30]        |
|                       | 0.10 [0.04, 0.16]    | $t(472) = 3.44, p < .01$      | 0.16 [0.07, 0.25]        |
|                       | 0.02 [-0.07, 0.11]   | $t(817) = 0.43, p = .665$     | 0.03 [-0.11, 0.17]       |
| <b>N2.KB.E.01</b>     | 0.02 [-0.04, 0.09]   | $t(345) = 0.62, p = .538$     | 0.03 [-0.07, 0.14]       |
|                       | 0.04 [-0.02, 0.09]   | $t(472) = 1.33, p = .186$     | 0.06 [-0.03, 0.15]       |
|                       | -0.02 [-0.10, 0.07]  | $t(817) = -0.37, p = .711$    | -0.03 [-0.17, 0.11]      |
| <b>N2.KB.ES.01</b>    | -0.02 [-0.08, 0.04]  | $t(345) = -0.57, p = .571$    | -0.03 [-0.14, 0.08]      |
|                       | 0.05 [-0.00, 0.10]   | $t(472) = 1.88, p = .061$     | 0.09 [-0.00, 0.18]       |
|                       | -0.07 [-0.15, 0.01]  | $t(817) = -1.65, p = .100$    | -0.12 [-0.26, 0.02]      |
| <b>N2.KB.Z.01</b>     | 0.00 [-0.06, 0.07]   | $t(345) = 0.09, p = .931$     | 0.01 [-0.10, 0.11]       |
|                       | 0.03 [-0.03, 0.08]   | $t(472) = 0.92, p = .361$     | 0.04 [-0.05, 0.13]       |
|                       | -0.02 [-0.11, 0.06]  | $t(817) = -0.52, p = .603$    | -0.04 [-0.18, 0.10]      |
| <b>N2.KB.ZS.01</b>    | 0.06 [-0.00, 0.12]   | $t(345) = 1.92, p = .056$     | 0.10 [-0.00, 0.21]       |
|                       | 0.45 [0.40, 0.51]    | $t(472) = 16.63, p < .001$    | 0.77 [0.66, 0.87]        |
|                       | -0.39 [-0.47, -0.31] | $t(745.29) = -9.38, p < .001$ | -0.66 [-0.81, -0.52]     |
| <b>N2.BK.04.A</b>     | 0.02 [-0.04, 0.07]   | $t(345) = 0.62, p = .537$     | 0.03 [-0.07, 0.14]       |
|                       | -0.02 [-0.07, 0.04]  | $t(472) = -0.64, p = .525$    | -0.03 [-0.12, 0.06]      |
|                       | 0.03 [-0.04, 0.11]   | $t(817) = 0.87, p = .383$     | 0.06 [-0.08, 0.20]       |
| <b>N2.VBK.01</b>      | 0.12 [0.05, 0.18]    | $t(345) = 3.54, p < .001$     | 0.19 [0.08, 0.30]        |
|                       | 0.01 [-0.05, 0.07]   | $t(472) = 0.28, p = .777$     | 0.01 [-0.08, 0.10]       |
|                       | 0.11 [0.02, 0.20]    | $t(817) = 2.44, p < 0.05$     | 0.17 [0.03, 0.31]        |

Tabelle B.10: t-Tests der Einzelitemanalyse - Teil 3 (nur Gymnasium, Reihenfolge der t-Tests: 1. Post 1D - Prä 1D, 2. Post 2D - Prä 1D, 3. Post 1D - Post 2D, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

| Item             | Mittlere Differenz  | Signifikanztest              | Effektstärke Cohen's $d$ |
|------------------|---------------------|------------------------------|--------------------------|
| <b>N2.VBK.02</b> | 0.04 [-0.02, 0.11]  | $t(345) = 1.37, p = .173$    | 0.07 [-0.03, 0.18]       |
|                  | 0.02 [-0.03, 0.07]  | $t(472) = 0.92, p = .358$    | 0.04 [-0.05, 0.13]       |
|                  | 0.02 [-0.06, 0.10]  | $t(817) = 0.50, p = .617$    | 0.04 [-0.10, 0.17]       |
| <b>N2.VKB.01</b> | 0.01 [-0.03, 0.05]  | $t(345) = 0.55, p = .580$    | 0.03 [-0.08, 0.14]       |
|                  | -0.01 [-0.04, 0.03] | $t(472) = -0.49, p = .628$   | -0.02 [-0.11, 0.07]      |
|                  | 0.02 [-0.03, 0.07]  | $t(817) = 0.74, p = .460$    | 0.05 [-0.09, 0.19]       |
| <b>N2.VKB.02</b> | 0.22 [0.15, 0.28]   | $t(345) = 6.65, p < .001$    | 0.36 [0.25, 0.47]        |
|                  | 0.17 [0.12, 0.22]   | $t(472) = 6.47, p < .001$    | 0.30 [0.21, 0.39]        |
|                  | 0.05 [-0.03, 0.13]  | $t(715.25) = 1.14, p = .255$ | 0.08 [-0.06, 0.22]       |

Tabelle B.11: Bonferroni-Holm Korrektur für die Analyse der Einzelitems - Teil 1 (Reihenfolge der t-Tests: 1. Post 1D - Prä 1D, 2. Post 2D - Prä 1D, 3. Post 1D - Post 2D)

| Item         | p-Wert                                    | Bonferroni-Holm<br>Korrektur ( $n = 3$ ) | Adjustierter<br>p-Wert $p^*$   |
|--------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------|
| B1.01        | $p = .003$                                | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = .009$                   |
|              | $p = .080$                                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .160$                   |
|              | $p = .213$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .213$                   |
| B2.E.02      | $p = 1.7 \cdot 10^{-5}$                   | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = 3.4 \cdot 10^{-5}$      |
|              | $p = 4.81 \cdot 10^{-7}$                  | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 1.44 \cdot 10^{-6}$     |
|              | $p = .961$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .961$                   |
| B2.Z.02      | $p = .278$                                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .556$                   |
|              | <b><math>p = .007</math></b>              | <b><math>p^* = p \cdot n</math></b>      | <b><math>p^* = .021</math></b> |
|              | $p = .367$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .367$                   |
| B4.01        | $p = 3.09 \cdot 10^{-8}$                  | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = 6.18 \cdot 10^{-8}$     |
|              | $p = 5.22 \cdot 10^{-14}$                 | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 1.57 \cdot 10^{-13}$    |
|              | $p = .800$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .800$                   |
| B4.02        | $p = 3.73 \cdot 10^{-11}$                 | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 1.12 \cdot 10^{-10}$    |
|              | $p = 1.09 \cdot 10^{-9}$                  | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = 2.18 \cdot 10^{-9}$     |
|              | $p = .343$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .343$                   |
| N1.E.01      | <b><math>p = .004</math></b>              | <b><math>p^* = p \cdot n</math></b>      | <b><math>p^* = .012</math></b> |
|              | $p = .012$                                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .024$                   |
|              | $p = .552$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .552$                   |
| N1.Z.01      | $p = .015$                                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .030$                   |
|              | $p = 4.31 \cdot 10^{-9}$                  | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 1.29 \cdot 10^{-8}$     |
|              | $p = .042$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .042$                   |
| N2.KKB.01    | $p = 5.86 \cdot 10^{-10}$                 | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 1.76 \cdot 10^{-9}$     |
|              | $p = .270$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .270$                   |
|              | $p = 1.1 \cdot 10^{-5}$                   | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = 2.2 \cdot 10^{-5}$      |
| N2.KKB.04.A  | $p = 1.72 \cdot 10^{-4}$                  | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 5.16 \cdot 10^{-4}$     |
|              | $p = .181$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .181$                   |
|              | $p = .065$                                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .13$                    |
| N2.KBK.0G.02 | $p = .927$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .927$                   |
|              | <b><math>p = .004</math></b>              | <b><math>p^* = p \cdot n</math></b>      | <b><math>p^* = .012</math></b> |
|              | $p = .065$                                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .13$                    |
| N2.KB.04.A   | <b><math>p = 4.2 \cdot 10^{-4}</math></b> | <b><math>p^* = p \cdot n</math></b>      | <b><math>p^* = .001</math></b> |
|              | $p = .001$                                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .002$                   |
|              | $p = .665$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .665$                   |
| N2.KB.ZS.01  | $p = .056$                                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .056$                   |
|              | $p = 3.15 \cdot 10^{-49}$                 | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 9.45 \cdot 10^{-49}$    |
|              | $p = 7.53 \cdot 10^{-20}$                 | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = 1.51 \cdot 10^{-19}$    |

Tabelle B.12: Bonferroni-Holm Korrektur für die Analyse der Einzelitems - Teil 2 (Reihenfolge der t-Tests: 1. Post 1D - Prä 1D, 2. Post 2D - Prä 1D, 3. Post 1D - Post 2D)

| Item      | <i>p</i> -Wert            | Bonferroni-Holm<br>Korrektur ( $n = 3$ ) | Adjustierter<br><i>p</i> -Wert $p^*$ |
|-----------|---------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| N2.VBK.01 | $p = 4.64 \cdot 10^{-4}$  | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = .001$                         |
|           | $p = .777$                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .777$                         |
|           | $p = .015$                | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = .030$                         |
| N2.VKB.02 | $p = 1.33 \cdot 10^{-10}$ | $p^* = p \cdot n$                        | $p^* = 3.99 \cdot 10^{-10}$          |
|           | $p = 2.43 \cdot 10^{-10}$ | $p^* = p \cdot (n - 1)$                  | $p^* = 4.86 \cdot 10^{-10}$          |
|           | $p = .255$                | $p^* = p \cdot (n - 2)$                  | $p^* = .255$                         |

Tabelle B.13: Rasch Kennwerte für die Prätest-Ergebnisse der Hauptstudie mit DIF-Analyse (nur Gesamtschulen, für |DIF|-Kontrast < 0.01 gibt Winsteps keinen Signifikanztest aus, Signifikanzniveaus: \*\*\*  $p < .001$ , \*\*  $p < .01$ , \*  $p < .05$ )

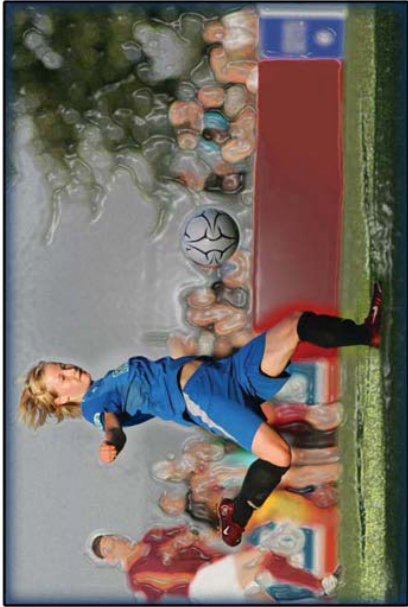
| Item           | Logits | Infit-MNSQ | Outfit-MNSQ | DIF -Kontrast | Rasch-Welch-Test        |
|----------------|--------|------------|-------------|---------------|-------------------------|
| B1.01          | 0.21   | 0.91       | 0.87        | 0.12          | t(287) = 0.45, p = .654 |
| B1.02          | -1.20  | 0.99       | 0.98        | 0.31          | t(286) = 1.25, p = .212 |
| B1.03          | 0.43   | 1.05       | 0.97        | 0.08          | t(287) = 0.28, p = .778 |
| B2.E.01        | 1.28   | 0.91       | 0.88        | 0.16          | t(291) = 0.43, p = .670 |
| B2.E.02        | -0.83  | 0.99       | 1.00        | 0.22          | t(286) = 0.89, p = .375 |
| B2.Z.01        | 1.15   | 1.07       | 1.00        | 0.62          | t(275) = 1.70, p = .091 |
| B2.Z.02        | -0.77  | 1.05       | 1.14        | 0.17          | t(292) = 0.69, p = .492 |
| B4.01          | -0.23  | 0.98       | 0.97        | <b>0.70**</b> | t(280) = 2.76, p < .01  |
| B4.02          | -0.86  | 1.05       | 1.04        | 0.16          | t(286) = 0.66, p = .512 |
| N1.E.01        | 2.01   | 0.90       | 1.44        | 0.60          | t(270) = 1.18, p = .237 |
| N1.Z.01        | 1.12   | 1.01       | 1.12        | < 0.01        | -                       |
| N2.KKB.01      | 0.81   | 0.90       | 0.91        | 0.17          | t(287) = 0.54, p = .586 |
| N2.KKB.02.A    | 0.47   | 0.95       | 0.97        | 0.36          | t(285) = 1.22, p = .225 |
| N2.KKB.04.A    | 0.12   | 1.04       | 1.06        | 0.18          | t(289) = 0.66, p = .510 |
| N2.KBK.0G.02   | -0.59  | 0.98       | 0.98        | 0.25          | t(288) = 1.01, p = .311 |
| N2.KBK.0G.05.A | -0.11  | 1.02       | 1.01        | 0.10          | t(287) = 0.40, p = .689 |
| N2.KBK.0G.06.A | 1.44   | 1.19       | 1.20        | 0.24          | t(286) = 0.61, p = .544 |
| N2.KB.04.A     | -0.51  | 1.00       | 1.01        | 0.15          | t(282) = 0.59, p = .553 |
| N2.KB.E.01     | -0.11  | 1.03       | 1.02        | 0.21          | t(291) = 0.81, p = .420 |
| N2.KB.ES.01    | 0.43   | 1.20       | 1.29        | 0.34          | t(285) = 1.18, p = .241 |
| N2.KB.Z.01     | -0.25  | 0.98       | 0.96        | 0.28          | t(263) = 1.04, p = .301 |
| N2.KB.ZS.01    | 0.25   | 1.02       | 0.98        | 0.16          | t(281) = 0.56, p = .575 |
| N2.BK.04.A     | 0.31   | 1.04       | 1.03        | 0.21          | t(280) = 0.74, p = .462 |
| N2.VBK.01      | -0.55  | 1.04       | 1.03        | <b>0.61*</b>  | t(280) = 2.41, p < .05  |
| N2.VBK.02      | -0.05  | 0.87       | 0.86        | <b>0.61*</b>  | t(279) = 2.28, p < .05  |
| N2.VKB.01      | -3.08  | 1.02       | 1.14        | <b>0.89**</b> | t(272) = 2.63, p < .01  |
| N2.VKB.02      | -1.02  | .097       | 0.97        | 0.33          | t(292) = 1.34, p = .181 |



# C Interventionsmaterial

## C.1 SchülerInnenhefte

Anbei sind die SchülerInnentexte für beide Mechaniklehrgänge abgebildet. Für einen direkten Vergleich sind immer die entsprechenden analog aufgebauten Seiten für das 2DD-Mechanikkonzept und für die 1D-Adaption nebeneinander dargestellt (oben bzw. die rechte Seite entspricht immer dem 2DD-Mechanikkonzept und unten bzw. links der 1D-Adaption). Wird in der Darstellung eine leere Seite gezeigt, gibt es kein Analogon im anderen SchülerInnenheft.



## Einführung in die Mechanik



## Einführung in die Mechanik

SchülerInnenhefte: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

## Einführung in die Mechanik

### Inhaltsverzeichnis:

1. Pass – Schuss – Tor!!
2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen
3. Wie schnell? Wohin?
  - 3.1 Geschwindigkeit
  - 3.2 Richtung
  - 3.3 Geschwindigkeitspfeile
4. Die Beschleunigung
  - 4.1 Geschwindigkeitsänderung als Folge einer Einwirkung
  - 4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit
  - 4.3 Konstruktion der Geschwindigkeitsänderung
  - 4.4 Geschwindigkeitsänderung aus der gleichmäßigen Beschleunigung
  - 4.5 Beschleunigung vergleichen
5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung
  - 5.1 Kraft und Beschleunigung
  - 5.2 Masse und Beschleunigung
  - 5.3 Die Newton'sche Bewegungsgleichung
6. Anwendungen der Newton'schen Bewegungsgleichung
  - 6.1 Alltagsanwendungen

## Einführung in die Mechanik

### Inhaltsverzeichnis:

1. Flanke – Kopfball – Tor!!
2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen
3. Wie schnell? Wohin?
  - 3.1 Tempo
  - 3.2 Richtung
  - 3.3 Geschwindigkeit
4. Die Zusatzgeschwindigkeit
  - 4.1 Zusatzgeschwindigkeit als Folge einer Einwirkung
  - 4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit
  - 4.3 Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit
5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung
  - 5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit
  - 5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit
  - 5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit
  - 5.4 Die Newton'sche Bewegungsgleichung
6. Anwendungen der Newton'schen Bewegungsgleichung
  - 6.1 Alltagsanwendungen

SchülerInnenhefte: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Autoren:</b><br/>Prof. Dr. Heiko Krabbe<br/>Marco Seiter</p> <p>Ruhr-Universität Bochum<br/>Fakultät für Physik und Astronomie<br/>AG Didaktik der Physik<br/>Universitätsstraße 150<br/>44801 Bochum</p> <p>Prof. Dr. habil. Thomas Wilhelm</p> <p>Goethe-Universität Frankfurt a.M.<br/>Institut für Didaktik der Physik<br/>Max-von-Laue-Straße 1<br/>60438 Frankfurt am Main</p> <p>©Copyright August 2019</p> | <p><b>Ursprüngliche Version</b></p> <p><b>Autoren:</b><br/>Prof. Dr. Martin Hopf, Prof. Dr. Thomas Wilhelm, Dr. Christine Walther,<br/>JProf. Dr. Verena Spatz (geb. Tobias), Prof. Dr. Dr. Hartmut Wiesner</p> <p><b>Ideen und Mitarbeit:</b><br/>A. Ilhan Sen, Barbara Scherzer,<br/>Anne Zimmer, Florian Schüller,<br/>Christine Michel</p> <p><b>Weitere Fotos und Bilder:</b><br/>M. Bubb, R. Lubinski</p> <p><b>Korrektur:</b><br/>Heiko Pauthner, Wolfgang<br/>Reusch, Claudia Hopf</p> <p><b>Titelfoto und Fußballbilder:</b><br/>FFC Wacker München<br/>Fotograf: Markus Römer</p> <p><b>Adaptiert von:</b><br/>Prof. Dr. Heiko Krabbe<br/>Marco Seiter</p> <p>Prof. Dr. Thomas Wilhelm</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

SchülerInnenhefte: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

1. Pass - Schuss - Tor!!!



1. Anna beim Torschuss

Erfolgreichen Stürmerinnen und Stürmern gelingt es, einen Pass mit einem Schuss ins Tor zu lenken (Bild 1). Gekommt wird durch eine Einwirkung der Ball in Bewegung gesetzt, so dass er ins gegnerische Tor fliegt.

Innerhalb der Physik befasst sich der Bereich der Mechanik mit dem Zusammenhang zwischen der Einwirkung auf einen Gegenstand und der Auswirkung auf seine Bewegung; Er kann dadurch schneller und langsamer werden oder auch seine Richtung verändern. Bewegungen haben immer eine Ursache: Trifft der geschossene Ball tatsächlich ins Tor, so ist dies der Erfolg der Spielerin. Sie darf sich feiern lassen!

Mit den Gesetzen der Mechanik kann man Bewegungen voraussagen, wenn man die Einwirkung kennt: Wird z. B. der Ball ins Tor landen, wenn ein Fußballspieler mit einer gewissen Stärke schießt? Umgekehrt ist es auch möglich die Einwirkung zu erschließen, wenn man die Bewegung beobachtet: Mit welcher Stärke hat z. B. der Fußballspieler geschossen, wenn der Ball ins Tor landet?

Um Fragestellungen dieser Art wird es in den nächsten Kapiteln gehen.

1. Flanke - Kopball - Tor!!!



1. Anna und Marie beim Kopball

Erfolgreichen Stürmerinnen und Stürmern gelingt es, eine Flanke mit einem Kopstoß ins Tor zu lenken (Bild 1). Gekommt ändern sie durch diese Einwirkung die ursprüngliche Bewegungsrichtung des Balles, so dass er ins gegnerische Tor fliegt.

Innerhalb der Physik befasst sich der Bereich der Mechanik mit dem Zusammenhang zwischen der Einwirkung auf einen Gegenstand und der Auswirkung auf seine Bewegung; Er kann dadurch schneller und langsamer werden oder auch seine Richtung verändern. Bewegungsänderungen haben immer eine Ursache: Trifft der geflankte Ball tatsächlich ins Tor, so ist dies der Erfolg der köpfenden Spielerin. Sie darf sich feiern lassen!

Mit den Gesetzen der Mechanik kann man Bewegungen voraussagen, wenn man die Einwirkung kennt: Wird z. B. der Ball ins Tor landen, wenn ein Fußballspieler mit einer gewissen Stärke und Richtung köpft? Umgekehrt ist es auch möglich die Einwirkung zu erschließen, wenn man die Bewegung beobachtet: Mit welcher Stärke und Richtung hat z. B. der Fußballspieler geköpft, wenn der Ball ins Tor landet?

Um Fragestellungen dieser Art wird es in den nächsten Kapiteln gehen.

## 2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen



2.1 Toms Vater auf dem Fahrrad

Tom möchte die Fahrt seines Vaters auf dem Fahrrad dokumentieren. Hierfür nimmt er von der Seite aus ein Video mit der App *Motion Shot* auf. Tom bewegt sich hierbei nicht. Die einzelnen Bilder im Video werden anschließend von der App übereinander gelegt (Bild 2.2). In den Bildern haben wir jeweils einen roten Punkt auf die hintere Radnabe gemalt, damit du dich daran orientieren kannst.



2.2 Bilderreihe von Toms Vater auf dem Fahrrad  
Tom und sein Vater zeigen hiermit ein typisches Beispiel dafür, wie Bewegungen aufgezeichnet werden.

### Beschreibung einer Bewegung:

Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss zu bestimmten Zeitpunkten festgestellt werden, wo sich der Gegenstand befindet. Sowohl der Zeitpunkt der Messung als auch der Ort des Gegenstands müssen dabei möglichst genau festgehalten werden. Die Bewegung wird dabei umso genauer beschrieben, je näher die Zeitpunkte zusammen liegen und umso präziser Ort und Zeit bestimmt worden sind.

### Stroboskopbild

Den Ort eines Gegenstands kann man auch mit einem Fotoapparat bestimmen. Dazu macht man in festen Zeitabständen immer wieder ein Foto. (Der Fotoapparat darf sich dabei nicht bewegen.) Wenn diese Fotos übereinander gelegt werden, entsteht ein so genanntes **Stroboskopbild** (SB).

Falls sich die einzelnen Bilder überschneiden sollten, weil der Gegenstand sich zum Beispiel wieder zurück bewegt, fangen wir eine neue Zeile oder Spalte neben dem bisherigen Stroboskopbild an, damit wir nicht den Überblick verlieren.

In Bild 2.3 ist die Bewegung eines Autos abgebildet. Dabei wurde immer nach 1 Sekunden ein neues Bild gemacht. Damit du das besser erkennst, steht über jedem Bild die vergangene Zeit seit dem Beginn der Aufnahme. Jetzt ist die Bewegung des Autos sehr genau beschrieben. Du kannst auch erkennen, wann das Auto am schnellsten war: Zwischen dem 3. und 4. Bild liegt der größte Abstand. Da zwischen zwei Bildern immer 1 Sekunde vergangen ist, war er hier am schnellsten. Insgesamt war das 4 Sekunden nach dem Start. Das erkennst du daran, dass über dem Bild die vergangene Zeit von 4 Sekunden steht.



2.3 Stroboskopbild eines Autos. Zwischen zwei Aufnahmen liegt immer 1 Sekunde.

### Aufgaben

1. Beschreibe, wie Tom und sein Vater die Fahrradfahrt aufgezeichnet haben.
2. Erläutere, weshalb aus Bild 2.2 nicht die exakte Bewegung von Toms Vater ablesbar ist.
3. In Bild 2.4 siehst du das Stroboskopbild eines Fußballs.
  - a) Beschreibe die Bewegung des Balls. Entscheide, ob die Bewegung links oder rechts im Bild angefangen hat.
  - b) Wann war der Fußball am schnellsten? Wann war er am langsamsten? Kannst du den genauen Zeitpunkt des Aufpralls angeben?

## 2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen



2.1 Weißstorch „Max“ mit einem kleinen Sender

Störche fliegen zum Überwintern in den Süden. Um den Zug der Störche zu verfolgen, wurde ein großes Forschungsprojekt gestartet. Schon kurz nach der Geburt wurde der Weißstorch Max mit einem kleinen Sender ausgestattet (Bild 2.1). Nun kann in regelmäßigen Abständen der Aufenthaltsort von Max bestimmt und in eine Landkarte eingetragen werden (Bild 2.2).



2.2 Flugroute von Max bis zum 4.10.2009

Die Forschung zum Zug der Störche zeigt ein typisches Beispiel, wie Bewegungen aufgezeichnet werden.

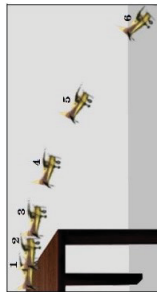
### Beschreibung einer Bewegung:

Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss zu bestimmten Zeitpunkten festgestellt werden, wo sich der Gegenstand befindet. Sowohl der Zeitpunkt der Messung als auch der Ort des Gegenstands müssen dabei möglichst genau festgehalten werden. Die Bewegung wird dabei umso genauer beschrieben, je näher die Zeitpunkte zusammen liegen und umso präziser Ort und Zeit bestimmt worden sind.

### Stroboskopbilder

Den Ort eines Gegenstands kann man auch mit einem Fotoapparat bestimmen. Dazu macht man in festen Zeitabständen immer wieder ein Foto. (Der Fotoapparat darf sich dabei nicht bewegen.) Wenn diese Fotos übereinander gelegt werden, entsteht ein so genanntes **Stroboskopbild** (SB).

In Bild 2.3 ist die Bewegung eines Spielzeugfliegers abgebildet. Dabei wurde immer nach 0,1 Sekunden ein neues Bild gemacht. Damit du das besser erkennst, sind die einzelnen Bilder nummiert. Jetzt ist die Flugroute des Fliegers sehr genau beschrieben. Du kannst auch erkennen, wann der Flieger am schnellsten war: Zwischen den Punkten 5 und 6 liegt der größte Abstand. Da zwischen zwei Punkten immer 0,1 Sekunden vergangen sind, war er hier am schnellsten. Insgesamt war das 0,5 Sekunden nach dem Start. Das erkennst du daran, dass es sich um das 5. Bild handelt und damit 5 mal 0,1 Sekunden seit dem Start vergangen sind.



2.3 Stroboskopbild eines Spielzeugfliegers. Zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,1 Sekunden.

### Aufgaben

1. Beschreibe, wie die Bewegung des Storchs Max aufgezeichnet wurde.
2. Erläutere, weshalb aus Bild 2.2 nicht die exakte Flugroute von Max ablesbar ist.
3. In Bild 2.4 siehst du das Stroboskopbild eines Fußballs.
  - a) Beschreibe die Bewegung des Balls. Entscheide, ob die Bewegung am linken oder am rechten Bildrand angefangen hat.
  - b) Wann war der Fußball am schnellsten? Wann war er am langsamsten? Kannst du den genauen Zeitpunkt des Aufpralls angeben?

### 3. Wie schnell? Wohin?

Du hast bereits gelernt, wie Bewegungen beschrieben werden: Zu festgelegten Zeitpunkten wird der Ort des Gegenstands bestimmt. Manchmal reicht das aber nicht. Darum geht es bei folgendem Spiel:

**V1:** Ein fernsteuerbares Auto soll durch Vorwärts- und Rückwärtsfahren in einem vorgegeben Rechteck (Bild 3.1) geparkt werden. Wenn du die Fernsteuerung bedienst, darfst du dabei nicht auf die Strecke schauen, sondern nur auf die Anweisungen deiner Mitschüler hören.



2.4 Stroboskopbild eines Fußballs. Zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden.

④ Statt immer wieder neue Fotos zu machen, kannst du auch einen Videofilm drehen. Eine Videokamera funktioniert nämlich genauso: Alle 0,04 Sekunden wird ein neues Bild aufgenommen. Das siehst du, wenn du einen Videofilm bildweise ablaufen lässt. Dann kannst du z.B. einen Ablauf wie in Bild 2.5 erkennen.



**Beobachtung:** Bei dem Versuch erhältst du Anweisungen wie „schneller“, „langsamer“, „vorwärts“, „rückwärts“, oder „stopp“ usw. Es kommt also nicht nur darauf an, wie schnell, sondern auch in welche Richtung sich das Auto bewegt.

Dieses Ergebnis kann man verallgemeinern: Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss man an jedem Punkt der Bewegung angeben, **wie schnell und wohin** er sich fortbewegt.

#### 3.1 Geschwindigkeit

Der Begriff **Geschwindigkeit** beschreibt in der Physik, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt. Die Geschwindigkeit wird mit dem Buchstaben  $v$  bezeichnet und entweder in der Einheit  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$  oder  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  angegeben. Dabei sind

$$36 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 36 \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3

### 3. Wie schnell? Wohin?

Du hast bereits gelernt, wie Bewegungen beschrieben werden: Zu festgelegten Zeitpunkten wird der Ort des Gegenstands bestimmt. Manchmal reicht das aber nicht. Darum geht es bei folgendem Spiel:

**V1:** Ein fernsteuerbares Auto soll entlang einer vorgegebenen Route (Bild 3.1) fahren. Wenn du die Fernsteuerung bedienst, darfst du dabei nicht auf die Strecke schauen, sondern nur auf die Anweisungen deiner Mitschüler hören.



3.1 Ferngesteuertes Auto auf einer vorgegebenen Route

**Beobachtung:** Bei dem Versuch erhältst du Anweisungen wie „rechts“, „links“, „mehr links“, „geradeaus“, „schneller“ oder „stopp“ usw. Es kommt also nicht nur darauf an, wie schnell, sondern auch wohin sich das Auto bewegt.

Dieses Ergebnis kann man verallgemeinern: Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss man an jedem Punkt der Bewegung angeben, **wie schnell und wohin** er sich fortbewegt.

#### 3.1 Tempo

Der Begriff **Tempo** beschreibt in der Physik, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt. Das Tempo wird mit dem Buchstaben  $v$  bezeichnet und entweder in der Einheit  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$  oder  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$  angegeben. Dabei sind

$$36 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 36 \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

3

**Beispiele**

Du hast bestimmt auch schon einmal gesehen, wie die Geschwindigkeit eines Fahrrades oder eines Autos auf einem Tachometer (Bild 3.2) angezeigt wird.



3.2 Tacho eines Fahrrads und eines Autos

Meistens steht aber kein Tacho zur Verfügung. Trotzdem kannst du die Geschwindigkeit eines Gegenstands ganz einfach bestimmen: Dabei misst du dir immer einen Anfangs- und einen Endpunkt aussuchen, zwischen denen du die Geschwindigkeit bestimmen möchtest. Messe nun die Zeit, die der Gegenstand benötigt, um diese Strecke zurückzulegen. Dann kannst du die Geschwindigkeit als Quotient von zurückgelegter Strecke und dafür benötigter Zeit berechnen.

In der Formel wird die zurückgelegte Strecke mit  $\Delta s$ , die dafür benötigte Zeit mit  $\Delta t$  bezeichnet. (Das Symbol  $\Delta$  wird verwendet, weil sowohl die Strecke als auch die Zeit sich auf den Unterschied zwischen Anfangs- und Endpunkt beziehen.)

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{zurückgelegte Strecke}}{\text{dafür benötigte Zeit}}$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

| Platz | Läufer       | Reaktionszeit | 20m    | 40m    | 60m    | 80m    | 100m   |
|-------|--------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | Usain Bolt   | 0,146 s       | 2,89 s | 4,64 s | 6,31 s | 7,92 s | 9,58 s |
| 2     | Tyson Gay    | 0,144 s       | 2,92 s | 4,70 s | 6,39 s | 8,02 s | 9,71 s |
| 3     | Asafa Powell | 0,134 s       | 2,91 s | 7,71 s | 6,42 s | 8,10 s | 9,84 s |

Tabelle 1: Zeitmessungen für einen 100 m Lauf für verschiedene Streckenabschnitte

4

Du hast bestimmt auch schon einmal gesehen, wie das Tempo eines Fahrrades oder eines Autos auf einem Tachometer (Bild 3.2) angezeigt wird.



3.2 Tacho eines Fahrrads und eines Autos

Meistens steht aber kein Tacho zur Verfügung. Trotzdem kannst du das Tempo eines Gegenstands ganz einfach bestimmen: Dabei misst du dir immer einen Anfangs- und einen Endpunkt aussuchen, zwischen denen du das Tempo bestimmen möchtest. Messe nun die Zeit, die der Gegenstand benötigt, um diese Strecke zurückzulegen. Dann kannst du das Tempo als Quotient von zurückgelegter Strecke und dafür benötigter Zeit berechnen.

In der Formel wird die zurückgelegte Strecke mit  $\Delta s$ , die dafür benötigte Zeit mit  $\Delta t$  bezeichnet. (Das Symbol  $\Delta$  wird verwendet, weil sowohl die Strecke als auch die Zeit sich auf den Unterschied zwischen Anfangs- und Endpunkt beziehen.)

$$\text{Tempo} = \frac{\text{zurückgelegte Strecke}}{\text{dafür benötigte Zeit}}$$

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

| Platz | Läufer       | Reaktionszeit | 20m    | 40m    | 60m    | 80m    | 100m   |
|-------|--------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | Usain Bolt   | 0,146 s       | 2,89 s | 4,64 s | 6,31 s | 7,92 s | 9,58 s |
| 2     | Tyson Gay    | 0,144 s       | 2,92 s | 4,70 s | 6,39 s | 8,02 s | 9,71 s |
| 3     | Asafa Powell | 0,134 s       | 2,91 s | 7,71 s | 6,42 s | 8,10 s | 9,84 s |

Tabelle 1: Zeitmessungen für einen 100 m Lauf für verschiedene Streckenabschnitte

4

**Beispiele**a) *Tempo eines Stalters*

Thomas fährt bei der Blade-Night mit. Für die 18,7 km benötigt er 1,5 h. Sein Tempo ist dann (im Durchschnitt):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{18,7 \text{ km}}{1,5 \text{ h}} = 12,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

b) *Tempo beim 100-m-Lauf*

Am 16.08.2009 lief der Jamaikaner Usain Bolt in Berlin einen neuen Weltrekord. Er sprintete die 100 m in 9,58 s. Sein Tempo war (im Durchschnitt):

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{100 \text{ m}}{9,58 \text{ s}} = 10,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Das sind 37,6  $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ .



3.3 Usain Bolt

Bei einem solchen Rennen werden auch die Reaktionszeiten und die Zwischenzeiten der Sprinter aufgezeichnet.

Anhand der Tabelle 1 kannst du das Tempo der drei Erstplatzierten auf verschiedenen Streckenabschnitten berechnen.

Auf welchem Streckenabschnitt erreicht Usain Bolt das größte Tempo? Wie groß war es?

Welches war das größte Tempo, das seine beiden Konkurrenten auf einem Streckenabschnitt erreichten? An welcher Stelle wurde es erreicht?

c) *Tempormessung*

Du kannst eine ähnliche Tempormessung auch selbst durchführen. Um zum Beispiel das Tempo eines Fahrradfahrers zu bestimmen, benötigst du eine Stoppuhr und ein Maßband. Markiere eine Strecke (z. B. 10 m) auf dem Schulhof. Sobald das Fahrrad die erste Markierung durchfährt, startest du die Stoppuhr und stoppst sie, wenn das Fahrrad die zweite Markierung durchfährt. Dann kannst du das Tempo ausrechnen.

d) *Tempo des Spielzeugfliegers*

Betrachte noch einmal die Stroboskopaufnahme des Spielzeugfliegers (Bild 2.3). Du siehst auf Anhieb, dass der Flieger von Punkt 5 zu Punkt 6 die größte Strecke zurückgelegt hat. Das sind ungefähr 18 mm im Bild, das aber verkleinert ist: Der Flieger ist im Bild nur 5 mm, in Wirklichkeit aber 20 cm groß. Damit kannst du ausrechnen, wie lang die Flugstrecke  $\Delta s$  von Punkt 5 zu Punkt 6 war:  $\Delta s = (20 \text{ cm} : 5 \text{ mm}) \cdot 18 \text{ mm}$

Weil du weißt, dass der Flieger für diese Strecke genau  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$  gebraucht hat, kannst du jetzt das Tempo berechnen:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{0,72 \text{ m}}{0,1 \text{ s}} = 7,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

e) *Tempo in Natur und Technik*

In der Natur und der Technik gibt es ganz unterschiedliche schnelle Bewegungen. Ein Überblick ist in Bild 3.4 abgedruckt.

Wie schnell ist ungefähr ... ?

|                       |                                         |
|-----------------------|-----------------------------------------|
| Eine Schnecke:        | 0,0008 m/s oder 0,003 km/h              |
| Ein Fuggen:           | 1,5 m/s oder 5,5 km/h                   |
| Ein Radfahrer:        | 7 m/s oder 25 km/h                      |
| Ein Regenmgel:        | 11 m/s oder 40 km/h                     |
| Ein Kampfgel:         | 25 m/s oder 90 km/h                     |
| Ein Auto:             | 33 m/s oder 120 km/h                    |
| Ein Flugzeug:         | 250 m/s oder 900 km/h                   |
| Der Schall:           | 340 m/s oder 1220 km/h                  |
| Eine Geschwindigkeit: | 800 m/s oder 2900 km/h                  |
| Das Licht:            | 300 000 000 m/s oder 1 080 000 000 km/h |

3.4 Geschwindigkeit in Natur und Technik

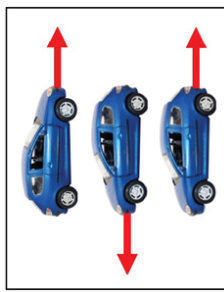
## 3.2 Richtung

Du hast schon gelernt, dass es zur Beschreibung einer Bewegung nicht ausreicht, den Ort und die Geschwindigkeit anzugeben, genauso wichtig ist die **Richtung**, in welche die Bewegung erfolgt. Zum Beispiel darf eine Einbahnstraße nur in eine Richtung befahren werden (Bild 3.6).



3.6 Einbahnstraße

Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben.



3.7 Verschiedene Bewegungsrichtungen beim Auto  
Betrachte Bild 3.7 genau: Welche Fahrzeuge bewegen sich in die gleiche Richtung? Zum Beispiel haben das obere und das untere Auto auch die gleiche Bewegungsrichtung und damit auch das gleiche Ziel, obwohl das eine Auto vorwärts und das andere rückwärts fährt. Das Auto in der Mitte fährt zwar auch wie das Obere vorwärts, hat aber eine andere Bewegungsrichtung und damit auch ein anderes Ziel.

## Aufgaben

1. Erkläre, was bei einer Bewegung außer den Orten noch angegeben werden muss.
2. Erkläre, wie du die Geschwindigkeit eines ferngesteuerten Autos mit einem Experiment bestimmen kannst.
3. Finde heraus, wie ein Fahrradacho, das Tempo misst. Überlege dir ein Experiment um herauszufinden, ob der Tacho die richtige Geschwindigkeit anzeigt.
4. Beim 400-m-Lauf starten die Athleten von ganz unterschiedlichen Positionen (Bild 3.5). Erkläre, weshalb nur so ein fairer Wettkampf möglich ist.



3.5 Leichtathletik-Mitteldistanzenrennen

5. Beim Biathlon-Verfolgungsrennen starten die Läufer in der gleichen Reihenfolge und mit dem gleichen zeitlichen Abstand, mit dem sie am Tag vorher beim Sprint ins Ziel gekommen sind. Der Sieger des Sprints startet also als erster. Der Zweitplatzierte des Sprints darf auch als zweiter in die Loipe, und zwar genau nach Ablauf der Zeit, die er am Tag zuvor zurücklag. Bei den Olympischen Spielen in Turin siegte der Deutsche Sven Fischer im Sprint und war dabei 2 min 11 s schneller als sein Teamkamerad Michael Greis. Am Ende des Verfolgungsrennens am nächsten Tag kam Sven Fischer nur 1 min 4 s vor Michael Greis ins Ziel. Wer von beiden hatte beim 12,5 km langen Verfolgungsrennen eine größere (Durchschnitts-) Geschwindigkeit?

## Aufgaben

1. Erkläre, was bei einer Bewegung außer den Orten noch angegeben werden muss.
2. Erkläre, wie du das Tempo eines ferngesteuerten Autos mit einem Experiment bestimmen kannst.
3. Finde heraus, wie ein Fahrradacho, das Tempo misst. Überlege dir ein Experiment um herauszufinden, ob der Tacho das richtige Tempo anzeigt.
4. Beim 400-m-Lauf starten die Athleten von ganz unterschiedlichen Positionen (Bild 3.5). Erkläre, weshalb nur so ein fairer Wettkampf möglich ist.



3.5 Leichtathletik-Mitteldistanzenrennen

5. Beim Biathlon-Verfolgungsrennen starten die Läufer in der gleichen Reihenfolge und mit dem gleichen zeitlichen Abstand, mit dem sie am Tag vorher beim Sprint ins Ziel gekommen sind. Der Sieger des Sprints startet also als erster. Der Zweitplatzierte des Sprints darf auch als zweiter in die Loipe, und zwar genau nach Ablauf der Zeit, die er am Tag zuvor zurücklag. Bei den Olympischen Spielen in Turin siegte der Deutsche Sven Fischer im Sprint und war dabei 2 min 11 s schneller als sein Teamkamerad Michael Greis. Am Ende des Verfolgungsrennens am nächsten Tag kam Sven Fischer nur 1 min 4 s vor Michael Greis ins Ziel. Wer von beiden hatte beim 12,5 km langen Verfolgungsrennen ein größeres (Durchschnitts-) Tempo?

## 3.2 Richtung

Du hast schon gelernt, dass es zur Beschreibung einer Bewegung nicht ausreicht, den Ort und das Tempo anzugeben. Genauso wichtig ist die **Richtung**, in welche die Bewegung erfolgt. Das siehst du z.B. bei Navigationssystemen (Bild 3.6).



3.6 Vorschlag einer Änderung der Bewegungsrichtung

Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben.



3.7 Pfeile bei verschiedenen Fahrzeugen

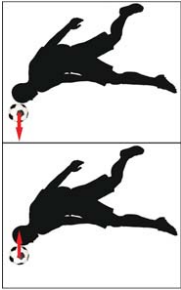
Betrachte Bild 3.7 genau: Welche Fahrzeuge bewegen sich in die gleiche Richtung? Zum Beispiel haben die drei Autos mit den gelben Pfeilen die gleiche Bewegungsrichtung. Beachte aber, dass diese Autos nicht unbedingt das gleiche Ziel haben. Umgekehrt haben die vier Autos, die auf den Kreislaufzufahren, das gleiche Ziel, aber alle verschiedene Bewegungsrichtungen!

### 3.3 Geschwindigkeitspfeile

Du hast bereits gelernt, wie du die Richtung einer Bewegung darstellen kannst: Du zeichnest einfach einen Pfeil. Du hast aber auch gelernt, dass die Geschwindigkeit und die Richtung angegeben werden müssen, um eine Bewegung zu beschreiben. Wie könnte man das nun darstellen?

Eine Möglichkeit wäre es, zu jedem Pfeil das Tempo dazuschreiben. Es gibt aber eine einfachere Methode: Man kann den Pfeil unterschiedlich lang zeichnen. Je größer das Tempo, desto länger der Pfeil. (Ähnlich ist das auch bei der Lautstärkeerregung einer Stereoanlage: Je lauter der Ton, desto höher die Balken der Anzeige.)

In Bild 3.9 sind die Pfeile entsprechend eingezeichnet. Alle drei Fahrzeuge haben unterschiedliches Tempo aber die gleiche Bewegungsrichtung.



3.8 Bewegungsänderung nach Kopfball

#### Aufgabe

① a) Martin behauptet: „Immer wenn die Pfeile zweier bewegter Gegenstände die gleiche Richtung haben, haben sie auch das gleiche Ziel.“ Erkläre Martin, warum er nicht recht hat.

b) Matthias sagt: „Wenn zwei Autos das gleiche Ziel, dann zeigen ihre Pfeile auch in die gleiche Richtung.“ Auch Matthias hat nicht recht. Warum?

Für Spezialisten:  
Bisher haben wir die Bewegungen so beschrieben, wie du sie bezüglich der Erdoberfläche beobachten kannst. Dies ist auch für alle vorgestellten Fälle zweckmäßig. Grundsätzlich können die gleichen Bewegungen aber ganz unterschiedlich aussehen, wenn du sie von verschiedenen Standpunkten beschreibst.

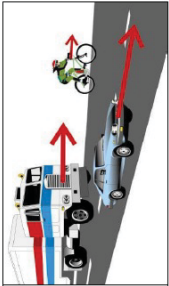
Stell dir vor:  
An einem windstillen Wintertag schweben Schneeflocken langsam senkrecht zur Erde hinunter. Aus einem fahrenden Auto siehst du aber etwas ganz anderes: Die Schneeflocken bewegen sich (vom fahrenden Auto aus beschrieben) nahezu horizontal und nicht mehr senkrecht zur Straße. Zur Beschreibung von Bewegungen gehört also eigentlich, in einem ersten Schritt festzulegen, von welchem Standpunkt aus die Bewegung beschrieben wird.

### 3.3 Geschwindigkeit

Du hast bereits gelernt, wie du die Richtung einer Bewegung darstellen kannst: Du zeichnest einfach einen Pfeil. Du hast aber auch gelernt, dass das Tempo und die Richtung angegeben werden müssen, um eine Bewegung zu beschreiben. Wie könnte man das nun darstellen?

Eine Möglichkeit wäre es, zu jedem Pfeil das Tempo dazuschreiben. Es gibt aber eine einfachere Methode: Man kann den Pfeil unterschiedlich lang zeichnen. Je größer das Tempo, desto länger der Pfeil. (Ähnlich ist das auch bei der Lautstärkeerregung einer Stereoanlage: Je lauter der Ton, desto höher die Balken der Anzeige.)

In Bild 3.9 sind die Pfeile entsprechend eingezeichnet. Alle drei Fahrzeuge haben unterschiedliches Tempo aber die gleiche Bewegungsrichtung.



3.9 Geschwindigkeitspfeile verschiedener Fahrzeuge

In der Physik werden die beiden Informationen Tempo und Richtung zusammengefasst: Die **Geschwindigkeit**  $\vec{v}$  eines Gegenstands setzt sich zusammen aus seinem Tempo und seiner Bewegungsrichtung. Sie wird durch einen **Geschwindigkeitspfeil** dargestellt. Seine Richtung gibt die Richtung der Bewegung, seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.

$$\text{Geschwindigkeit } \vec{v} = \begin{cases} \text{Tempo} \\ \text{Richtung} \end{cases}$$

Wenn zwei Geschwindigkeitspfeile zweier Gegenstände gleich sind, dass heißt gleiche Länge und gleiche Richtung haben, sind auch die Geschwindigkeiten der beiden Gegenstände gleich.

**Beachte:** Im Alltag wird oft „Geschwindigkeit“ oft als eine Größe angesehen, die nur positive Werte annehmen kann. Bewegt sich ein Körper aber beispielsweise in negative x-Richtung, so kann die Geschwindigkeit auch negativ werden!

#### Beispiele

a) *Geschwindigkeit und Geschwindigkeitspfeil*  
Mit Geschwindigkeitspfeilen kann man die Geschwindigkeit ganz genau angeben. Dazu ist ein Maßstab notwendig. So kannst du leicht herausfinden, wenn du weißt, dass 1 mm im Bild einer Geschwindigkeit von 5 km/h entspricht: Der Geschwindigkeitspfeil des Sportwagens ist 1,7 cm lang. Deswegen hat der Sportwagen die Geschwindigkeit 85 km/h.

b) *Durchschnittsgeschwindigkeiten*  
Man kann (mit einem vorgegebenen Maßstab) auch Geschwindigkeitspfeile in Stroboskopbildern einzeichnen. So soll z.B. der Maßstab für Bild 3.10 so sein, dass 1 mm einer Geschwindigkeit von 2 m/s entspricht. Zuerst wählst du die Orte aus, zwischen denen du die Durchschnittsgeschwindigkeit bestimmen möchtest. Der Traktor benötigt zwischen Ort A und Ort B ( $\Delta s = 12 \text{ m}$ ) 2 s und hat somit eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 6 m/s. Deswegen zeichnest du zwischen den Punkten A und B einen Geschwindigkeitspfeil von 3 mm Länge, der in Richtung des Ortes B zeigt.



3.10 Stroboskopbild eines Traktors mit Geschwindigkeitspfeil

8

Betrachte das Bild 3.11: In das Stroboskopbild der Bewegung des Autos sind die Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile eingezeichnet. Hierbei wurde beim Auto die Mitte des Hinterrades betrachtet. Du erkennst, dass sich die Geschwindigkeit ständig ändert.



3.11 Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Autos

#### c) *Momentangeschwindigkeiten*

Im Gegensatz zur Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen zwei Punkten, beschreibt die Momentangeschwindigkeit die Geschwindigkeit in einem einzelnen Punkt. Um die Momentangeschwindigkeit bestimmen zu können, müssen wir die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Bildern immer kleiner werden lassen. Dadurch nähert sich der Pfeil der Durchschnittsgeschwindigkeit immer mehr dem Pfeil der Momentangeschwindigkeit an. Ansonsten gehst du bei der Berechnung wie bei der Durchschnittsgeschwindigkeit vor. Um so kleiner jetzt der zeitliche Abstand zwischen zwei gewählten Punkten wird, desto genauer beschreibt die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen ihnen die Momentangeschwindigkeit.

In Bild 3.12 sind die Momentangeschwindigkeitspfeile in dem Stroboskopbild des Fußballs eingezeichnet. Die Pfeile beginnen immer im Zentrum des Fußballs, da die Momentangeschwindigkeit immer genau in diesem Punkt bestimmt wurde.

Um die Begriffe Tempo und Geschwindigkeit nicht zu verwechseln, schreibt man immer eine kleinen Pfeil über den Buchstaben, wenn die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  gemeint ist, dagegen schreibt man nie einen Pfeil über den Buchstaben, wenn das Tempo  $v$  gemeint ist. Der kleine Pfeil erinnert dich daran, dass die Geschwindigkeit aus Tempo und Bewegungsrichtung besteht.

Zwei Geschwindigkeiten sind nur dann gleich, wenn sie die gleiche Tempo und die gleiche Richtung haben! (Die Geschwindigkeitspfeile sind dann gleich lang und zeigen in die gleiche Richtung.)

**Beachte:** Im Alltag wird oft „Geschwindigkeit“ gesagt, wenn eigentlich das Tempo gemeint ist. In der Physik besteht jedoch ein wichtiger Unterschied. Du musst immer genau überlegen, ob es um die Geschwindigkeit oder das Tempo geht!

#### Beispiele

##### a) *Tempo und Geschwindigkeitspfeil*

Mit Geschwindigkeitspfeilen kann man das Tempo ganz genau angeben. Dazu ist ein Maßstab notwendig. So kannst du das Tempo des Sportwagens aus Bild 3.9 leicht herausfinden, wenn du weißt, dass 1 mm im Bild einem Tempo von 10 km/h entspricht: Der Geschwindigkeitspfeil des Sportwagens ist 1,7 cm lang. Deswegen hat der Sportwagen das Tempo 170 km/h.

##### b) *Durchschnittsgeschwindigkeiten*

Man kann (mit einem vorgegebenen Maßstab) auch Geschwindigkeitspfeile in Stroboskopbildern einzeichnen. So soll z.B. der Maßstab für Bild 3.10 so sein, dass 1 mm einen Tempo von 2 m/s entspricht. Zuerst wählst du die Orte aus, zwischen denen du die Durchschnittsgeschwindigkeit bestimmen möchtest. Danach errechnest du das Durchschnittstempo. Der Traktor benötigt zwischen Ort A und Ort B ( $\Delta s = 12 \text{ m}$ ) 2 s und hat somit ein Durchschnittstempo von 6 m/s. Deswegen zeichnest du zwischen den Punkten A und B einen Geschwindigkeitspfeil von 3 mm Länge, der in Richtung des Ortes B zeigt.



3.10 Stroboskopbild eines Traktors mit Geschwindigkeitspfeil

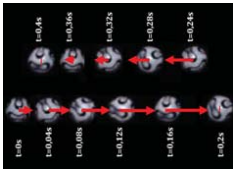
Betrachte das Bild 3.11: In das Stroboskopbild der Bewegung des Fliegers sind die Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile eingezeichnet. Hierbei wurde beim Flugzeug der Ort des Propellers betrachtet. Du erkennst, dass sich sowohl Tempo als auch Richtung ständig ändern.



3.11 Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Spielzeugfliegers

##### c) *Momentangeschwindigkeiten*

Im Gegensatz zur Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen zwei Punkten, beschreibt die Momentangeschwindigkeit die Geschwindigkeit in einem einzelnen Punkt. Um die Momentangeschwindigkeit bestimmen zu können, müssen wir die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Bildern immer kleiner werden lassen. Dadurch nähert sich der Pfeil der Durchschnittsgeschwindigkeit immer mehr dem Pfeil der Momentangeschwindigkeit an. Ansonsten gehst du bei der Berechnung wie bei der Durchschnittsgeschwindigkeit vor. Um so kleiner jetzt der zeitliche Abstand zwischen zwei gewählten Punkten wird, desto genauer beschreibt die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen ihnen die Momentangeschwindigkeit. In Bild 3.12 sind die Momentangeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Fußballs eingezeichnet. Die Pfeile beginnen immer im Zentrum des Fußballs, da die Momentangeschwindigkeit immer genau in diesem Punkt bestimmt wurde.



3.12 Momentangeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Fußballes

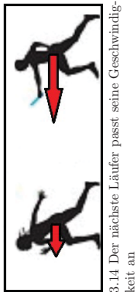
Wie du merkst, ist dieses Verfahren recht mühsam. Es ist praktisch, dass es Computerprogramme gibt, die Geschwindigkeitspfeile automatisch zeichnen können.

d) **Staffellauf**  
Beim Staffellauf (Bild 3.13) muss der Stafelstab von einem Läufer an den nächsten weitergereicht werden. Dies sollte möglichst ohne Zeitverlust passieren.



3.13 Staffellauf

Für die Übergabe läuft der Stabträger mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Der nächste Läufer passt sich in der Zeit der Geschwindigkeit an und läuft vor dem Träger, so dass der Stab bei großer Geschwindigkeit weitergegeben werden kann. (Bild 3.15)



3.14 Der nächste Läufer passt seine Geschwindigkeit an



3.15 Übergabe des Stafelstabes

**Aufgaben**

- Erläutere den Unterschied zwischen dem Betrag und der Richtung der Geschwindigkeit.
- Zeichne ein Bild, in das du für zwei Autos Geschwindigkeitspfeile mit unterschiedlichen Beträgen  $v_1$  und  $v_2$  und außerdem für zwei LKWs mit gleichen Beträgen  $v_3$  und  $v_4$  einzeichnest!
- Zeichne jeweils zwei Fahrräder mit unterschiedlichen Geschwindigkeitspfeilen
  - mit gleicher Bewegungsrichtung aber unterschiedlichem Betrag!
  - mit gleichem Betrag aber unterschiedlichen Bewegungsrichtungen!
- Zeichne die Momentangeschwindigkeitspfeile für Flugzeuge, die
  - mit 610 km/h nach Westen
  - mit 380 km/h nach Osten
- Übertrage das Stroboskopbild (Bild 3.16) ins Heft. Zeichne die Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile zwischen den Punkten ein. Die Zeit zwischen zwei Bildaufnahmen beträgt eine Sekunde. Beschrifte die Punkte dementsprechend mit der Zeit für eine Bewegung nach rechts.



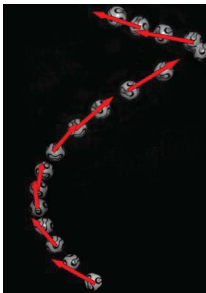
3.14 Geschwindigkeitspfeile der beiden Flugzeuge



3.15 Geschwindigkeitspfeile der beiden Flugzeuge

**Aufgaben**

- Erläutere den Unterschied zwischen Geschwindigkeit und Tempo.
- Zeichne ein Bild, in das du für zwei Autos unterschiedliche Geschwindigkeiten  $\vec{v}_1$  und  $\vec{v}_2$  und außerdem für zwei LKWs gleiche Geschwindigkeiten  $\vec{v}_3$  und  $\vec{v}_4$  einzeichnest!
- Zeichne jeweils drei Fahrräder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $\vec{v}_1$ , aber mit gleicher Bewegungsrichtung!
  - gleichem Tempo  $v$ !
- Zeichne die Momentangeschwindigkeitspfeile für Flugzeuge, die
  - mit 610 km/h nach Nordwesten
  - mit 470 km/h nach Süden
  - mit 380 km/h nach Osten
- Übertrage das Stroboskopbild (Bild 3.16) ins Heft. Zeichne Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen den Punkten A, B, C, D und E. Die Zeit zwischen zwei Bildaufnahmen beträgt eine Sekunde.



3.12 Momentangeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Fußballes

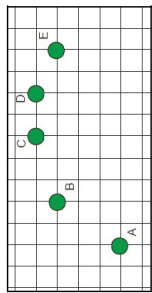
Wie du merkst, ist dieses Verfahren recht mühsam. Es ist praktisch, dass es Computerprogramme gibt, die Geschwindigkeitspfeile direkt in Stroboskopbilder einzeichnen.

d) **Fluglase bei der Arbeit**  
Ein Fluglase (Bild 3.13) beobachtet auf seinem Kontrollbildschirm die Bewegung zweier Flugzeuge, deren Flugbahnen sich offensichtlich schneiden werden.



3.13 Fluglase bei der Arbeit

Von 13:17 Uhr bis 13:18 Uhr haben sich die beiden Flugzeuge wie in Bild 3.14 bewegt. Muss der Lase die Piloten warnen? Nein, die Flugzeuge stoßen bei diesen Bewegungen nicht zusammen, obwohl sich die Flugbahnen kreuzen. Denn B fliegt deutlich schneller als A. (Bild 3.15)



3.16 Stroboskopbild

#### 4. Die Beschleunigung

##### 4.1 Geschwindigkeitsänderung als Folge einer Einwirkung



4.1 Seifenkiste

Wir führen einen Versuch mit Seifenkisten (Bild 4.1) durch. Bei dem ersten Versuch starten wir aus dem Stand heraus. Durch das Messen der zurückgelegten Strecke und der Zeit kann die Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet werden. Für die zweite Übung wird der Startpunkt markiert. Nun beginnen wir aber schon vor dem Startpunkt zu fahren, die Berechnung der Geschwindigkeit verläuft wie in Versuch 1.

V1: Simuliert die beiden Versuche: Lässt dabei einen kleinen Wagen eine schiefe Ebene herunterrollen. Bei Versuch 2 startet der Wagen dabei einfach weiter oben.

Was könnt ihr jeweils feststellen? Was passiert mit dem Wagen bei beiden Versuchen? Wir simulieren ebenfalls beide Versuche mit einem Wagen auf einer schiefen Ebene (Bilder 4.2 und 4.3).

**Beobachtung:** Bei beiden Versuchen ist der Wagen am Ende schneller als vorher.



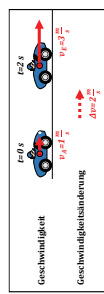
4.2 Versuch 1

Bei dem zweiten Versuch ist der Wagen im Ziel schneller als beim ersten Versuch (Bild 4.3).

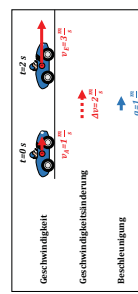


4.3 Versuch 2

Woran liegt das? Der Grund ist, dass der Wagen am Startpunkt schon eine Geschwindigkeit hat: zusätzlich zu dieser Geschwindigkeit am Startpunkt (falls vorhanden) gibt es eine weitere Geschwindigkeit durch den Hang. Betrachten wir dies genauer: Die Geschwindigkeit am Startpunkt nennen wir die Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$ , die Geschwindigkeit am Ziel nennen wir die Endgeschwindigkeit  $v_E$ . Zur Vereinfachung betrachten wir die Bewegung als Stroboskopbild in der Ebene (Bild 4.4).



4.4 Aufangs- und Endgeschwindigkeit des Wagens  
Was ist am Hang passiert? Der Wagen erhält am Hang eine **Beschleunigung**  $a$  und damit eine **Geschwindigkeitsänderung**  $\Delta v$ . Beide Pfeile zeigen in diesem Fall in die Bewegungsrichtung, da der Wagen schneller wird (Bild 4.5).



4.5 Beschleunigung mit Geschwindigkeitsänderung zu Bild 4.4

#### 4. Die Zusatzgeschwindigkeit

##### 4.1 Zusatzgeschwindigkeit als Folge einer Einwirkung



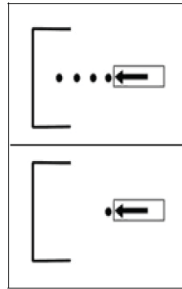
4.1 Anna beim Torschuss

Im Fußballtraining werden verschiedene Situationen geübt. Bei der ersten Übung zum Elfmeterschießen sollen die Spielerinnen und Spieler den Ball aus der Ruhe so anstoßen, dass das Tor getroffen wird. Bei der nächsten Übung wird der Ball den Spielerinnen und Spielern von der Seite (parallel zum Tor) zugepasst (Bild 4.1) und soll wieder genauso angekickt werden, wie eben beim Elfmerschießen. Allerdings darf der Ball nicht gestoppt werden.

V1: Simuliert die beiden Übungen mit einem kleinen Versuch: Nennt eine Kugel (z.B. eine Murre), baut aus Stiften ein Tor und versetzt der Kugel einen Stoß, indem ihr sie mit einem Lineal anschnippt. Führt ebenfalls beide Übungen durch.

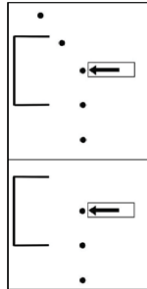
Was könnt ihr jeweils feststellen? Landet der Ball bzw. die Kugel bei beiden Übungen im Tor? Wir simulieren ebenfalls beide Fußballübungen im Experiment mit einer Kugel und stoßen sie beide Male mit einem Brett in Pfeilrichtung (Bilder 4.2 und 4.3).

**Beobachtung:** Bei der ersten Übung landet die Kugel immer im Tor.



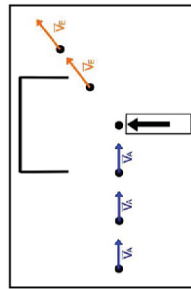
4.2 Stroboskopbild für Übung 1

Bei der zweiten Übung verfehlt die senkrecht zur Bewegungsrichtung gestoßene Kugel das Tor (Bild 4.3).



4.3 Stroboskopbild für Übung 2

Woran liegt das? Der Grund ist, dass die Kugel nach dem Stoß in einem gewissen Sinn zwei Bewegungen gleichzeitig ausführt: die Bewegung in der Anfangsrichtung wird beibehalten, zusätzlich wird eine Bewegung in der Stoßrichtung ausgeführt. Betrachten wir dies genauer: Die Geschwindigkeit vor dem Stoß nennen wir die Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  (blauer Pfeil), die Geschwindigkeit nach dem Stoß nennen wir die Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$  (oranjer Pfeil) (Bild 4.4).



4.4 Aufangs- und Endgeschwindigkeit der Kugel

## 4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit

Du kannst du dir so vorstellen: Der Wagen bewegt sich auf dem Hang mit  $v_A$  weiter nach rechts und gleichzeitig erhält dieser eine Beschleunigung  $a$  ebenfalls nach rechts. Die beobachtete Endgeschwindigkeit  $v_E$  ist aus  $v_A$ , der Beschleunigung  $a$  und der vergangenen Zeit  $t$  zusammengesetzt.

Durch eine **Einwirkung** erhält der Körper eine **Beschleunigung**. Der Begriff Beschleunigung beschreibt in der Physik, wie sich die Geschwindigkeit eines Gegenstands über die Zeit verändert. Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Beschleunigung sind gleich.

Um die Beschleunigung besser verstehen zu können, benötigen wir zuvor den Begriff der Geschwindigkeitsänderung:

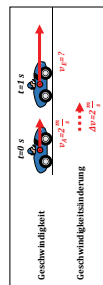
Die **Geschwindigkeitsänderung**  $\Delta v$  gibt an, wie sich die Geschwindigkeit eines Körpers ändert. Die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  wird durch einen Pfeil dargestellt. Der Pfeil von  $\Delta v$  zeigt von der Pfeilspitze von  $v_A$  zur Pfeilspitze von  $v_E$ . Die Geschwindigkeitsänderung wird in einer neuen Zeile unter dem Stroboskopbild eingezeichnet. Der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung wird dabei immer mittig zwischen die beiden betrachteten Zeitpunkte gezeichnet. Mit der neuen Zeile der Geschwindigkeitsänderung sprechen wir jetzt von einer **Stroboskoptafel** (ST).

**Konstruktion:**  
a) Der Wagen hat eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$ .

b) Durch die Einwirkung erhält der Wagen zur Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  eine bestimmte Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .

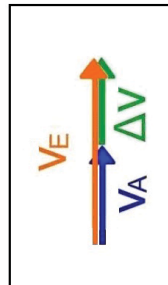
c) Zur Zusammensetzung von  $v_A$  und  $\Delta v$  hängt du  $\Delta v$  an die Pfeilspitze von  $v_A$ .

d) Verbindest du den Pfeilfuß von  $v_A$  mit der Pfeilspitze von  $\Delta v$ , so erhältst du den Pfeil der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .



4.6 Anfangsgeschwindigkeits- und Geschwindigkeitsänderungspfeil sind gegeben. Der Pfeil der Endgeschwindigkeit ist gesucht.

Die Zusammensetzung von  $v_A$  und  $\Delta v$  kannst du mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.7).



4.7 Konstruktion des Pfeils von  $v_E$

**Konstruktion:**

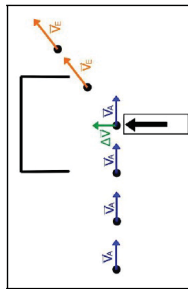
a) Der Wagen hat eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$ .

b) Durch die Einwirkung erhält der Wagen zur Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  eine bestimmte Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .

c) Zur Zusammensetzung von  $v_A$  und  $\Delta v$  hängt du  $\Delta v$  an die Pfeilspitze von  $v_A$ .

d) Verbindest du den Pfeilfuß von  $v_A$  mit der Pfeilspitze von  $\Delta v$ , so erhältst du den Pfeil der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .

Was ist beim Stoß passiert? Durch den Stoß erhält die Kugel eine **Zusatzgeschwindigkeit**  $\Delta \vec{v}$ . Der **Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit**  $\Delta \vec{v}$  zeigt in die gleiche Richtung wie der Stoß (Bild 4.5).



4.5 Die Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  zeigt in Stoßrichtung

Du kannst dir das so vorstellen: Die Kugel bewegt sich nach dem Stoß mit  $v_A$  weiter nach rechts und gleichzeitig zusätzlich mit der Geschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  auf das Tor zu. Die beobachtete Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$  ist aus  $\vec{v}_A$  und  $\Delta \vec{v}$  zusammengesetzt und zeigt schräg rechts am Tor vorbei.

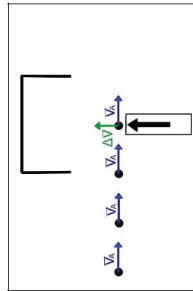
Durch eine **Einwirkung** erhält ein Körper eine **Zusatzgeschwindigkeit**  $\Delta \vec{v}$ . Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich. Die Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  wird durch einen Pfeil dargestellt. Der Pfeil von  $\Delta \vec{v}$  zeigt von der Pfeilspitze von  $\vec{v}_A$  zur Pfeilspitze von  $\vec{v}_E$ .

**Konstruktionstipp:** Wenn du einen der Geschwindigkeitspfeile konstruierst, dann kannst du die vorgegebenen Geschwindigkeitspfeile beliebig verschieben. Beachte, dass du dabei die Richtung und die Länge der Pfeile nicht veränderst.

Wie du die drei Geschwindigkeitspfeile richtig verknüpfst, wird im folgenden Abschnitt erklärt.

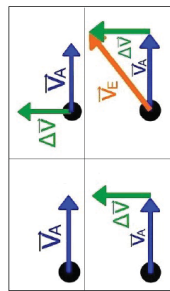
## 4.2 Konstruktion der Endgeschwindigkeit

Ausgangssituation: Manchmal kannst du die Anfangs- und die Zusatzgeschwindigkeit (wie in Bild 4.6) und höchstens die Endgeschwindigkeit konstruieren.



4.6 Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit sind gegeben. Der Pfeil der Endgeschwindigkeit ist gesucht.

Die Zusammensetzung von  $\vec{v}_A$  und  $\Delta \vec{v}$  kannst du mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.7).



4.7 Konstruktion des Pfeils von  $\vec{v}_E$

**Konstruktion:**

a) Die Kugel hat eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$ .

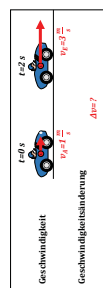
b) Durch den Stoß erhält die Kugel zur Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  eine bestimmte Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$ , die in Richtung des Stoßes zeigt.

c) Zur Zusammensetzung von  $\vec{v}_A$  und  $\Delta \vec{v}$  hängt du  $\Delta \vec{v}$  an die Pfeilspitze von  $\vec{v}_A$ .

d) Verbindest du den Pfeilfuß von  $\vec{v}_A$  mit der Pfeilspitze von  $\Delta \vec{v}$ , so erhältst du den Pfeil der Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$ .

#### 4.3 Konstruktion der Geschwindigkeitsänderung

Ausgangssituation: Manchmal kannst du die Anfangs- und die Endgeschwindigkeit, (wie in Bild 4.8) und möchtest die Geschwindigkeitsänderung konstruieren.



4.8 Anfangs- und Endgeschwindigkeitspfeile sind gegeben. Der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung wird gesucht.

Die Bestimmung von  $\Delta v$  aus  $v_A$  und  $v_E$  kannst du wieder mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.9):



4.9 Konstruktion des Pfeils von  $\Delta v$

**Konstruktion:**

- Der Wagen hat eine bestimmte Geschwindigkeit  $v_A$ .
- Gesucht ist der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .
- Der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  wird an die Pfeilspitze von  $v_A$  gehängt und muss auf die Pfeilspitze von  $v_E$  zeigen.

#### 4.4 Geschwindigkeitsänderung aus der gleichmäßigen Beschleunigung

Du hast jetzt schon gelernt, wie du die Geschwindigkeitspfeile richtig verknüpfst um so zum Beispiel die Endgeschwindigkeit oder die Geschwindigkeitsänderung herauszufinden. Wie du jetzt von der Geschwindigkeitsänderung und der Zeit auf die Beschleunigung schließen kannst, wird in diesen Kapiteln behandelt.

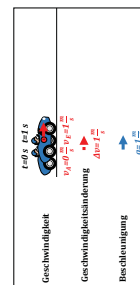
Die Beschleunigung  $a$  wird ebenfalls in einer neuen Zeile mittig unter dem Stroboskopbild zwischen den beiden betrachteten Zeitpunkten eingezeichnet. Wir verwenden außerdem für die Beschleunigung eine andere Farbe, um sie nicht mit der Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsänderung zu verwechseln. Die Beschleunigung ist nämlich eine eigene Größe mit einer eigenen Einheit  $\frac{m}{s^2}$ .

Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsänderung, der Beschleunigung und der Zeit ist dabei folgender:

$$\Delta v = a \cdot \Delta t$$

Je länger es eine Beschleunigung gibt, desto größer ist die Geschwindigkeitsänderung.

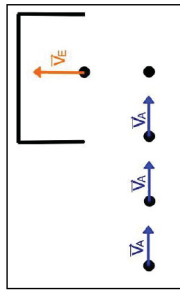
Betrachte das Bild 4.10. Du kannst dem Stroboskopbild entnehmen, welche Geschwindigkeitsänderung die vorliegende Beschleunigung nach einer vergangenen Zeit von  $t = 1 \text{ s}$  bewirkt hat. Betrachten wir nun die **gleiche Beschleunigung** über verschiedene Zeiten  $\Delta t$ , können wir dadurch auf die Geschwindigkeitsänderung schließen.



4.10 Stroboskopabbildung mit Beschleunigungspfeil

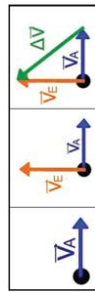
#### 4.3 Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit

Ausgangssituation: Manchmal kannst du die Anfangs- und die Endgeschwindigkeit, (wie in Bild 4.8) und möchtest die Zusatzgeschwindigkeit konstruieren.



4.8 Anfangs- und Endgeschwindigkeitspfeile sind gegeben. Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit ist gesucht.

Die Bestimmung von  $\Delta v$  aus  $v_A$  und  $v_E$  kannst du wieder mit den Geschwindigkeitspfeilen nachvollziehen (Bild 4.9):



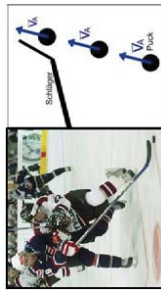
4.9 Konstruktion des Pfeils von  $\Delta v$

**Konstruktion:**

- Die Kugel hat eine bestimmte Geschwindigkeit  $v_A$ .
- Nach dem Stoß zeigt der Geschwindigkeitspfeil  $v_E$  direkt nach oben. Gesucht ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$ .
- Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  wird an die Pfeilspitze von  $v_A$  gehängt und muss auf die Pfeilspitze von  $v_E$  zeigen.

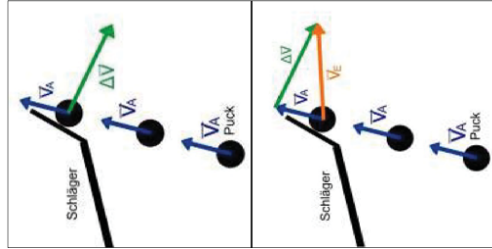
#### Beispiele

a) Eishockey



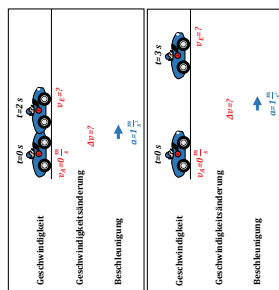
4.10 Eishockeyspieler

Ein Eishockeyspieler versetzt mit dem Schläger den Puck einen Stoß und der Puck erhält damit eine Zusatzgeschwindigkeit (Bild 4.10). Bei bekannter Anfangsgeschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit, lässt sich der Pfeil der Endgeschwindigkeit konstruieren (Bild 4.11):



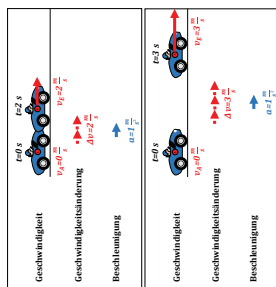
4.11 Konstruktion von  $v_E$

In Bild 4.11 sind die jeweils Geschwindigkeitsänderung und die Endgeschwindigkeit nach zwei und nach drei Sekunden gesucht. Die Beschleunigung ist die gleiche, wie in Bild 4.10.



4.11 Stroboskopabbildungen mit der gleichen Beschleunigung wie 4.10

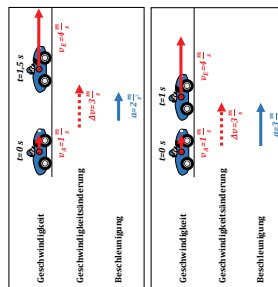
In Bild 4.12 sind die vollständigen Stroboskopabbildungen mit allen Pfeilen abgebildet. Wir erhalten bei gleichbleibender Beschleunigung im ersten Bild in der doppelten Zeit auch die doppelte Geschwindigkeitsänderung und im zweiten Bild in der dreifachen Zeit auch die dreifache Geschwindigkeitsänderung. Damit du das besser erkennen kannst, haben wir den Geschwindigkeitspfeil aus Bild 4.10 zweimal hintereinander gezeichnet. Mit der Geschwindigkeitsänderung können wir schließlich auch wieder die Endgeschwindigkeit konstruieren.



4.12 Stroboskopabbildungen zu Bild 4.11

#### 4.5 Beschleunigung vergleichen

Betrachte die Stroboskopabbildungen in Bild 4.13. In beiden Stroboskopabbildungen ist die gleiche Geschwindigkeitsänderung für unterschiedliche Zeiträume eingezeichnet. Der Wagen hat daher unterschiedliche Beschleunigungen.

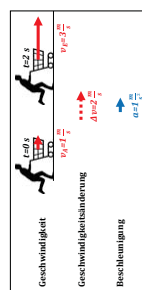


4.13 Stroboskopabbildungen

Für die gleiche Geschwindigkeitsänderung wird im ersten Bild eine Zeit von  $t = 1.5 \text{ s}$  und im zweiten Bild eine Zeit von  $t = 1 \text{ s}$  benötigt. Daraus können wir schließen, dass die Beschleunigung im zweiten Bild größer sein muss, da hier für die gleiche Geschwindigkeitsänderung weniger Zeit benötigt wird.

**Beispiele**

a) *Beschleunigung in Richtung der Anfangsgeschwindigkeit*  
Du schiebst einen bereits rollenden Einkaufswagen in Bewegungsrichtung gleichmäßig an. Die Bewegungsrichtung des Wagens ändert sich dabei nicht. Allerdings ist die Geschwindigkeit des Einkaufswagens später größer als vorher (Bild 4.14).



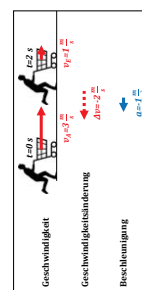
4.14 Erhöhung der Geschwindigkeit

Ein weiteres Beispiel für diese Situation ist, wenn du mit deinem Fahrrad fährst und schon etwas schlapp bist. Dein Freund möchte dir helfen und schiebt dich während der Fahrt von hinten an. Du fährst dabei in die gleiche Richtung weiter, allerdings mit einer größeren Geschwindigkeit.

b) *Beschleunigung entgegengesetzt zur Richtung der Anfangsgeschwindigkeit*

1) *Bremsen*

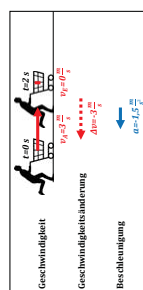
Jetzt betrachten wir in Bild 4.15 die Situation, dass der Wagen sich zwar mit einer Anfangsgeschwindigkeit bewegt, dieser jetzt aber durch Ziehen an dem Wagen abgebremst wird.



4.15 Bremsen

2) *Stoppen*

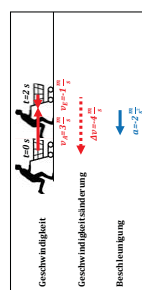
Jetzt betrachten wir in Bild 4.16 die Situation, dass der Wagen gestoppt wird, weil du stärker ziehst. Der Pfeil der Endgeschwindigkeit hat hier die Länge 0, da sich beide Bewegungen ausgleichen. Dann wird die Bewegung gestoppt.



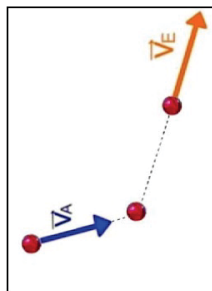
4.16 Stoppen

3) *Bewegung umkehren*

Bei der letzten Situation in Bild 4.17 ziehst du nochmal stärker an dem Wagen, so dass du den Einkaufswagen schließlich hinter dir herziehst. Dann war die Beschleunigung so groß, dass die Endgeschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung der Anfangsgeschwindigkeit gerichtet ist. Das kannst du dir so vorstellen: Durch die Beschleunigung wird der Wagen im ersten Schritt in Gegenrichtung zur ursprünglichen Bewegung zur Ruhe gebracht. In einem zweiten Schritt wird er anschließend weiter in die Gegenrichtung beschleunigt.

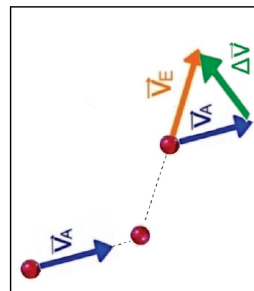
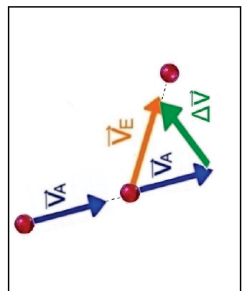


4.17 Bewegung umkehren

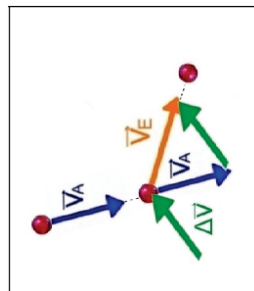
b) *Marmelade*

4.12 Geschwindigkeiten beim Marmeladenspiel

Welche Zusatzgeschwindigkeit hat die rote Marmelade in Bild 4.12 an der markierten Stelle erhalten? Um die Zusatzgeschwindigkeit für die Marmelade zu ermitteln, werden die gegebenen Pfeile  $\vec{v}_A$  und  $\vec{v}_E$  verschoben und der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  durch die Verbindung der Pfeilspitzen von  $\vec{v}_A$  und  $\vec{v}_E$  eingezeichnet. Dabei kommt es nicht darauf an, an welcher Stelle im Bild du die Konstruktion auftriffst. Die Richtung und die Länge der Zusatzgeschwindigkeit, die du erhältst, sind jeweils gleich. (Bild 4.13, Bild 4.14).

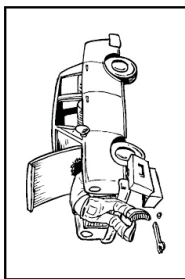
4.13 Konstruktion von  $\Delta\vec{v}$ ; der Vektor  $\vec{v}_A$  wird verschoben4.14 Konstruktion von  $\Delta\vec{v}$ ; der Vektor  $\vec{v}_A$  und  $\vec{v}_E$  werden verschoben

Da die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit und die Richtung der Einwirkung gleich sind, weißt du nun auch in welche Richtung auf die Marmelade eingewirkt wurde. (Bild 4.15)

4.15 Die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta\vec{v}$  ist die Richtung, in die die Marmelade gestoßen wurde

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Aufgaben</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Überlege dir <math>v_A</math>, <math>v_E</math> und <math>a</math> beim Eilfmerschießen.</li> <li>Beschreibe eine Bewegung für die gilt:             <ol style="list-style-type: none"> <li><math>v_A = 0</math>, <math>a</math> und <math>v_E \neq 0</math></li> <li><math>v_E = 0</math>, <math>a</math> und <math>v_A \neq 0</math></li> <li><math>a = 0</math>, <math>v_A</math> und <math>v_E \neq 0</math></li> </ol> </li> <li>Kim schwimmt mit konstanter Geschwindigkeit auf eine Duse im Schwimmbad zu. Durch die Duse erhält sie eine Beschleunigung. Zeichne eine Stroboskoptablette, aus der die Bewegung deutlich wird, und stelle die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren dar. (Tipp: Betrachte Bild 4.16)</li> <li>Diskutiere mit deinem Mitschüler folgende Behauptungen:<br/>Hamah sagt: „Der Pfeil der Beschleunigung und der Pfeil der Endgeschwindigkeit zeigen bei allen Bewegungen immer in die gleiche Richtung.“<br/>Leonie sagt: „Der Pfeil der Endgeschwindigkeit kann nie länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit.“<br/>Asche sagt: „Um eine Bewegung umzukehren muss der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit, damit der Körper die Richtung ändert.“</li> <li>Ein Fallschirmspringer zieht die Reißleine von seinem Fallschirm. Dadurch wird der Fallschirmspringer abgebremst (negativ beschleunigt). Zeichne für diese Situation eine mögliche Stroboskoptablette mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren.</li> <li>Kevin fährt mit seinem Skateboard eine Rampe hinunter. Dabei beschleunigt er. Zeichne für diese Situation eine mögliche Stroboskoptablette mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren.</li> <li>Tinas Hobby ist Segeln. Auf dem Gardasee fährt er mit seinem Boot bei einer guten Brise schön dahin. Das Boot wird dabei durch den Wind im Segel beschleunigt. Zeichne für diese Situation eine mögliche Stroboskoptablette mit Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren.</li> </ol> | <p><b>Aufgaben</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Überlege dir <math>\vec{v}_A</math>, <math>\vec{v}_E</math> und <math>\Delta \vec{v}</math> beim Eilfmerschießen und beschreibe jeweils das Tempo.</li> <li>Beschreibe eine Bewegung für die gilt:             <ol style="list-style-type: none"> <li><math>v_A = 0</math>, <math>\Delta v</math> und <math>v_E \neq 0</math></li> <li><math>v_E = 0</math>, <math>\Delta v</math> und <math>v_A \neq 0</math></li> <li><math>\Delta v = 0</math>, <math>v_A</math> und <math>v_E \neq 0</math></li> </ol> </li> <li>Kim schwimmt mit konstantem Tempo an einer Duse im Schwimmbad vorbei. Durch die Duse erhält sie eine Zusatzgeschwindigkeit. Zeichne drei Bilder, aus denen die Bewegung deutlich wird und stelle die drei Geschwindigkeitsvektoren <math>\vec{v}_A</math>, <math>\Delta \vec{v}</math> und <math>\vec{v}_E</math> dar. (Tipp: Betrachte Bild 4.15)</li> <li>Diskutiere mit deinen Mitschülern folgende Behauptungen:<br/>Hamah sagt: „Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit und der Pfeil der Endgeschwindigkeit zeigen bei allen Bewegungen immer in die gleiche Richtung.“<br/>Leonie sagt: „Der Pfeil der Endgeschwindigkeit kann nie länger sein als der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit.“<br/>Asche sagt: „Beim Tennis muss der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit, damit der Ball zum Gegner zurückfliegt.“</li> <li>Dein Freund spielt dir einen ziemlich schwachen Ball zu. Du nimmst die Gelegenheit wahr und schmettest den Ball ins andere Eck der Tischtennisplatte zurück. Zeichne für diese Situation eine mögliche Anordnung der Pfeile von <math>\Delta \vec{v}</math>, <math>\vec{v}_A</math> und <math>\vec{v}_E</math>.</li> <li>Kevin spielt gern Flipper. Er trifft die Kugel ziemlich gut, klappt sie damit zurück in den Flipperkasten und bekommt eine Menge Punkte. Zeichne eine Situation ins Heft, in der Kevin die Kugel trifft und diese wieder zurück in den Kasten fliegt. Zeichne eine mögliche Anordnung der Pfeile von <math>\vec{v}_A</math>, <math>\Delta \vec{v}</math> und <math>\vec{v}_E</math> ein.</li> <li>Tinas Hobby ist Surfen. Auf dem Gardasee fährt er mit seinem Surfbrett bei leichter Brise schön gemächlich dahin. Plötzlich kommt eine starke Windböe. Tinas Tempo wird größer und es treibt ihn ein Stück von seinem Kurs ab. Skizziere das Surfbrett in deinem Heft und zeichne eine mögliche Anordnung der Pfeile von <math>\vec{v}_A</math>, <math>\Delta \vec{v}</math> und <math>\vec{v}_E</math> ein.</li> </ol> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## 5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung



5.1 Autopaune

Euer Lehrer ist mit seinem Auto liegegebunden (Bild 5.1). Um sein Auto zur nächsten Werkstatt zu schieben, bittet er euch um Hilfe. Wenn du von hinten gegen das Auto drückst, ändertst du dadurch die Bewegung des Autos, denn durch das Schieben hat das Auto eine Beschleunigung.

Ihr wisst auch, dass die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Beschleunigung gleich sind. Jetzt fragen wir uns, was es für einen Zusammenhang zwischen der Stärke mit der geschoben wird und der Beschleunigung gibt.

### 5.1 Kraft und Beschleunigung

**V1:** Versuche alleine das Auto auszuschieben. Drücke dabei unterschiedlich stark gegen das Auto. Versuche jeweils eine Aussage über die Beschleunigung zu machen.

**V2:** Schiebt jetzt zu zweit oder mit mehreren gleichzeitig an. Kannst du wieder eine Aussage über die Beschleunigung machen?

**Beobachtung:** Bei einer stärkeren Einwirkung ist die Beschleunigung größer.

**Das gilt ganz allgemein:**

Je größer die Einwirkungsstärke auf einen Gegenstand ist, desto größer ist die Beschleunigung, die der Gegenstand erhält. Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke ist der Pfeil der Beschleunigung länger.

Nun müssen wir den Begriff der Einwirkung noch präziser festlegen: Eine Einwirkung ist gekennzeichnet durch ihre Stärke und ihre Richtung. Die Stärke und Richtung kann man mit einem Begriff bezeichnen:

In der Physik werden die „Einwirkungsstärke“ und die „Einwirkungsrichtung“ zusammengefasst, dafür verwendet man den Begriff **Kraft** (Symbol  $F$ , vom englischen Wort *force*). Diese Kraft kann analog zum Geschwindigkeitspfeil als **Kraftpfeil** dargestellt werden:

$$\text{Kraftpfeil} = \begin{cases} \text{Einwirkungsstärke} \\ \text{Einwirkungsrichtung} \end{cases}$$

Damit können wir formulieren:

Je größer die Einwirkungsstärke einer **Kraft** ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist die Beschleunigung  $a$ , die der Körper erhält.

Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke einer Kraft ist der Pfeil der Beschleunigung länger.

In der Computersimulation *Phet: Kräfte und Bewegungen: Grundlagen* wird dies veranschaulicht: Lassen wir aus dem Stand heraus auf den Wagen mit der Kiste eine doppelt so starke Kraft ausüben, wird die Geschwindigkeit doppelt so groß (Bild 5.2).

## 5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung



5.1 Franziska wirkt mit ihrem Schläger auf den Tischtennisball ein.

Franziska übt Tischtennis (Bild 5.1), aber oft fliegt der Ball ganz anders als geplant. Franziska überlegt: Wenn sie mit dem Tischtennisschläger den Ball trifft, ändert sie durch diese Einwirkung seine Bewegung, denn die Einwirkung führt zur Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  des Balls eine Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  hinzu, so ergibt sich die Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$  des Balls. Franziska weiß auch, dass die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit gleich sind. Damit es ihr gelingt die Platte zu treffen, muss ein bestimmter Zusammenhang zwischen Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit bestehen.

### 5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

**V1:** Lass dir einen Tischtennis-Ball zuwerfen. Schlage unterschiedlich stark gegen den Ball. Versuche jeweils eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit zu machen.

**V2:** Stöße zwei Mal gegen eine rollende Kugel. Versuche, beim zweiten Mal ungefähr doppelt so stark zu stoßen. Kannst du wieder eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit machen?

**Beobachtung:** Bei einer stärkeren Einwirkung ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit größer.

**Allgemein gilt:** Je größer die Einwirkungsstärke auf einen Gegenstand ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Gegenstand erhält.

Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

Nun müssen wir den Begriff der Einwirkung noch präziser festlegen: Eine Einwirkung ist gekennzeichnet durch ihre Stärke und ihre Richtung. So wie man Tempo und Richtung mit dem Begriff Geschwindigkeit zusammenfasst, kann man auch die Stärke und die Richtung einer Einwirkung mit einem Begriff bezeichnen:

In der Physik werden die „Einwirkungsstärke“ und die „Einwirkungsrichtung“ zusammengefasst, dafür verwendet man den Begriff **Kraft** (Symbol  $F$ , vom englischen Wort *force*).

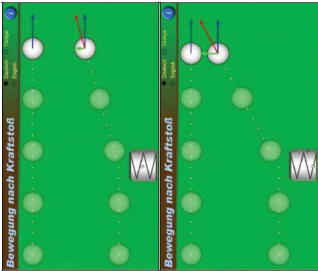
$$\text{Kraft } \vec{F} = \begin{cases} \text{Einwirkungsstärke} \\ \text{Einwirkungsrichtung} \end{cases}$$

Damit können wir formulieren:

Je größer die Einwirkungsstärke einer **Kraft** ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$ , die der Körper erhält.

Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke einer Kraft ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

In der Computersimulation „Bewegung nach Kraftstoß“ wird dies veranschaulicht: Lassen wir eine gespannte Feder mit doppelter Kraft gegen eine Kugel schlagen, wird das Tempo von  $\Delta \vec{v}$  doppelt so groß (Bild 5.2).

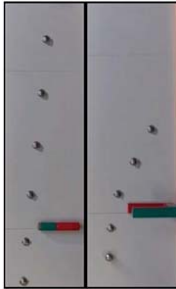


5.2 Unterschiedliche Kräfte bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüner Pfeil).

**Beispiele**

a) *Magnet*

Eine Kugel rollt an einem schwachen Magneten vorbei (Bild 5.3). Dabei ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit kleiner, als wenn sie an einem starken Magneten vorbeifliegt.



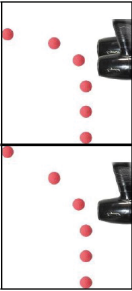
5.3 Eine Kugel rollt an einem schwachen Magneten (oben) und an einem starken Magneten (unten) vorbei.

b) *Formel 1*

Je stärker ein Formel 1-Fahrer auf das Gaspedal tritt, desto größer ist auch das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die das Auto in jeder Sekunde erhält. Dadurch wird die Endgeschwindigkeit des Rennautos größer. Es spielt aber auch eine Rolle, wie lange der Fahrer auf das Gaspedal tritt.

**5.2 Einwirkungs- und Zusatzgeschwindigkeit**

V3: Führe wieder einen Versuch mit Kugeln durch. Dieses Mal sollst du aber nicht gegen die Kugel stoßen, sondern sie mit einem Gebläse ablenken (Bild 5.4). Verwende dabei zunächst einen Föhn, und dann zwei gleiche Föhne nebeneinander, um die Einwirkungs- und die Zusatzgeschwindigkeit zu erhöhen.



5.4 Eine Kugel wird durch den Luftstrom eines Föhns (links) bzw. zwei nebeneinander liegende Föhne (rechts) abgelenkt.

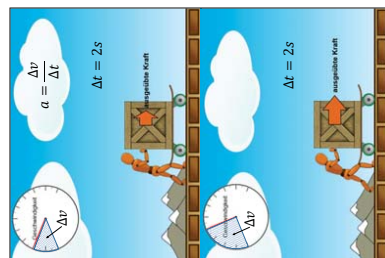
**Beobachtung:** Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird umso größer, je länger der Luftstrom der Föhne auf die Kugel einwirkt.

**Allgemein gilt:**

Je länger die **Einwirkungs- und Zusatzgeschwindigkeit** einer Kraft ist, die auf einen Gegenstand ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$ , die der Körper erhält.

Auch dieser Zusammenhang kann durch die Simulation „Bewegung nach Kraftstoß“ veranschaulicht werden. Anstelle der Feder bewirkt hier ein Ventilator eine Kraft auf die Kugel. Der Ventilator kann durch seine unterschiedliche Breite unterschiedlich lange auf die Kugel einwirken. Damit wird das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit unterschiedlich groß (Bild 5.5).

Eine kleine Kraft, die über einen langen Zeitraum ausgeübt wird, kann die gleiche Zusatzgeschwindigkeit zur Folge haben wie eine große Kraft, die nur einen kurzen Moment lang wirkt.

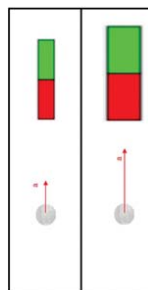


5.2 Unterschiedliche Kräfte bewirken in der gleichen Zeit unterschiedliche Beschleunigungen.

#### Beispiele

##### a) Magnet

Eine Kugel rollt auf einen schwachen Magneten zu (Bild 5.3). Dabei ist die Beschleunigung schwächer, als wenn sie auf einen starken Magneten zurollt.



5.3 Eine Kugel rollt auf einen schwachen Magneten (oben) und auf einen starken Magneten (unten) zu.

##### b) Formel 1

Je stärker ein Formel 1-Fahrer auf das Gaspedal tritt, desto stärker ist auch die Beschleunigung, die das Auto erhält. Dadurch wird die Endgeschwindigkeit des Rennautos immer größer. Es spielt natürlich auch eine Rolle, wie lange der Fahrer das Gaspedal tritt, da sonst die Beschleunigung endet.

### 5.2 Masse und Beschleunigung

V3: Versuche etwa gleichstark einen leichten und dann eine schweren Einkaufswagen anzuschieben.

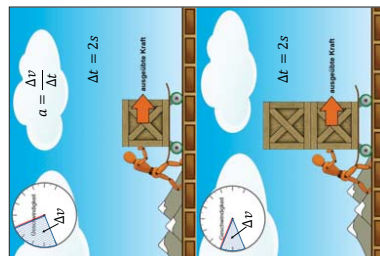
V4: Wiederhole den Versuch 1. Dabei sitzen jetzt aber zusätzlich der Lehrer und mehrere Mitschüler im Auto.

**Beobachtung:** Die Beschleunigung ist umso größer, je leichter der Gegenstand ist. Bei einem „massigeren“, schwereren Gegenstand ist bei gleichstarker Kraft die Beschleunigung schwächer. Diese Eigenschaft des Körpers nennt man **Masse** (Symbol  $m$ ). Man gibt sie in der Einheit 1 kg an.

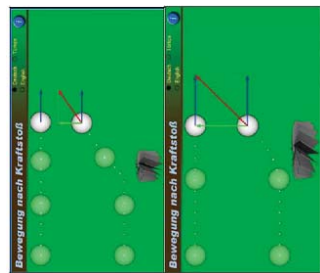
**Allgemein gilt:**

Je größer die **Masse** eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto schwächer ist die Beschleunigung  $a$ , die der Körper erhält.

Das kannst du auch wieder in der Simulation beobachten (Bild 5.4).



5.4 Unterschiedliche Massen bewirken bei gleicher Kraft und Zeit unterschiedliche Beschleunigungen.



5.5 Unterschiedliche Einwirkungsauern bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüne Pfeile).

#### Beispiele

##### a) Seitenwind

Beim Skispringen beeinflusst der Seitenwind den Sprung der Sportler. Wenn nur ein kurzer Windstoß kommt, ist die Zusatzgeschwindigkeit in Windrichtung klein. Durch einen dauerhaften Seitenwind mit gleicher Stärke wie der kurze Windstoß erhält der Skispringer eine große Zusatzgeschwindigkeit in Windrichtung.

##### b) Formel 1

Wie du gerade erkannt hast, spielt die Dauer der Einwirkung eine wichtige Rolle: Wenn der Formel 1-Fahrer 5 s lang mit Volles anfährt, und sein Teamkollege mit dem gleichen Rennwagen 10 s mit Volles anfährt, dann ist das Tempo der Endgeschwindigkeit, welche der Wagen des Teamkollegen erreicht, deutlich größer. Daher muss auch das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit dieses Wagens deutlich größer sein.

### 5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit

V4: Tritt etwa gleichstark (aber vorsichtig!) gegen einen Fußball und dann gegen einen Medizinball.

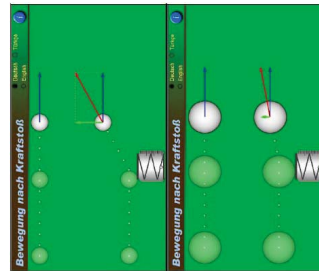
V5: Wiederhole den „Kugelstoßversuch“ (V2) mit unterschiedlich schweren Kugeln. Achte darauf, immer etwa gleich zu stoßen.

**Beobachtung:** Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird umso größer, je leichter die Kugel ist. Bei einem „massigeren“ schwereren Gegenstand ist bei gleichstarker Einwirkung die Zusatzgeschwindigkeit kleiner. Diese Eigenschaft des Körpers nennt man **Masse** (Symbol  $m$ ). Man gibt sie in der Einheit 1 kg an.

**Allgemein gilt:**

Je größer die **Masse** eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$ , die der Körper erhält.

Das kannst du auch wieder in der Simulation beobachten (Bild 5.6).



5.6 Unterschiedliche Massen bewirken unterschiedliche Zusatzgeschwindigkeiten (grüne Pfeile).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Beispiel</b><br/><i>PKW vs. LKW</i></p> <p>Ein PKW kommt wesentlich schneller auf hohe Geschwindigkeit als ein LKW mit größerer Masse. Das liegt daran, dass die Beschleunigung beim leichten PKW viel größer ist als beim schweren LKW.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p>Die Maßeinheit für die Kraft heißt Newton (N). Diese Einheit kann mit Hilfe der Einheiten der Masse <math>m</math> (Kilogramm kg) und der Beschleunigung <math>a</math> (Meter pro Sekunde zum Quadrat (<math>\text{m/s}^2</math>)) ausgedrückt werden:</p> $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$ <p>Also gilt:</p> $1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p><b>5.3 Die Newton'sche Bewegungsgleichung</b></p> <p>Du hast jetzt alle Einflussfaktoren kennengelernt, welche die Beschleunigung bestimmen. Im Einzelnen weißt du, dass die Masse eine Rolle spielen. Weitere Einflussfaktoren gibt es nicht. Beide Einflussfaktoren werden in der <b>Newton'schen Bewegungsgleichung</b> (abgekürzt NBG) zusammengefasst:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | <p><b>Aufgaben</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① Gib Beispiele aus dem Alltag für die Aussagen der Newton'schen Bewegungsgleichung an.</li> <li>② Diskutiere den Einfluss der Einwirkungsdauer auf die Zusatzgeschwindigkeit.</li> <li>③ Diskutiere den Einfluss der Masse auf die Zusatzgeschwindigkeit.</li> <li>④ Erkläre, was eine Kraft ist. Gib Beispiele aus dem Alltag an.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <p><math display="block">F = m \cdot a</math></p> <p>Sir Isaac Newton hat als erster diese Grundgleichung der Mechanik formuliert. Deswegen wurde sie nach ihm benannt.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <p><b>5.4 Die Newton'sche Bewegungsgleichung</b></p> <p>Du hast jetzt alle Einflussfaktoren kennen gelernt, welche die Zusatzgeschwindigkeit bestimmen. Im Einzelnen weißt du, dass die Kraft (Richtung und Stärke der Einwirkung), die Zeitdauer und die Masse eine Rolle spielen. Weitere Einflussfaktoren gibt es nicht. Alle Einflussfaktoren werden in der <b>Newton'schen Bewegungsgleichung</b> (abgekürzt NBG) zusammengefasst:</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p><math display="block">F = m \cdot a</math></p> <p>Sir Isaac Newton hat als erster diese Grundgleichung der Mechanik formuliert. Deswegen wurde sie nach ihm benannt.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <p><math display="block">\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}</math></p> <p>Sir Isaac Newton hat als erster diese Grundgleichung der Mechanik formuliert. Deswegen wurde sie nach ihm benannt.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <p>Die Newton'sche Bewegungsgleichung <math>F = m \cdot a</math> sagt aus:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wenn auf einen Körper eine Kraft <math>F</math> ausgeübt wird, erhält dieser eine Beschleunigung <math>a</math> (d.h. die Geschwindigkeit des Körpers ändert sich).</li> <li>2. Kraft und Beschleunigung haben jeweils die gleiche Richtung.</li> <li>3. Je größer die Einwirkungsstärke der Kraft <math>F</math> ist, desto größer ist die Beschleunigung <math>a</math> (bei jeweils gleicher Masse).</li> <li>4. Je größer die Masse <math>m</math> des Körpers ist, desto schwächer ist die Beschleunigung <math>a</math> (bei jeweils gleicher Kraft).</li> </ol> | <p>Die Newton'sche Bewegungsgleichung <math>\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}</math> sagt aus:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Wenn auf einen Körper eine Kraft <math>\vec{F}</math> ausgeübt wird, erhält dieser eine Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math> (d.h. die Geschwindigkeit des Körpers ändert sich).</li> <li>2. Die Richtung der Kraft und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich.</li> <li>3. Je größer die Einwirkungsstärke der Kraft <math>\vec{F}</math> ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math> (bei jeweils gleicher Einwirkungsdauer und Masse).</li> <li>4. Je länger die Einwirkungsdauer <math>\Delta t</math> ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math> (bei jeweils gleicher Kraft und Masse).</li> <li>5. Je größer die Masse <math>m</math> des Körpers ist, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math> (bei jeweils gleicher Kraft und Einwirkungsdauer).</li> </ol> |

## 6. Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung

### 6.1 Alltagsanwendungen

Im letzten Kapitel hast du die Newton'sche Bewegungsgleichung (NBG) kennen gelernt.

Sie lautet:  $F = m \cdot a$

Du hast auch schon gelernt, dass du mit dieser Gleichung viele Vorgänge in deinem Alltag erklären kannst.

#### a) Fausten oder Stoppen?

Beim Elfmeterschießen erreicht ein Fußball eine Geschwindigkeit von 120 km/h. Soll der Torhüter den Ball halten oder zurückfausten, um sein Verletzungsrisiko zu minimieren? (Bild 6.1)

Diese Frage kannst du mit der NBG beantworten. Wir nehmen dabei an, dass die Zeit für das Halten und das Zurückfausten gleich ist. Die Masse des Fußballs verändert sich auch nicht. Um herauszufinden welche Kraft der Torhüter auf den Ball ausüben muss, überlegen wir uns, welche Beschleunigung der Ball in den zwei Situationen erhält:



6.1 Was soll der Torwart tun?

Die Anfangsgeschwindigkeit ist in beiden Situationen gleich. Überlege dir mit den Pfeilbildern:

Beim Halten ist der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt und genauso lang.

Beim Zurückfausten ist der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung wieder dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt, aber länger.

Dementsprechend ist im ersten Fall die Beschleunigung kleiner und damit auch die Kraft, die der Torhüter auf den Ball ausübt, kleiner. Das Verletzungsrisiko ist im ersten Fall am geringsten.

#### b) Auffahrunfall eines Autos

Vergleichen wir die Auswirkungen zweier Unfälle: Ein Auto fährt mit 40 km/h gegen eine Betonwand, ein Auto gleichen Typs fährt mit gleicher Geschwindigkeit in einen Drahtzaun. Beide Autos kommen dadurch zum Stillstand. Gefühlsmäßig erwarten wir, dass die Kräfte auf die Autos und ihre Fahrer unterschiedlich sein werden, obwohl Anfangs- und Endgeschwindigkeit in beiden Fällen gleich sind.

Unsere Erwartung trifft tatsächlich zu, denn es gibt einen wichtigen Unterschied: die vergangene Zeit  $\Delta t$  für das Abbremsen durch die Wand bzw. durch den Zaun. Das Abbremsen durch den Drahtzaun dauert ca. 10-mal so lange wie das Abbremsen durch die Betonmauer. Dann ist die durchschnittliche Kraft, die der Zaun ausübt 10-mal kleiner als die durchschnittliche Kraft die die Mauer ausübt. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus der Newton'schen Bewegungsgleichung. Beide Autos erfahren jeweils die gleiche Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ . Für den Fall, dass  $\Delta t$  10-mal größer ist, muss die Beschleunigung  $a$  damit 10-mal kleiner sein. Damit ergibt sich aus dem Produkt  $m \cdot a$  auch eine 10-mal kleinere Kraft  $F$ .

#### c) Knautschzone

Nun kannst du auch verstehen, wie man Autos konstruieren muss, damit das Verletzungsrisiko bei Unfällen für die Insassen möglichst klein ist: Es muss dafür gesorgt werden, dass die Zeit vom Auffahren bis zum Stillstand möglichst lange dauert. Das erreicht man dadurch, dass „Knautschzonen“ eingebaut werden, die sich verformen. Dieser Vorgang des Verformens verkleinert die Beschleunigung und verringert dadurch die Kraft.

## 6. Anwendungen der Newtonschen Bewegungsgleichung

### 6.1 Alltagsanwendungen

Im letzten Kapitel hast du die Newton'sche Bewegungsgleichung (NBG) kennen gelernt.

Sie lautet:  $F = m \cdot \Delta v$

Du hast auch schon gelernt, dass du mit dieser Gleichung viele Vorgänge in deinem Alltag erklären kannst.

#### a) Fausten oder Stoppen?

Beim Elfmeterschießen erreicht ein Fußball ein Tempo von 120 km/h. Soll der Torhüter den Ball halten, zurückfausten oder ablenken, um sein Verletzungsrisiko zu minimieren? (Bild 6.1)

Diese Frage kannst du mit der NBG beantworten. Wir nehmen dabei an, dass die Einwirkungszeit  $\Delta t$  für das Abbremsen durch die Wand bzw. durch den Zaun. Das Abbremsen durch den Drahtzaun dauert ca. 10-mal so lange wie das Abbremsen durch die Betonmauer. Dann ist die durchschnittliche Kraft, die der Zaun ausübt 10-mal kleiner als die durchschnittliche Kraft die die Mauer ausübt. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus der Newton'schen Bewegungsgleichung. Der auf der rechten Seite stehende Wert des Produktes  $m \cdot \Delta v$  ist ja für beide Autos gleich groß und gleich dem Wert von  $F \cdot \Delta t$ . Für den Fall, dass  $\Delta t$  10-mal größer ist, muss also die Kraft  $F$  10-mal kleiner sein, damit das Produkt den gleichen Wert behält.



6.1 Was soll der Torwart tun?

Die Anfangsgeschwindigkeit ist in allen drei Situationen gleich. Überlege dir mit den Pfeilbildern:

Beim Halten ist der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt und genauso lang.

Beim Zurückfausten ist der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit wieder dem Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit entgegengesetzt, aber länger.

Beim Ablenken hingegen hat der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit eine andere Richtung und ist wesentlich kürzer. Dementsprechend ist in diesem Fall auch die Kraft, die der Torhüter auf den Ball ausübt, kleiner. Das Verletzungsrisiko ist im dritten Fall am geringsten.

#### b) Auffahrunfall eines Autos

Vergleichen wir die Auswirkungen zweier Unfälle: Ein Auto fährt mit 40 km/h gegen eine Betonwand, ein Auto gleichen Typs fährt mit gleicher Geschwindigkeit (gleiches Tempo und gleiche Richtung) in einen Drahtzaun. Beide Autos kommen dadurch zum Stillstand. Gefühlsmäßig erwarten wir, dass die Kräfte auf die Autos und ihre Fahrer unterschiedlich sein werden, obwohl Anfangs- und Endgeschwindigkeit in beiden Fällen gleich sind. Unsere Erwartung trifft tatsächlich zu, denn es gibt einen wichtigen Unterschied: die Einwirkungszeit  $\Delta t$  der Wand bzw. des Zauns auf das Auto. Das Abbremsen durch den Drahtzaun dauert ca. 10-mal so lange wie das Abbremsen durch die Betonmauer. Dann ist die durchschnittliche Kraft die der Zaun ausübt 10-mal kleiner als die durchschnittliche Kraft die die Mauer ausübt.

Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus der Newton'schen Bewegungsgleichung. Der auf der rechten Seite stehende Wert des Produktes  $m \cdot \Delta v$  ist ja für beide Autos gleich groß und gleich dem Wert von  $F \cdot \Delta t$ . Für den Fall, dass  $\Delta t$  10-mal größer ist, muss also die Kraft  $F$  10-mal kleiner sein, damit das Produkt den gleichen Wert behält.

#### c) Knautschzone

Nun kannst du auch verstehen, wie man Autos konstruieren muss, damit das Verletzungsrisiko bei Unfällen für die Insassen möglichst klein ist: Es muss dafür gesorgt werden, dass die Zeit vom Auffahren bis zum Stillstand möglichst lange dauert. Das erreicht man dadurch, dass „Knautschzonen“ eingebaut werden, die sich verformen. Dieser Vorgang des Verformens verlängert die Einwirkungszeit und verringert dadurch die Kraft.

Die Fahrgastzelle konstruiert man sehr steif, sie soll sich beim Unfall möglichst nicht verformen, damit die Insassen nicht eingeklemmt werden (Bild 6.2).

6.2 Crashtest mit einem Auto

**d) Fahrradhelme**  
Genau diese Funktion haben auch Fahrradhelme. Sie sorgen dafür, dass die Beschleunigung von deinem Kopf verkleinert wird. Dann wirkt eine kleinere Kraft. Gleichzeitig sorgt der Helm dafür, dass die Kraft nicht punktuell auf die Schädeldecke wirkt, sondern sich auf eine größere Fläche verteilt. Wie groß diese Unterschiede sind, kannst du in einem Versuch überprüfen:

Ein rohes Ei wird aus ca. 1 m Höhe fallengelassen. Es zerbricht. Danach wird ein anderes rohes Ei mit einem „Helm“ ausgestattet (Bild 6.3) und ebenfalls aus ca. 1m Höhe fallengelassen. Das Ei bleibt unbeschädigt.

6.3 Crashtest mit einem Ei

**e) Beladenes Auto**  
Ein leerer Kombi erreicht mit Vollgas in 12 s eine Geschwindigkeit von 100 km/h. Vollbeladen erreicht er in gleicher Zeit - ebenfalls bei Vollgas - nur 75 km/h. Erkläre mit der Newton'schen Bewegungsgleichung, warum dies so ist.

**f) Elastizität von Kletterseilen**  
Kletterseile sind bis zu einem gewissen Grad elastisch (Bild 6.4). Dies ist deshalb so wichtig, damit die Beschleunigung klein genug und damit die Kraft möglichst klein wird, sodass man den Sturz ins Seil ohne schwere Verletzungen überlebt.

6.4 Sicherung mit dem Kletterseil

**g) Abgang vom Hochreck**  
Für den Abgang vom Hochreck erhält der Sportler nach altem Reglement eine besonders hohe Punktzahl, wenn er mit durchgedrückten Knien auf den Boden aufkommt. Jemand behauptet, dass dies für die Gelenke sehr schädlich sei, und dass es schoner sei beim Auftreffen auf den Boden „in die Knie zu gehen“.

Das ist deshalb richtig, weil dadurch die Beschleunigung verkleinert, und deshalb nach der NBG die Kraft verkleinert wird.

**h) Abbremsen**  
Ein Auto bremst auf der Straße. Dabei ändert sich die Geschwindigkeit des Autos. Das Auto erhält also eine Geschwindigkeitsänderung. Nach der NBG muss eine Kraft auf das Auto ausgeübt werden. Diese Kraft übt die Straße auf das Auto aus.

Bei Glätteis kann die Straße keine Kraft auf das Auto ausüben. Man kann nicht mehr bremsen.

Die Fahrgastzelle konstruiert man sehr steif, sie soll sich beim Unfall möglichst nicht verformen, damit die Insassen nicht eingeklemmt werden (Bild 6.2).

6.2 Crashtest mit einem Auto

**d) Fahrradhelme**  
Genau diese Funktion haben auch Fahrradhelme. Sie sorgen dafür, dass die Beschleunigung von deinem Kopf verlängert wird. Dann wirkt eine kleinere Kraft. Gleichzeitig sorgt der Helm dafür, dass die Kraft nicht punktuell auf die Schädeldecke wirkt, sondern sich auf eine größere Fläche verteilt. Wie groß diese Unterschiede sind, kannst du in einem Versuch überprüfen:

Ein rohes Ei wird aus ca. 1 m Höhe fallengelassen. Es zerbricht. Danach wird ein anderes rohes Ei mit einem „Helm“ ausgestattet (Bild 6.3) und ebenfalls aus ca. 1m Höhe fallengelassen. Das Ei bleibt unbeschädigt.

6.3 Crashtest mit einem Ei

**e) Beladenes Auto**  
Ein leerer Kombi erreicht mit Vollgas in 12 s ein Tempo von 100 km/h. Vollbeladen erreicht er in gleicher Zeit - ebenfalls bei Vollgas - nur 75 km/h. Erkläre mit der Newton'schen Bewegungsgleichung, warum dies so ist.

**f) Elastizität von Kletterseilen**  
Kletterseile sind bis zu einem gewissen Grad elastisch (Bild 6.4). Dies ist deshalb so wichtig, damit die Einwirkdauer groß genug und die Kraft möglichst klein wird, sodass man den Sturz ins Seil ohne schwere Verletzungen überlebt.

6.4 Sicherung mit dem Kletterseil

**g) Abgang vom Hochreck**  
Für den Abgang vom Hochreck erhält der Sportler nach altem Reglement eine besonders hohe Punktzahl, wenn er mit durchgedrückten Knien auf den Boden aufkommt. Jemand behauptet, dass dies für die Gelenke sehr schädlich sei, und dass es schoner sei beim Auftreffen auf den Boden „in die Knie zu gehen“.

Das ist deshalb richtig, weil dadurch die Einwirkungsdauer vergrößert, und deshalb nach der NBG die Kraft verkleinert wird.

**h) Kurvenfahrt**  
Ein Auto fährt um die Kurve. Dabei ändern sich die Richtung, und damit die Geschwindigkeit des Autos. Das Auto erhält also eine Zusatzgeschwindigkeit. Nach der NBG muss eine Kraft auf das Auto ausgeübt werden. Diese Kraft übt die Straße auf das Auto aus.

Bei Glätteis kann die Straße keine Kraft auf das Auto ausüben. Man kann nicht um die Kurve fahren.

20

20

## i) Huskies

Beim Schlittenhunderennen muss der Führer des Schlittens sorgfältig überlegen, wie viele Hunde er vor den Schlitten spannt. Das kannst du wieder mit der NBG verstehen: Je größer die Masse des Schlittens ist, desto größer ist die benötigte Zugkraft, um den Schlitten aus der Ruhe auf die Renngeschwindigkeit zu bringen.



6.5 Huskies vor dem Schlittenrennen

## Aufgaben

- ① Auch beim Volleyball-Aufschlag gilt die NBG. Beantworte: Wer übt eine Kraft aus? Auf wen wird diese Kraft ausgeübt? Kannst du  $\Delta t$ ,  $\Delta v$ ,  $F$  und  $m$  zuordnen?
- ② Erkläre, warum ein Airbag bei einem Unfall die Überlebenschancen von Fahrer und Beifahrer erhöht!
- ③ Erkläre, weshalb in der Formel 1 bei einem Rennen Reifenstapel als Bande verwendet werden.
- ④ Ein Regentropfen trifft gegen ein fahrendes Auto. Natürlich erhält das Auto dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit. Warum merkst du davon im Auto nichts?
- ⑤ Mountainbiker fahren oft „Fullies“. Schau nach, was das bedeutet, und erkläre, warum das bei einem Downhill hilfreich ist.

21

## i) Huskies

Beim Schlittenhunderennen muss der Führer des Schlittens sorgfältig überlegen, wie viele Hunde er vor den Schlitten spannt. Das kannst du wieder mit der NBG verstehen: Je größer die Masse des Schlittens ist, desto größer ist die benötigte Zugkraft, um den Schlitten aus der Ruhe auf die Renngeschwindigkeit zu bringen.



6.5 Huskies vor dem Schlittenrennen

## Aufgaben

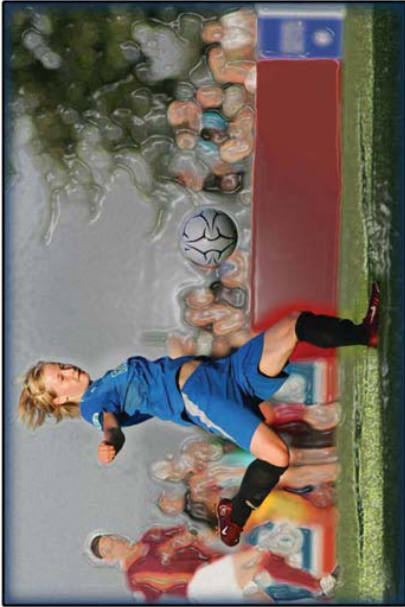
- ① Auch beim Volleyball-Aufschlag gilt die NBG. Beantworte: Wer übt eine Kraft aus? Auf wen wird diese Kraft ausgeübt? Kannst du  $F$ ,  $m$  und  $a$  zuordnen?
- ② Erkläre, warum ein Airbag bei einem Unfall die Überlebenschancen von Fahrer und Beifahrer erhöht!
- ③ Erkläre, weshalb in der Formel 1 bei einem Rennen Reifenstapel als Bande verwendet werden.
- ④ Ein Regentropfen trifft gegen ein fahrendes Auto. Natürlich erhält das Auto dadurch eine Beschleunigung. Warum merkst du davon im Auto nichts?
- ⑤ Mountainbiker fahren oft „Fullies“. Schau nach, was das bedeutet, und erkläre, warum das bei einem Downhill hilfreich ist.

21

SchülerInnenhefte: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

## **C.2 Workbooks**

Anbei sind die Workbooks für beide Mechaniklehrgänge abgebildet. Für einen direkten Vergleich sind immer die entsprechenden analog aufgebauten Seiten für das 2DD-Mechanikkonzept und für die 1D-Adaption nebeneinander dargestellt (oben bzw. die rechte Seite entspricht immer dem 2DD-Mechanikkonzept und unten bzw. links der 1D-Adaption). Wird in der Darstellung eine leere Seite gezeigt, gibt es kein Analogon im anderen Workbook.



# **Einführung in die Mechanik Workbook**



# **Einführung in die Mechanik Workbook**

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

### **Einführung in die Mechanik - Workbook**

#### **Inhaltsverzeichnis - Aufgaben zu:**

2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen
3. Wie schnell? Wohin?
  - 3.1 Geschwindigkeit
  - 3.2 Richtung
  - 3.3 Geschwindigkeitspeile
4. Die Beschleunigung
5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung
  - 5.1 Kraft und Beschleunigung
  - 5.2 Masse und Beschleunigung
6. Anwendungen der Newton'schen Bewegungsgleichung
  - 6.1 Alltagsanwendungen

### **Einführung in die Mechanik - Workbook**

#### **Inhaltsverzeichnis - Aufgaben zu:**

2. Die Darstellung und Beschreibung von Bewegungen
3. Wie schnell? Wohin?
  - 3.1 Tempo
  - 3.2 Richtung
  - 3.3 Geschwindigkeit
4. Die Zusatzgeschwindigkeit
5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung
  - 5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit
  - 5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit
  - 5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit
6. Anwendungen der Newton'schen Bewegungsgleichung
  - 6.1 Alltagsanwendungen

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

**Autoren:**  
Prof. Dr. Heiko Krabbe  
Marco Seier

**RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM**

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM  
FAKULTÄT FÜR PHYSIK UND ASTRONOMIE

Ruhr-Universität Bochum, Fakultät  
für Physik und Astronomie AG  
Didaktik der Physik  
Universitätsstraße 150  
44801 Bochum

**GOETHE  
UNIVERSITÄT  
FRANKFURT AM MAIN**

Prof. Dr. habil Thomas Wilhelm  
  
Goethe-Universität Frankfurt a.M.  
Institut für Didaktik der Physik  
Max-von-Laue-Straße 1  
60438 Frankfurt am Main

©Copyright August 2019

**Autoren:**  
Prof. Dr. Heiko Krabbe  
Marco Seier

**RUHR  
UNIVERSITÄT  
BOCHUM**

RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM  
FAKULTÄT FÜR PHYSIK UND ASTRONOMIE

Ruhr-Universität Bochum  
Fakultät für Physik und Astronomie  
AG Didaktik der Physik  
Universitätsstraße 150  
44801 Bochum

**GOETHE  
UNIVERSITÄT  
FRANKFURT AM MAIN**

Prof. Dr. habil Thomas Wilhelm  
  
Goethe-Universität Frankfurt a.M.  
Institut für Didaktik der Physik  
Max-von-Laue-Straße 1  
60438 Frankfurt am Main

©Copyright August 2019

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

### 2. Darstellung und Beschreibung von Bewegungen

1. **Kreuze die richtigen Antworten an:**

Welche Größen muss man zusammen festhalten, um die Bewegung eines Gegenstands physikalisch zu beschreiben?

☐ den Ort des Gegenstands  
☐ die Dauer der Bewegung  
☐ den Zeitpunkt der Messung  
☐ die zurückgelegte Strecke

Die Beschreibung einer Bewegung wird umso genauer, desto...

☐ genauer die Zeitpunkte bestimmt werden.  
☐ genauer die Orte bestimmt werden.  
☐ kleiner die Abstände zwischen den Orten sind.  
☐ kleiner die Abstände zwischen den Zeitpunkten sind.

2. **Beschreibe, wie die Bewegung des Storches Max aufgezeichnet wurde. (siehe Bild 2.1 im Schülertext)**

### 2. Darstellung und Beschreibung von Bewegungen

1. **Kreuze die richtigen Antworten an:**

Welche Größen muss man zusammen festhalten, um die Bewegung eines Gegenstands physikalisch zu beschreiben?

☐ den Ort des Gegenstands  
☐ die Dauer der Bewegung  
☐ den Zeitpunkt der Messung  
☐ die zurückgelegte Strecke

Die Beschreibung einer Bewegung wird umso genauer, desto...

☐ genauer die Zeitpunkte bestimmt werden.  
☐ genauer die Orte bestimmt werden.  
☐ kleiner die Abstände zwischen den Orten sind.  
☐ kleiner die Abstände zwischen den Zeitpunkten sind.

2. **Beschreibe, wie die Bewegung von Toms Vater auf dem Fahrrad aufgezeichnet wurde.**

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

257

3. Erläutere, weshalb aus Bild 2.2 nicht die exakte Bewegung von Toms Vater auf dem Fahrrad ablesbar ist.

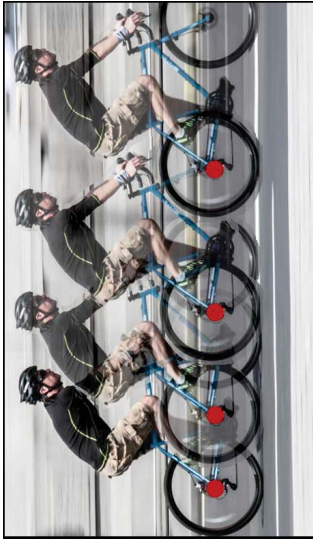


Bild 2.2 Bilderreihe von Toms Vater auf dem Fahrrad

4. Erstelle mit der *Motion Shot* App ein Stroboskopbild

- Öffne die App und stelle das Bild scharf.
- Nimm die Bewegung von der Seite auf.
- Achte darauf, dass sich die Kamera nicht bewegt und der Hintergrund gleichbleibt. Der Hintergrund muss gut erkennbare Strukturen haben (nicht einfarbig).
- Stelle auf der +/- Skala die Anzahl der Bilder für die Überlagerung ein.
- Stelle das Bild fertig, indem du oben auf den grünen Haken drückst.
- Schließe die App und öffne das Bild in der Galerie.

Erläutere, wie die App die Filmaufnahme zu einem Stroboskopbild verarbeitet.

3. Erläutere, weshalb aus Bild 2.2 nicht die exakte Flugroute von Max ablesbar ist.



Bild 2.2 Flugroute von Max

4. Erstelle mit der *Motion Shot* App ein Stroboskopbild

- Öffne die App und stelle das Bild scharf.
- Nimm die Bewegung von der Seite auf.
- Achte darauf, dass sich die Kamera nicht bewegt und der Hintergrund gleichbleibt. Der Hintergrund muss gut erkennbare Strukturen haben (nicht einfarbig).
- Stelle auf der +/- Skala die Anzahl der Bilder für die Überlagerung ein.
- Stelle das Bild fertig, indem du oben auf den grünen Haken drückst.
- Schließe die App und öffne das Bild in der Galerie.

Erläutere, wie die App die Filmaufnahme zu einem Stroboskopbild verarbeitet.

5. Hier siehst du das Stroboskopbild eines Fußballs.

Bild 2.4: Stroboskopbild eines Fußballs.  
Zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden.



a) Beschreibe die Bewegung des Balls. Entscheide, ob die Bewegung am linken oder am rechten Bildrand angefangen hat.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

b) Wann war der Fußball am schnellsten? Wann war er am langsamsten? Begründe (siehe Beispiel zu Bild 2.3 auf S. 2 im Schülertext)!

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

c) Bestimme den Zeitpunkt des Aufpralls. Kannst du ihn genau angeben?

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3

5. Hier siehst du das Stroboskopbild eines Fußballs.

Bild 2.4: Stroboskopbild eines Fußballs.  
Zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden.



a) Beschreibe die Bewegung des Balls. Entscheide, ob die Bewegung oben oder unten angefangen hat.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

b) Wann war der Fußball am schnellsten? Wann war er am langsamsten? Begründe (siehe Beispiel zu Bild 2.3 auf S. 2 im Schülertext)!

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3

[illegible]

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

### 3. Wie schnell? Wohin?

#### 3.1 Geschwindigkeit

Information

Die **Geschwindigkeit** beschreibt in der Physik, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt. Die Geschwindigkeit wird mit dem Buchstaben  $v$  bezeichnet. Sie wird bestimmt durch den Quotienten aus der zurückgelegten Strecke und der dafür benötigten Zeit:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

1. Ergänze den folgenden Lückentext:

In der Formel für die Geschwindigkeit wird die zurückgelegte Strecke mit \_\_\_\_\_ und die benötigte Zeit mit \_\_\_\_\_ bezeichnet.

2. Erkläre, wofür in der Formel für die Geschwindigkeit  $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$  das Symbol  $\Delta$  (Delta) steht.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. Mit welcher der folgenden Einheiten kann eine Geschwindigkeit angegeben werden?

a)  $\frac{kg}{s}$       b)  $\frac{m}{s}$       c)  $\frac{m}{h}$       d)  $\frac{s}{dm}$       e)  $\frac{km}{s}$       f)  $\frac{cm}{kg}$

### 3. Wie schnell? Wohin?

#### 3.1 Tempo

Information

Das **Tempo** beschreibt in der Physik, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt. Das Tempo wird mit dem Buchstaben  $\nu$  bezeichnet. Es wird bestimmt durch den Quotienten aus der zurückgelegten Strecke und der dafür benötigten Zeit:

$$\nu = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

1. Ergänze den folgenden Lückentext:

In der Formel für das Tempo wird die zurückgelegte Strecke mit \_\_\_\_\_ und die benötigte Zeit mit \_\_\_\_\_ bezeichnet.

2. Erkläre, wofür in der Formel für das Tempo  $\nu = \frac{\Delta s}{\Delta t}$  das Symbol  $\Delta$  (Delta) steht.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. Mit welcher der folgenden Einheiten kann ein Tempo angegeben werden?

a)  $\frac{kg}{s}$       b)  $\frac{m}{s}$       c)  $\frac{m}{h}$       d)  $\frac{s}{dm}$       e)  $\frac{km}{s}$       f)  $\frac{cm}{kg}$

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

261

a) Wie groß war die durchschnittliche Geschwindigkeit auf 100 m für Tyson Gay und Asafa Powell (siehe Beispiel b) im Schülertext auf S.4).

[illegible]

b) Auf welchem Streckenabschnitte erreicht Usain Bolt die höchste durchschnittliche Geschwindigkeit? Wie groß war sie?

A blank sheet of graph paper with a grid pattern. The grid consists of small squares formed by thin black lines. There are 20 columns and 30 rows of squares. The paper has a light gray background.

c) Eine Zeitangabe in der Tabelle kann nicht stimmen. Welcher Wert müsste dort vermutlich stehen?

---

|                               | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Fahrzeug                      |            |            |            |
| abgemessene Länge der Strecke |            |            |            |
| gemessene Dauer der Fahrt     |            |            |            |
| berechnete Geschwindigkeit    |            |            |            |

6

a) Wie groß war das durchschnittliche Tempo auf 100 m für Tyson Gay und Asafa Powell (siehe Beispiel b) im Schülertext auf S.4).

[illegible]

b) Auf welchem Streckenabschnitte erreicht Usain Bolt das höchste durchschnittliche Tempo? Wie groß war es?

[illegible]

c) Eine Zeitangabe in der Tabelle kann nicht stimmen. Welcher Wert müsste dort vermutlich stehen?

---

|                               | 1. Messung | 2. Messung | 3. Messung |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Fahrzeug                      |            |            |            |
| abgemessene Länge der Strecke |            |            |            |
| gemessene Dauer der Fahrt     |            |            |            |
| berechnetes Tempo             |            |            |            |

6



7. Beim 400-m-Lauf starten die Athleten von ganz unterschiedlichen Positionen (Bild 3.5). Erkläre, weshalb nur so ein fairer Wettkampf möglich ist.

3.5 Leichtathletik-Mitteldistanzrennen



---

---

---

---

8. Bei der 400-m-Frauenstaffel hatte die Schlussläuferin der USA bei der Übergabe einen Vorsprung von 3:34 s vor der Zweitplatzierten aus Jamaika. Im Ziel betrug der Vorsprung nur noch 3:28 s. Welche Schlussläuferin hat ein größeres Durchschnittstempo auf der 400-m-Runde?

---

---

---

8

7. Beim 400-m-Lauf starten die Athleten von ganz unterschiedlichen Positionen (Bild 3.5). Erkläre, weshalb nur so ein fairer Wettkampf möglich ist.

3.5 Leichtathletik-Mitteldistanzrennen



---

---

---

---

8. Bei der 400-m-Frauenstaffel hatte die Schlussläuferin der USA bei der Übergabe einen Vorsprung von 3:34 s vor der Zweitplatzierten aus Jamaika. Im Ziel betrug der Vorsprung nur noch 3:28 s. Welche Schlussläuferin hat eine größere Durchschnittsgeschwindigkeit auf der 400-m-Runde?

---

---

---

8

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

9. Welche Größen kann man in jedem Punkt der Bewegung gemeinsam angeben, um die Bewegung physikalisch zu beschreiben?

☐ Gegenstand der Bewegung  
☐ Richtung der Bewegung  
☐ Tempo der Bewegung  
☐ Dauer der Bewegung

10. Erkläre, wie du das Tempo eines Fahrzeugs mit einem Experiment bestimmen kannst.

11. Finde heraus, wie ein Fahrradtacho das Tempo misst. Überlege dir ein Experiment um herauszufinden, ob ein Tacho das richtige Tempo anzeigt.

9. Welche Größen kann man in jedem Punkt der Bewegung gemeinsam angeben, um die Bewegung physikalisch zu beschreiben?

☐ Gegenstand der Bewegung  
☐ Richtung der Bewegung  
☐ Geschwindigkeit der Bewegung  
☐ Dauer der Bewegung

10. Erkläre, wie du die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs mit einem Experiment bestimmen kannst.

11. Finde heraus, wie ein Fahrradtacho die Geschwindigkeit misst. Überlege dir ein Experiment um herauszufinden, ob ein Tacho die richtige Geschwindigkeit anzeigt.

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

[illegible][illegible]

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

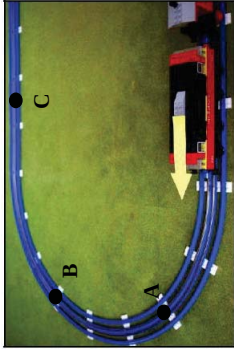
3.2 Richtung

Information

Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben. Der Pfeil zeigt immer (tangential) entlang der Bewegungsbahn.

1. Bewegungsrichtung und Ziel

a) Zeichne jeweils die Richtung des Zugs an den Punkten A, B und C ein.



b) Was ist das Ziel des Zugs?

2. Zeichne im Moment des Abwurfs die Richtung der Bewegung des Balls und die Richtung des Ziels ein.



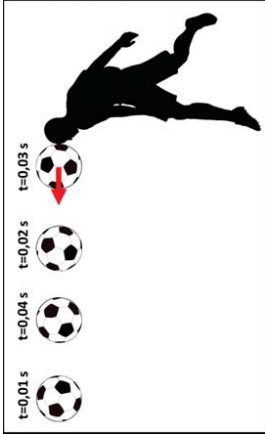
3.2 Richtung

Information

Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben.

1. Bewegungsrichtung einzeichnen

a) Zeichne für die drei Bälle jeweils die Bewegungsrichtung ein, eine Richtung haben wir dir schon vorgegeben. Beachte die Reihenfolge der Zeitpunkte!



b) Erkläre wie du dabei vorgegangen bist.

2. Zeichne im Moment des Schusses die Richtung der Bewegung des Balls ein.

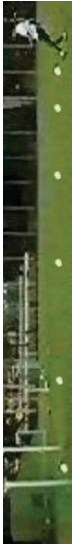
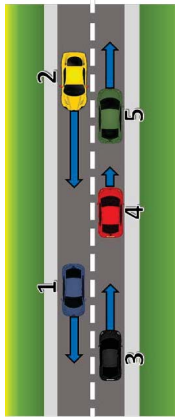


Bild 2.5 Torschuss; zwischen zwei Aufnahmen liegen immer 0,04 Sekunden.

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

267

3. Welche Autos in dem unteren Bild haben die gleiche Bewegungsrichtung?



Gleiche Richtung: \_\_\_\_\_

4. Diskussionen

a) Martin behauptet: „Immer wenn die Pfeile zweier bewegter Gegenstände die gleiche Richtung haben, bewegen sich die beiden Gegenstände entweder vorwärts oder rückwärts.“ Erkläre Martin, warum er nicht recht hat.

---

---

---

---

---

---

---

---

b) Matthias sagt: „Wenn zwei Autos vorwärts fahren, bewegen sie sich auch in die gleiche Richtung.“ Auch Matthias hat nicht recht. Warum?

---

---

---

---

---

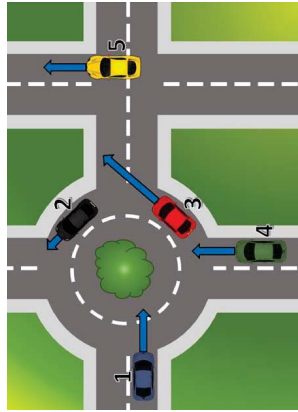
---

---

---

12

3. Welche Autos in dem unteren Bild haben die gleiche Bewegungsrichtung? Welche haben das gleiche Ziel?



Gleiche Richtung: \_\_\_\_\_

Gleiches Ziel: \_\_\_\_\_

4. Diskussionen

a) Martin behauptet: „Immer wenn die Pfeile zweier bewegter Gegenstände die gleiche Richtung haben, haben sie auch das gleiche Ziel.“ Erkläre Martin, warum er nicht recht hat.

---

---

---

---

---

---

---

---

b) Matthias sagt: „Haben zwei Autos das gleiche Ziel, dann zeigen ihre Pfeile auch in die gleiche Richtung.“ Auch Matthias hat nicht recht. Warum?

---

---

---

---

---

---

---

---

12

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

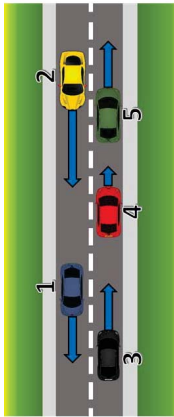
3.3 Geschwindigkeitspfeile

Information

Der **Geschwindigkeitspfeil** eines Gegenstands setzt sich zusammen aus dem Betrag seiner Geschwindigkeit und seiner Bewegungsrichtung.  
Seine Richtung gibt die Richtung der Bewegung an, seine Länge gibt den Betrag der Geschwindigkeit der Bewegung an.  
Zwei Geschwindigkeitspfeile sind nur dann gleich, wenn sie den gleichen Geschwindigkeitsbetrag und die gleiche Richtung haben!  
(Die Geschwindigkeitspfeile sind dann gleich lang und zeigen in die gleiche Richtung.)

1. Bestimme Geschwindigkeit und Geschwindigkeitspfeile

- a) Welche Autos in dem unteren Bild haben die gleiche Geschwindigkeit?  
Welche haben den gleichen Geschwindigkeitspfeil?



Gleicher Betrag der Geschwindigkeit: \_\_\_\_\_  
Gleiche Richtung des Geschwindigkeitspfeils: \_\_\_\_\_

- b) Miss die Länge der Geschwindigkeitspfeile und gib die Geschwindigkeit der Fahrzeuge an. (Maßstab: 1 mm Pfeillänge entspricht 2,5 km/h)

|                  |       |                 |       |
|------------------|-------|-----------------|-------|
| Pkw 1 (Corsa):   | $v =$ | Pkw 4 (Trabbi): | $v =$ |
| Pkw 2 (Ferrari): | $v =$ | Pkw 5 (Leaf):   | $v =$ |
| Pkw 3 (Golf):    | $v =$ |                 |       |

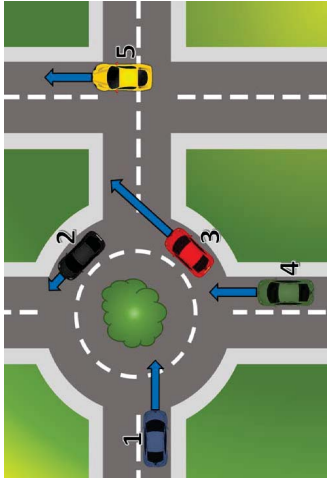
3.3 Geschwindigkeit

Information

Die **Geschwindigkeit**  $\vec{v}$  eines Gegenstands setzt sich zusammen aus seinem Tempo und seiner Bewegungsrichtung.  
Sie wird durch einen Geschwindigkeitspfeil dargestellt. Seine Richtung gibt die Richtung der Bewegung an, seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.  
Zwei Geschwindigkeiten sind nur dann gleich, wenn sie das gleiche Tempo und die gleiche Richtung haben!  
(Die Geschwindigkeitspfeile sind dann gleich lang und zeigen in die gleiche Richtung.)

1. Bestimme Geschwindigkeit und Tempo

- a) Welche Autos in dem unteren Bild haben die gleiche Geschwindigkeit?  
Welche haben das gleiche Tempo?

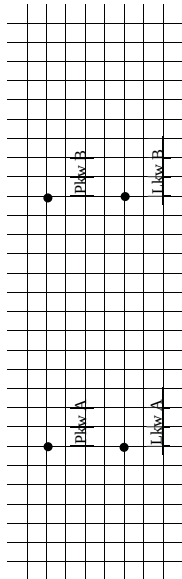


Gleiche Geschwindigkeit: \_\_\_\_\_  
Gleiches Tempo: \_\_\_\_\_

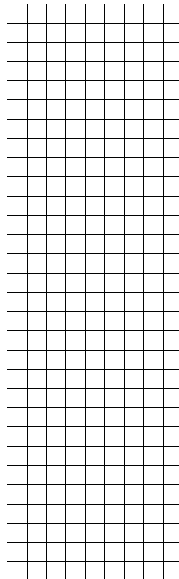
- b) Miss die Länge der Geschwindigkeitspfeile und gib das Tempo der Fahrzeuge an. (Maßstab: 1 mm Pfeillänge entspricht 2,5 km/h)

|                  |       |               |       |
|------------------|-------|---------------|-------|
| Pkw 1 (Corsa):   | $v =$ | Pkw 4 (Golf): | $v =$ |
| Pkw 2 (Trabbi):  | $v =$ | Pkw 5 (Leaf): | $v =$ |
| Pkw 3 (Ferrari): | $v =$ |               |       |

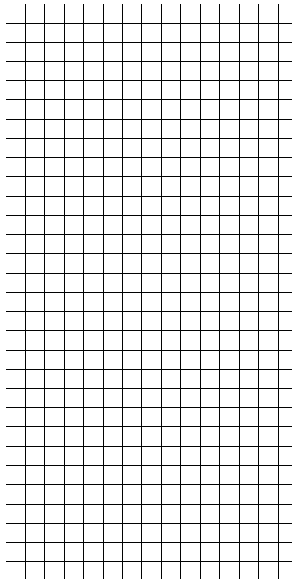
2. Zeichne in das Bild für zwei Autos Geschwindigkeitspfeile mit unterschiedlichen Beträgen  $v_1$  und  $v_2$  und außerdem für zwei LKWs mit gleichen Beträgen  $v_3$  und  $v_4$  ein.



3. Zeichne jeweils für zwei Fahrräder unterschiedliche Geschwindigkeitspfeile  
a) mit gleicher Bewegungsrichtung aber unterschiedlichen Betrag.  
b) mit gleichem Betrag aber unterschiedlichen Bewegungsrichtungen.

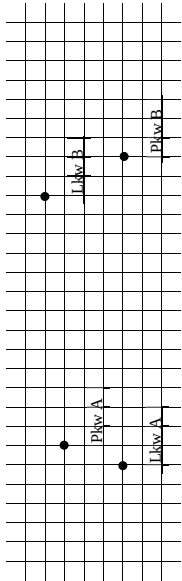


4. Zeichne die Geschwindigkeitspfeile für Flugzeuge, die  
a) mit 610 km/h nach Westen  
b) mit 380 km/h nach Osten  
fliegen. (1 cm entspricht dabei 100 km/h)

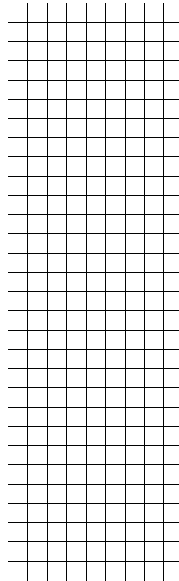


14

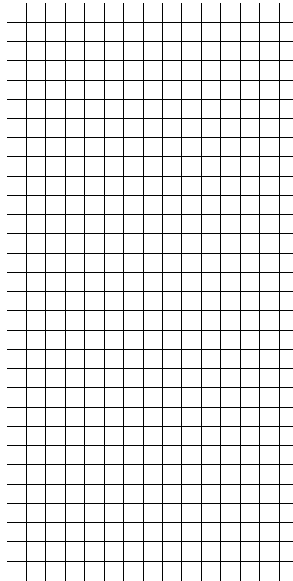
2. Zeichne in das Bild für zwei Autos unterschiedliche Geschwindigkeiten  $\vec{v}_1$  und  $\vec{v}_2$  und außerdem für zwei LKWs gleiche Geschwindigkeiten  $\vec{v}_3$  und  $\vec{v}_4$  ein.



3. Zeichne die Geschwindigkeitspfeile für drei Fahrräder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $\vec{v}$  aber  
a) zwei mit gleicher Bewegungsrichtung  
b) zwei mit gleichem Tempo  $v$ .

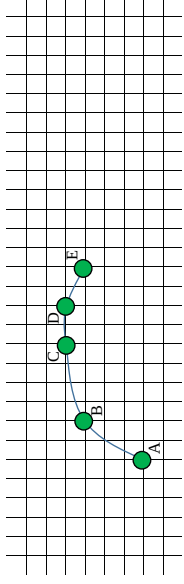


4. Zeichne die Geschwindigkeitspfeile für Flugzeuge, die  
a) mit 610 km/h nach Nordwesten  
b) mit 470 km/h nach Süden  
c) mit 380 km/h nach Osten  
fliegen. (1 cm entspricht dabei 100 km/h)



14

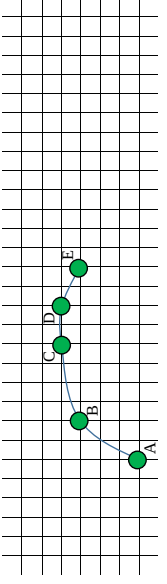
5. Zeichne die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen den Punkten A, B, C, D und E ein. Die Zeit zwischen zwei Bildaufnahmen beträgt eine Sekunde. (Maßstab: 1 mm Pfeillänge entspricht der Geschwindigkeit 1 mm/s)



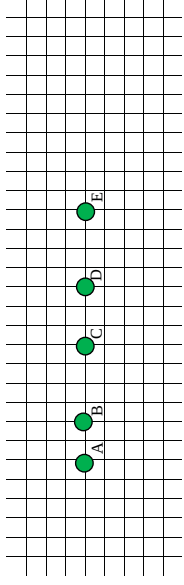
6. Zeichne entsprechend in das Bild unten

a) die Durchschnittsgeschwindigkeit zwischen den Punkten A und C.  
b) die (ungefähre) Momentangeschwindigkeit in Punkt B (siehe Beispiel c) im Schülertext auf S. 9).

Sind die Pfeile gleich lang?



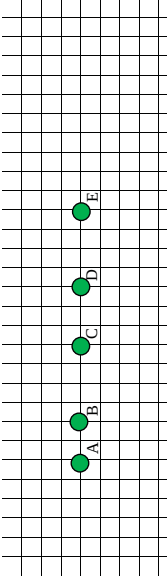
5. Zeichne Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile zwischen den Punkten A, B, C, D und E. Die Zeit zwischen zwei Bildaufnahmen beträgt eine Sekunde. (Maßstab: 1 mm Pfeillänge entspricht der Geschwindigkeit 1 mm/s)



6. Zeichne entsprechend in das Bild unten

a) den Durchschnittsgeschwindigkeitspfeil zwischen den Punkten A und C.  
b) den (ungefähre) Momentangeschwindigkeitspfeil in Punkt B (siehe Beispiel c) im Schülertext auf S. 9).

Sind die Pfeile gleich lang?



Zusammenfassung - eigene Notizen:

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |

16

Zusammenfassung - eigene Notizen:

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |

16

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

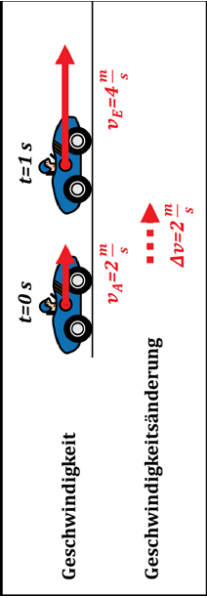
4. Die Beschleunigung  
4.1 Geschwindigkeitsänderung

Information

Die **Geschwindigkeitsänderung**  $\Delta v$  gibt an, wie sich die Geschwindigkeit eines Körpers zwischen zwei Zeitpunkten ändert. Die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  wird durch einen Pfeil dargestellt.

Der Geschwindigkeitsänderung wird in einer neuen Zeile unter dem Stroboskopbild mütig zwischen die beiden betrachteten Zeitpunkte gezeichnet. Mit der neuen Zeile der Geschwindigkeitsänderung sprechen wir jetzt von einer **Stroboskoptabelle** (ST).

Beispiel einer Stroboskoptabelle mit Geschwindigkeitsänderung:



Der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  zeigt von der Pfeilspitze der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  zur Pfeilspitze der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .

Anders ausgedrückt: Der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  und der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  ergeben zusammen den Pfeil der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .

Beispiel für die Konstruktion der Geschwindigkeitspfeile:



1. Der Gegenstand hat zum ersten Zeitpunkt eine Anfangsgeschwindigkeit nach rechts.
2. Der Gegenstand erfährt eine Einwirkung von links nach rechts.
3. Der Gegenstand hat beim zweiten Zeitpunkt eine Endgeschwindigkeit nach rechts.
4. Der Betrag der Geschwindigkeit des Gegenstands ist größer geworden und die Richtung ist gleichgeblieben.

4. Die Zusatzgeschwindigkeit

Information

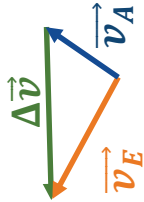
Durch eine **Einwirkung** erhält ein Körper eine **Zusatzgeschwindigkeit**  $\Delta \vec{v}$ . Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich. Die Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  wird durch einen Pfeil dargestellt.

Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  zeigt von der Pfeilspitze der Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  zur Pfeilspitze der Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$ .

Anders ausgedrückt: Der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit  $\vec{v}_A$  und der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$  ergeben zusammen den Pfeil der Endgeschwindigkeit  $\vec{v}_E$ .

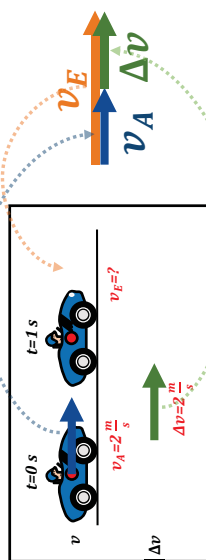
**Konstruktionsstipp:**  
Wenn du einen Geschwindigkeitspfeil konstruierst, dann kannst du die vorgegebenen Geschwindigkeitspfeile beliebig verschieben. Beachte, dass du dabei die Richtung und die Länge der Pfeile nicht veränderst.

Beispiel:



1. Der Gegenstand hat eine Anfangsgeschwindigkeit nach oben rechts.
2. Der Gegenstand erfährt eine Einwirkung von rechts nach links.
3. Der Gegenstand hat eine Endgeschwindigkeit nach oben links.
4. Das Tempo des Gegenstands ist größer geworden.

Konstruktion der Endgeschwindigkeit aus Anfangsgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung:

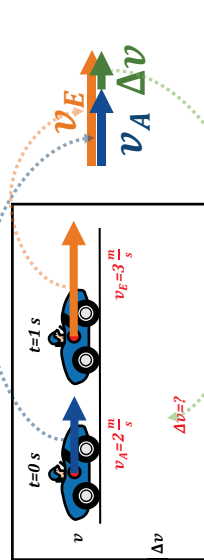


Hänge den Pfeil der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  an den Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$ .

Verbinde nun den Pfeilfuß der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  mit der Pfeilspitze der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .

Du erhältst den Pfeil der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .

Konstruktion der Geschwindigkeitsänderung aus Anfangs- und Endgeschwindigkeit:



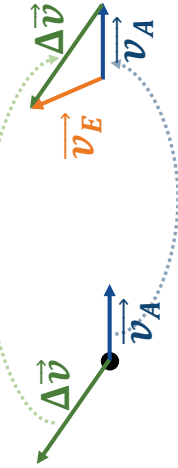
Hänge die Pfeile der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  und der Endgeschwindigkeit  $v_E$  an den Pfeilfüßen zusammen.

Verbinde nun die Pfeilspitze der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  mit der Pfeilspitze der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .

Du erhältst den Pfeil der Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .

18

Konstruktion der Endgeschwindigkeit aus Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit:

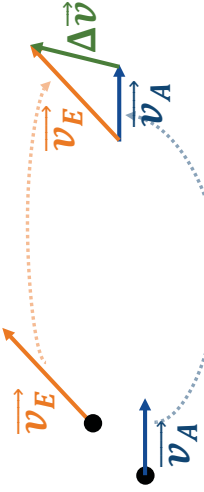


Hänge den Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$  an den Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$ .

Verbinde nun den Pfeilfuß der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  mit der Pfeilspitze der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$ .

Du erhältst den Pfeil der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .

Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit aus Anfangs- und Endgeschwindigkeit:



Hänge die Pfeile der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  und der Endgeschwindigkeit  $v_E$  an den Pfeilfüßen zusammen.

Verbinde nun die Pfeilspitze der Anfangsgeschwindigkeit  $v_A$  mit der Pfeilspitze der Endgeschwindigkeit  $v_E$ .

Du erhältst den Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$ .

18

V1 a)

V1 b)

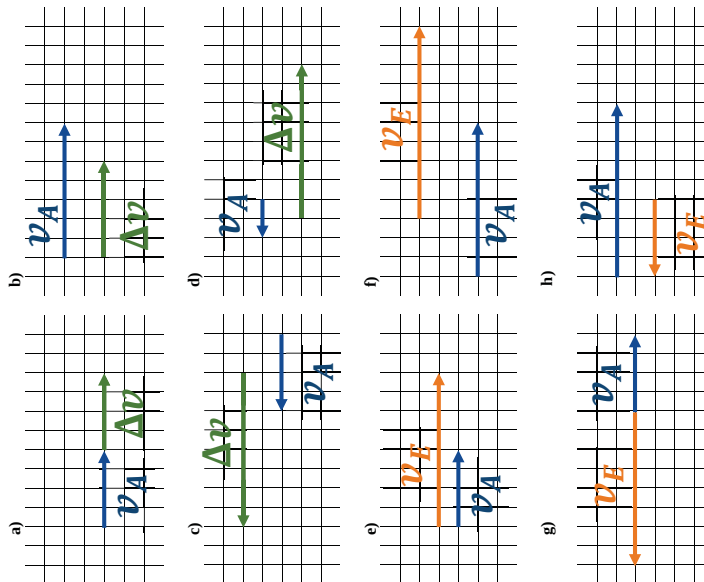
- 1. Streiche das Falsche weg:**

  - Das Auto in V1 a) hat **eine / keine** Anfangsgeschwindigkeit.
  - Das Auto in V1 b) hat **eine / keine** Anfangsgeschwindigkeit.
  - Die Einwirkung auf das Auto ist in beiden Fällen **gleich / ungleich**.
  - Die Geschwindigkeitsänderung des Autos ist in beiden Fällen **gleich / ungleich**.
  - Die Endgeschwindigkeit in V1 a) ist **gleich / ungleich** der Geschwindigkeitsänderung.
  - Die Endgeschwindigkeit in V1 b) ist **gleich / ungleich** der Geschwindigkeitsänderung.
- 2. a) Entscheide begründet, welche der unteren Pfeilkonstruktionen korrekt sind.**

b) Gib für die korrekten Bilder an, in welche Richtung der Körper eine Einwirkung erfährt und wie sich seine Geschwindigkeit dadurch ändert. (Tipp: Orientiere dich bei der Beschreibung an dem Beispiel im Workbook auf S.17)

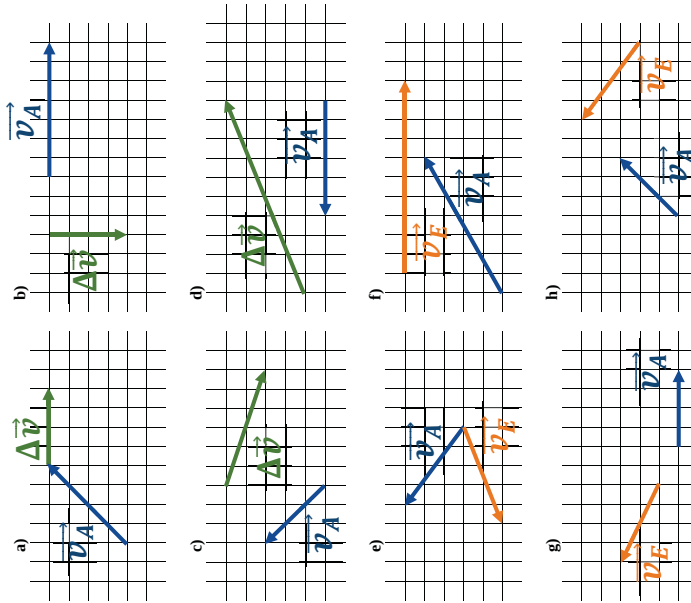
19

3. Konstruiere jeweils den fehlenden Geschwindigkeitspfeil.  
(Tipp: Du darfst alle Geschwindigkeitspfeile beliebig verschieben, falls nötig)



20

3. Konstruiere jeweils den fehlenden Geschwindigkeitspfeil.  
(Tipp: Du darfst alle Geschwindigkeitspfeile beliebig verschieben, falls nötig)

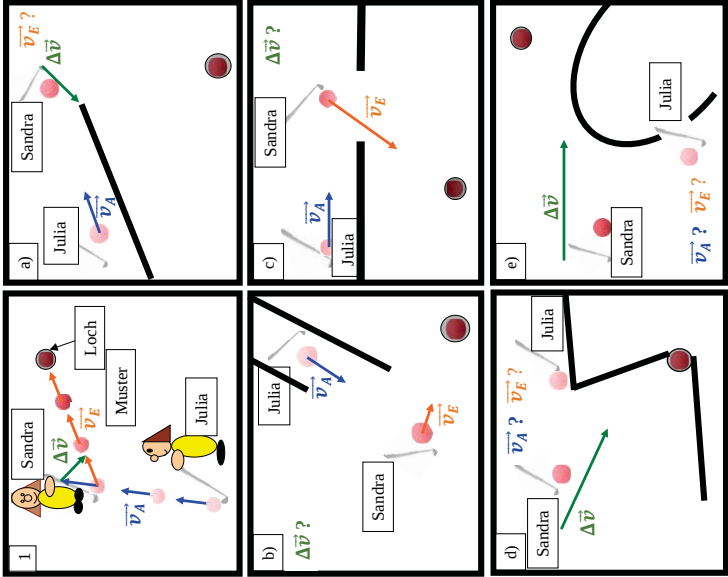


20

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

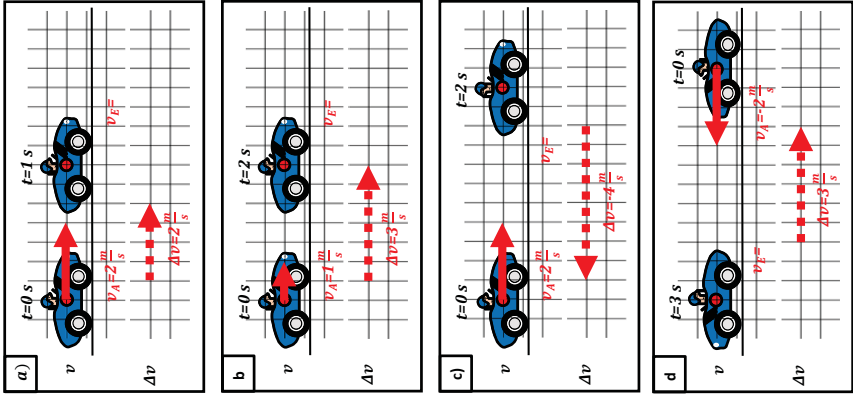
4. „Kickball“

Julia und Sandra spielen zusammen das Spiel „Kickball“. Dieses Spiel erfordert Geschicklichkeit und Teamfähigkeit. Julia schlägt den Ball immer als erstes gezielt zu Sandra, so dass diese den rollenden Ball gut in das Loch schlagen kann. Ergänze Anfangs- (blauer Pfeil), Zusatz- (grüner Pfeil) und Endgeschwindigkeit (orangener Pfeil).

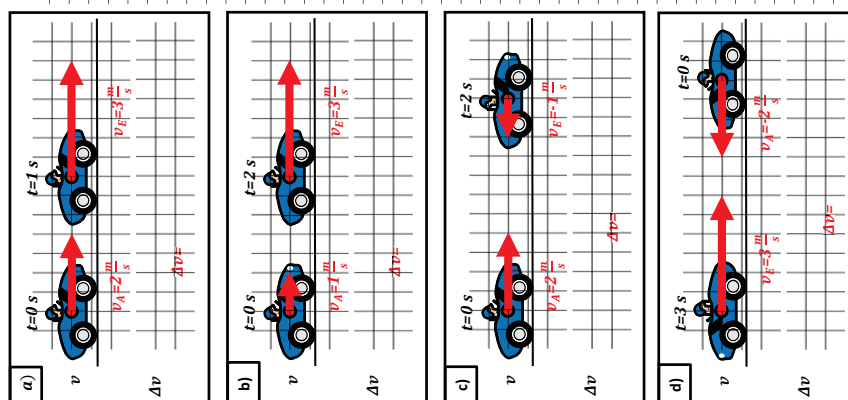


Tipp zu d) und e): Rekonstruiere die Richtung der Kugel vor und nach dem Stoß.

4. Konstruiere in den unteren Stroboskopabbildungen den fehlenden Pfeil der Endgeschwindigkeit.



5. Konstruiere in den unteren Stroboskop Tabellen den fehlenden Pfeil der Geschwindigkeitsänderung.



22

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

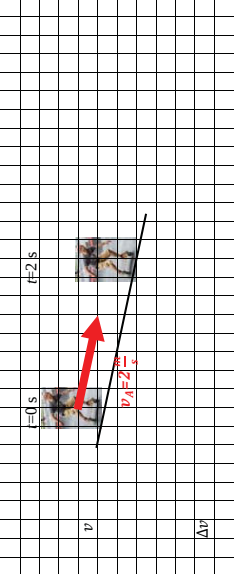
5. Zeichne  $\vec{v}_A$ ,  $\vec{v}_E$  und  $\Delta\vec{v}$  beim Elfmeterschießen und beschreibe jeweils das Tempo.

6. Dein Freund spielt dir beim Tischtennis einen ziemlich schwachen Ball zu. Du nimmst die Gelegenheit wahr und schmetterst den Ball ins andere Eck der Tischtennisplatte zurück. Zeichne für diese Situation eine mögliche Anordnung der Pfeile von  $\vec{v}_B$ ,  $\Delta\vec{v}$  und  $\vec{v}_E$ .

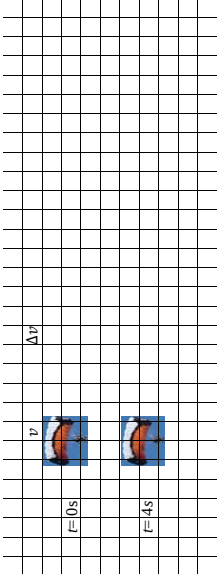
7. Kevin spielt gern Flipper. Er trifft die Kugel ziemlich gut, katapultiert sie damit zurück in den Flipperkasten und bekommt eine Menge Punkte. Zeichne eine Situation ins Heft, in der Kevin die Kugel trifft und diese wieder zurück in den Kasten fliegt. Zeichne für diese Situation eine mögliche Anordnung der Pfeile von  $\vec{v}_A$ ,  $\Delta\vec{v}$  und  $\vec{v}_E$ .

6. Zeichne die Geschwindigkeitspfeile von  $v_A$ ,  $v_E$  und  $\Delta v$  beim Elfmeterschießen.

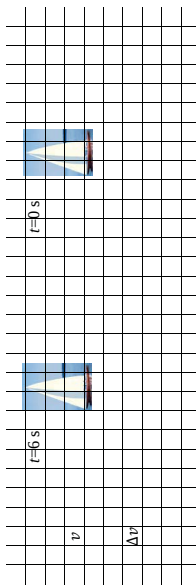
7. Kevin fährt mit seinem Skateboard eine Rampe hinab. Dabei wird er beschleunigt. Zeichne für diese Situation eine mögliche Stroboskoptafel mit für die Geschwindigkeit  $v$  und die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .



8. Ein Fallschirmspringer zieht bei  $t = 0$  s die Reißleine von seinem Fallschirm. Dadurch wird der Fallschirmspringer abgebremst (negativ beschleunigt). Zeichne für diese Situation nach  $t = 4$  s eine mögliche Stroboskoptafel mit den Pfeilen für die Geschwindigkeit  $v$  und die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .  
Tipp: Vergleiche mit Bild 4.16 im Schülerheft



9. Tims Hobby ist Segeln. Auf dem Gardasee fährt er mit seinem Boot bei einer guten Brise schön dahin. Das Boot wird dabei durch einen Wind im Segel beschleunigt. Zeichne für diese Situation eine mögliche Stroboskoptabelle mit für die Geschwindigkeit  $v$  und die Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$ .  
Tipp: Achte auf die Zeitpunkte, d. h. die Richtung des Boots!



10. Diskutiere mit deinen Mitschülern folgende Behauptungen:

Hannah sagt: „Der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung und der Pfeil der Endgeschwindigkeit zeigen bei allen Bewegungen immer in die gleiche Richtung.“

Leonie sagt: „Der Pfeil der Endgeschwindigkeit kann nie länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit.“

Aische sagt: „Um eine Bewegung umzukehren muss der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit, damit der Körper die Richtung ändert.“

---

---

---

---

---

---

---

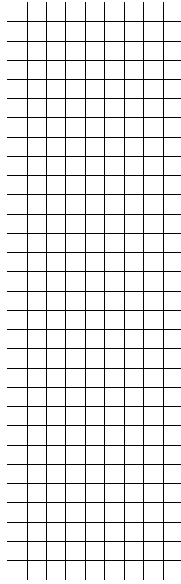
---

---

---

24

8. Tims Hobby ist Surfen. Auf dem Gardasee fährt er mit seinem Surfbrett bei leichter Brise schön gemütlich dahin. Plötzlich kommt eine starke Windböe. Tims Tempo wird größer und es treibt ihn ein Stück von seinem Kurs ab. Skizziere das Surfbrett in deinem Heft und zeichne eine mögliche Anordnung der Pfeile von  $v_A$ ,  $\Delta v$  und  $v_E$ .



9. Diskutiere mit deinen Mitschülern folgende Behauptungen:

Hannah sagt: „Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit und der Pfeil der Endgeschwindigkeit zeigen bei allen Bewegungen immer in die gleiche Richtung.“

Leonie sagt: „Der Pfeil der Endgeschwindigkeit kann nie länger sein als der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit.“

Aische sagt: „Beim Tennis muss der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger sein als der Pfeil der Anfangsgeschwindigkeit, damit der Ball zum Gegner zurückfliegt.“

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

23

[illegible]

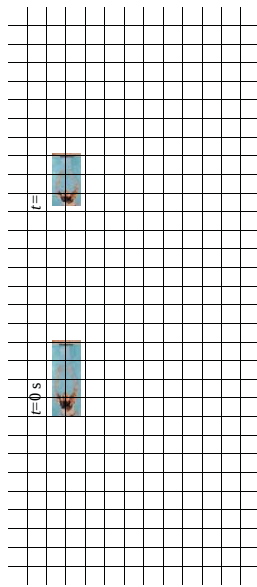
A full page of blank graph paper with a uniform grid of small squares. The grid consists of 20 columns and 20 rows, creating a total of 400 small squares. The lines are thin and black, set against a white background. There are no margins or additional markings on the page.

a) Die Anfangsgeschwindigkeit ist null ( $v_A = 0$ ), die Geschwindigkeitsänderung und die Endgeschwindigkeit aber nicht ( $\Delta v$  und  $v_E \neq 0$ ).

b) Die Endgeschwindigkeit ist null ( $v_E = 0$ ), die Anfangsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsänderung aber nicht ( $\Delta v$  und  $v_A \neq 0$ ).

c) Die Geschwindigkeitsänderung ist null ( $\Delta v = 0$ ), die Anfangs- und die Endgeschwindigkeit aber nicht ( $v_A$  und  $v_E \neq 0$ ).

12. Kim schwimmt auf eine Düse im Schwimmbad zu. Durch die Düse verändert sich ihre Geschwindigkeit. Zeichne eine Stroboskop-tabelle, aus der die Bewegung deutlich wird.



Zusammenfassung - eigene Notizen:

25

Zusammenfassung - eigene Notizen:

26

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

4.2 Beschleunigung

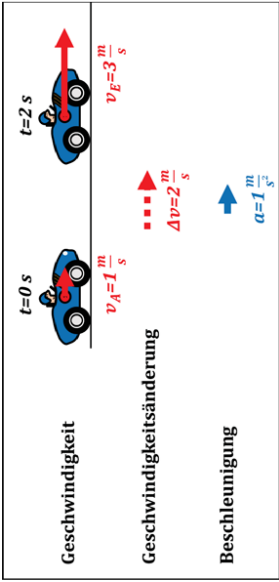
Information

Die **Beschleunigung**  $a$  gibt an wie stark sich die Geschwindigkeit pro Zeit verändert. Sie ist eine eigene Größe mit einer eigenen Einheit;  $\frac{m}{s^2}$ . Der Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsänderung, der Beschleunigung und der Zeit ist dabei folgender:

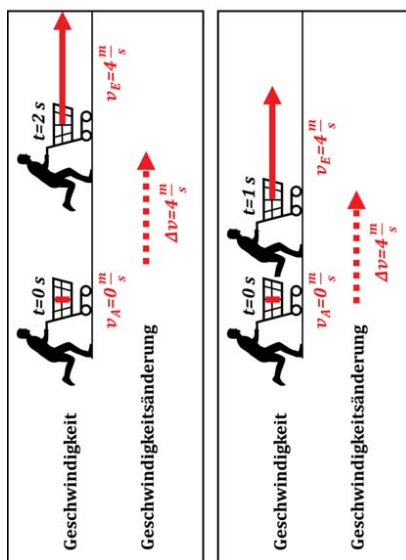
$$\Delta v = a \cdot \Delta t$$

Je länger es eine Beschleunigung gibt, desto größer ist die Geschwindigkeitsänderung. Die Beschleunigung  $a$  wird ebenfalls in einer neuen Zeile mittig unter dem Stroboskopbild zwischen den beiden betrachteten Zeitpunkten eingezeichnet. Wir verwenden außerdem für die Beschleunigung eine andere Farbe, um sie nicht mit der Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsänderung zu verwechseln.

Beispiel einer Stroboskoptabelle mit Geschwindigkeitsänderung und Beschleunigung:



1. Gegeben sind die unteren beiden Stroboskopabbildungen.



Entscheide begründet, in welcher Stroboskopabbildung die Beschleunigung des Einkaufswagens größer ist.

---

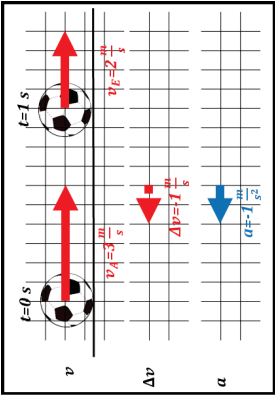
---

---

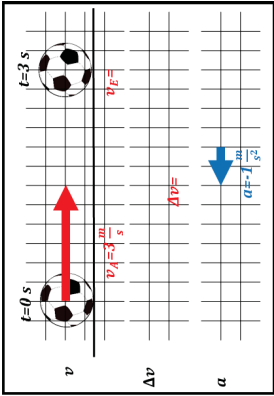
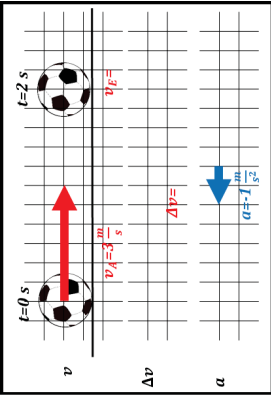
---

---

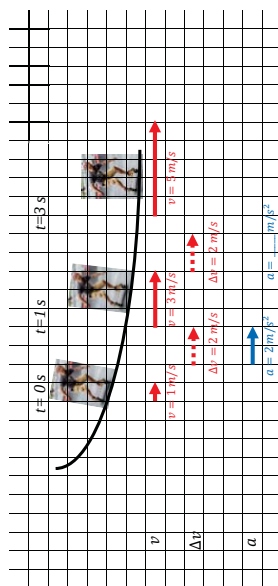
2. Gegeben ist folgende Stroboskoptabelle eines Fußballs.



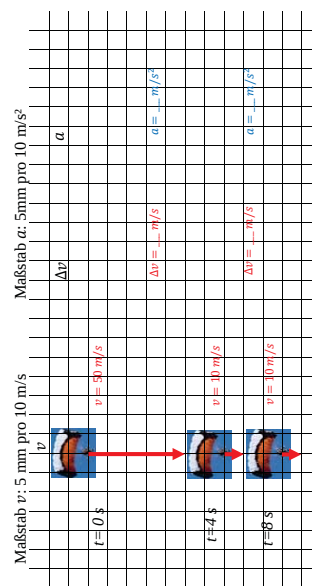
Konstruiere für die folgenden beiden Stroboskoptabellen jeweils den Pfeil der Geschwindigkeitsänderung und den Pfeil der Endgeschwindigkeit.  
Hinweis: Die Beschleunigung ist in allen Stroboskoptabellen gleich.



3. Kevin fährt mit seinem Skateboard eine Halfpipe hinab. Dabei wird er beschleunigt. Ergänze in der Stroboskopstabelle die fehlende Beschleunigung  $a$  im zweiten Zeitintervall. (Zur Besserung Übersicht wurde die Geschwindigkeit auch in einer neuen Zeile gezeichnet)



4. Ein Fallschirmspringer zieht bei  $t = 0\text{ s}$  die Reißleine von seinem Fallschirm. Dadurch wird er bis  $t = 4\text{ s}$  abgebremst (negativ beschleunigt). Danach fällt er mit gleichbleibender Geschwindigkeit. Ergänze in dem Stroboskopbild die Geschwindigkeitsänderungen und Beschleunigung in den beiden Zeitintervallen.



[illegible]

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

## 5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung

### 5.1 Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

#### Information

Je größer die Einwirkungsstärke einer **Kraft** ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$ , die der Körper erhält.  
Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke einer Kraft ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

#### 1. Kreuze die richtigen Antworten an:

Welche Begriffe werden in der Physik unter dem Begriff der Kraft zusammengefasst?

- ☐ Einwirkungsrichtung
- ☐ Einwirkungsdauer
- ☐ Einwirkungsart
- ☐ Einwirkungsstärke
- ☐ Einwirkungsort
- ☐ Einwirkungslage

27

## 5. Die Newton'sche Bewegungsgleichung

### 5.1 Kraft und Beschleunigung

#### Information

Je größer die Einwirkungsstärke einer **Kraft** ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist die Beschleunigung  $a$ , die der Körper erhält.  
Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsstärke einer Kraft ist der Pfeil der Beschleunigung länger.

#### 1. Kreuze die richtigen Antworten an:

Welche Begriffe werden in der Physik unter dem Begriff der Kraft zusammengefasst?

- ☐ Einwirkungsrichtung
- ☐ Einwirkungsdauer
- ☐ Einwirkungsart
- ☐ Einwirkungsstärke
- ☐ Einwirkungsort
- ☐ Einwirkungslage

33

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Anleitung zur Simulation „Kraft und Beschleunigung“

1. Öffne die Datei „force-and-motion-basics\_de.html“ im Internet-Browser.

2. Klicke dann zweimal auf das Bild für Bewegung. In diesem Modus berücksichtigt die Simulation **keine Reibung** zwischen dem Wagen und dem Boden!

3. Blende in der Simulation als erstes die Werte und die Geschwindigkeit ein, indem du rechts oben die Häkchen setzt (außer bei „Masse“). Dein Bild sieht nun aus wie rechts gezeigt.

4. Du kannst nun mit den Pfeilen unten die Richtung und den Betrag der Kraft einstellen, die das Männchen auf die Kiste und den Wagen ausübt. Probiere aus, wie sich die Bewegung bei unterschiedlichen Kräften verändert.

5. Du kannst auch die Simulation mit der Pause-Taste **U** anhalten und die ausgeübte Kraft verändern. Mit der Start-Taste **S** kannst du sie dann wieder starten.

6. Um alle Eingaben zurückzusetzen, klicke einfach auf „Reset“ **R**. Danach musst du wieder die Werte und die Geschwindigkeit neu einblenden (siehe Schritt 2).

Tipp:

- Nach dem Reset ist es oft hilfreich, die Simulation mit der Pause-Taste anzuhalten, um vor dem Start die Kraft einzustellen.
- Mit der Schritt-Taste **S** neben der Pause-Taste kannst du bei angehaltener Simulation ein Bild weiterspringen. Dies kann sehr hilfreich sein, wenn man eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit auf dem Tacho einstellen möchte.

34

Anleitung zur Simulation „Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit“

1. Öffne die Anwendung „Stoss“ über den Explorer.

Schiebe den Regler „Masse“ ganz nach links, so dass die Kugel kleiner werden. Der Regler „Geschwindigkeit“ bestimmt die Anfangsgeschwindigkeit der Kugel. Dieser bleibt unverändert.

2. Wähle den „Modus Zielstoß aus Bewegung“ aus.

3. Jetzt kannst du die Feder mit der Maus beliebig verstellen. Es gilt: Je tiefer die Feder nach unten gezogen wird, desto gespannter ist sie und desto größer ist die Einwirkungsstärke, die sie erzeugt.

4. Klicke auf „Start“, um zu sehen, was passiert. Mit „Stop“ kannst du die Simulation wieder anhalten.

5. Um den Stoß mit unterschiedlichen Federeneinstellungen auszuprobieren, musst du auf „Reset“ klicken. Probiere aus, wie sich die Bewegung bei unterschiedlichen Federspannungen verändert.

6. Durch einen Klick auf das Kästchen neben „Vektorepfeile anzeigen“, kannst du dir die Geschwindigkeitspfeile anzeigen lassen.

Tipp: Mit „Schritt vor“ kannst du bei angehaltener Simulation ein Bild weiterspringen.

28

**Zusammenhang zwischen Einwirkungsstärke und Zusatzgeschwindigkeit**

Mit den folgenden Aufgaben untersuchst du den Zusammenhang zwischen der Einwirkungsstärke und der Zusatzgeschwindigkeit.

2. Erkläre, wie du im Stroboskopbild der Simulation die Anfangsgeschwindigkeit, Endgeschwindigkeit und Zusatzgeschwindigkeit erkennen kannst!

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. Starte die Simulation mit unterschiedlich gespannter Feder.

Betrachte die Stroboskopbilder der Bewegung der Kugel und beschreibe, wie sie sich unterscheiden.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

29

**Beschleunigung aus dem Stand**

Mit den folgenden Aufgaben untersuchst du den Einfluss einer Kraft auf die Beschleunigung, wenn ein Fahrzeug aus dem Stand anfährt. Dabei wird die Reibung zwischen dem Wagen und dem Boden nicht berücksichtigt!

2. Erkläre, wie du in der Simulation die Geschwindigkeiten und die Geschwindigkeitsänderung erkennen kannst!

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

3. Beschleunige den Wagen aus dem Stand („Reset“ und „Pause“) und bestimme die Endgeschwindigkeit des Wagens jeweils nach 4 Sekunden bei einer kleinen Kraft (z. B. 100N) und einer doppelt so großen Kraft (200N).

a) Notiere in der Tabelle die Endgeschwindigkeit  $v_e$ .

| Kraft in N | Dauer in s | $v_e$ in m/s | $\Delta v$ in m/s | $a$ in m/s <sup>2</sup> |
|------------|------------|--------------|-------------------|-------------------------|
| 100        | 4          | 0,0          |                   |                         |
| 200        | 4          | 0,0          |                   |                         |

Hinweis: Wiederhole für einen zuverlässigen Wert jede „Messung“ mehrfach.

b) Berechne die Geschwindigkeitsänderungen  $\Delta v$  und die Beschleunigungen  $a$  und ergänze sie in der Tabelle.

c) Zeichne für beide Fälle eine Stroboskop-tabelle (Maßstab 1mm für 1m/s).

kleine Kraft  $t=0\text{ s}$   $t=4\text{ s}$   $t=0\text{ s}$   $t=4\text{ s}$

doppelte Kraft

$v$

$\Delta v$

$a$

35

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

4. Vergleiche die Geschwindigkeitspeile nach dem Stoß bei einer schwach gespannten und einer doppelt so stark gespannten Feder.

a) Skizziere die Geschwindigkeitspeile in dein Heft.

schwath gespannte Feder      doppelt so stark gespannte Feder

b) Welche Pfeile sind in beiden Fällen gleich lang? Erkläre warum.

|  |
|--|
|  |
|  |
|  |

c) Welche Pfeile haben in beiden Fällen die gleiche Richtung? Erkläre warum.

---

---

---

---

d) Wie unterscheiden sich die Pfeile der Zusatzgeschwindigkeit? Erkläre warum.

---

---

---

---

---

---

30

d) **Vergleiche die Beschleunigung für die beiden Kräfte und formuliere eine Vermutung:**

---

---

---

---

e) Überprüfe deine Vermutungen durch weitere „Messungen“ mit der Simulation.

| Kraft in N | Dauer in s | $v_a$ in m/s | $v_e$ in m/s | $\Delta v$ in m/s | $a$ in $m/s^2$ |
|------------|------------|--------------|--------------|-------------------|----------------|
|            | 4          |              |              |                   |                |
|            | 4          |              |              |                   |                |

**4. Probiere aus:**

a) Welche Kraft muss der Wagen ungefähr erhalten, um aus dem Stand in 4 Sekunden auf 10 m/s zu beschleunigen?

b) Welche Kraft muss der Wagen ungefähr erhalten, um aus dem Stand in 8 Sekunden auf 10 m/s zu beschleunigen?

c) Trage die Kräfte in die Tabelle ein. Berechne die Beschleunigungen aus der Dauer und der Geschwindigkeitsänderung.

| Kraft in N | Dauer in s | $v_d$ in m/s | $v_e$ in m/s | $\Delta v$ in m/s | $a$ in m/s <sup>2</sup> |
|------------|------------|--------------|--------------|-------------------|-------------------------|
|            | 4          | 0,0          | 10           |                   |                         |
|            | 8          | 0,0          | 10           |                   |                         |
|            |            |              |              |                   |                         |

d) Wähle eine weitere Dauer aus und vermute, welche Kraft benötigt wird, um aus dem Stand auf 10 m/s zu beschleunigen.

**Überprüfe deine Vermutung mit der Simulation und ergänze die Werte in der Tabelle.**

36



**Kraft und Richtung der Bewegung**  
Beachte, dass die Simulation in diesem Modus keine Reibung zwischen dem Wagen und dem Boden berücksichtigt, die den Wagen von selbst abbrennst.

5. Bringe den Wagen auf eine Anfangsgeschwindigkeit und halte dann die Simulation an.

a) Probiere dann aus, was passiert, wenn

- keine weitere Kraft auf den Wagen ausgeübt wird, d. h. die Figur nicht weiter schiebt.
- eine Kraft in Richtung der Bewegung ausgeübt wird, d. h. die Figur in dieselbe Richtung weiterschiebt.
- Eine Kraft entgegengesetzt zur Bewegung ausgeübt wird, d. h. die Figur in die Gegenrichtung schiebt.

b) Überlege, was du tun musst, um die Richtung der Bewegung umzukehren. Wie kamst du den Wagen wieder anhalten? Formuliere Vermutungen.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

c) Überprüfen deine Vermutung mit der Simulation.

\_\_\_\_\_

**Zusammenhang zwischen Einwirkungsrichtung und Zusatzgeschwindigkeit**

6. Mit den Pfeilen unter der Feder kannst du die Ausrichtung der Feder nach links und rechts verändern. Damit veränderst du die Einwirkungsrichtung.



Versuche erneut die Feder durch Spannung und Richtung so einzustellen, dass die untere Kugel die obere, mitbewegte Kugel trifft.

a) Was passiert, wenn du die Einwirkungsrichtung nach rechts oder nach links veränderst. Beschreibe deine Beobachtungen.

\_\_\_\_\_

Wenn man die Einwirkungsrichtung nach rechts verändert, dann

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Wenn man die Einwirkungsrichtung nach links verändert, dann

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

b) Beschreibe, wie sich die Zusatzgeschwindigkeit mit der Einwirkungsrichtung dabei jeweils verändert.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Kraft und Richtung der Bewegung**  
Beachte, dass die Simulation in diesem Modus keine Reibung zwischen dem Wagen und dem Boden berücksichtigt, die den Wagen von selbst abbrennst.

5. Bringe den Wagen auf eine Anfangsgeschwindigkeit und halte dann die Simulation an.

a) Probiere dann aus, was passiert, wenn

- keine weitere Kraft auf den Wagen ausgeübt wird, d. h. die Figur nicht weiter schiebt.
- eine Kraft in Richtung der Bewegung ausgeübt wird, d. h. die Figur in dieselbe Richtung weiterschiebt.
- Eine Kraft entgegengesetzt zur Bewegung ausgeübt wird, d. h. die Figur in die Gegenrichtung schiebt.

b) Überlege, was du tun musst, um die Richtung der Bewegung umzukehren. Wie kamst du den Wagen wieder anhalten? Formuliere Vermutungen.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

c) Überprüfen deine Vermutung mit der Simulation.

\_\_\_\_\_

**Zusammenhang zwischen Einwirkungsrichtung und Zusatzgeschwindigkeit**

6. Mit den Pfeilen unter der Feder kannst du die Ausrichtung der Feder nach links und rechts verändern. Damit veränderst du die Einwirkungsrichtung.



Versuche erneut die Feder durch Spannung und Richtung so einzustellen, dass die untere Kugel die obere, mitbewegte Kugel trifft.

a) Was passiert, wenn du die Einwirkungsrichtung nach rechts oder nach links veränderst. Beschreibe deine Beobachtungen.

\_\_\_\_\_

Wenn man die Einwirkungsrichtung nach rechts verändert, dann

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Wenn man die Einwirkungsrichtung nach links verändert, dann

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

b) Beschreibe, wie sich die Zusatzgeschwindigkeit mit der Einwirkungsrichtung dabei jeweils verändert.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

33

[illegible]

295

## 5.2 Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit

## Information

Je größer die **Einwirkungsdauer** einer **Kraft** ist, die auf einen Körper ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$ , die der Körper erhält.

Das bedeutet, bei größerer Einwirkungsdauer einer Kraft ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit länger.

## 1. Streiche das Falsche weg:

Die gleiche Zusatzgeschwindigkeit kann

- über eine Kraft mit **kleiner** Einwirkungsstärke und mit **langer** / **kurzer** Einwirkungsdauer
- oder über eine Kraft mit **großer** Einwirkungsstärke und mit **langer** / **kurzer** Einwirkungsdauer erreicht werden.

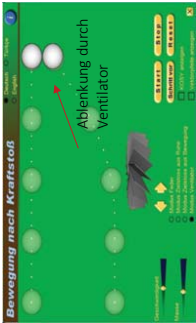
Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Anleitung zur Simulation: „Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit“

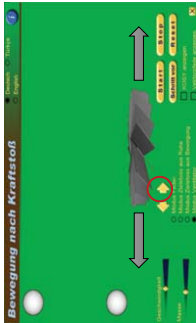
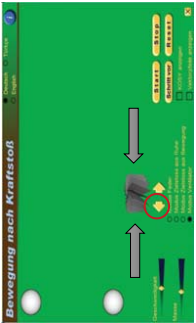
1. Wähle jetzt den „Modus Ventilator“ aus.



2. Klicke auf „Start“, um die Simulation zu beginnen.  
Der Ventilator beginnt sich zu drehen. Die Kugel erfährt eine konstante Einwirkung während sie am Ventilator vorbeifliegt.



3. Mit den Pfeiltasten unterhalb des Ventilators kann die Breite des Ventilators eingestellt werden.  
Damit veränderst du die **Einwirkungsdauer** auf die Kugel.





c) Welche Pfeile haben in beiden Fällen die gleiche Richtung? Erkläre warum.

---

---

---

---

d) Wie unterscheiden sich die Pfeile der Zusatzgeschwindigkeit? Erkläre warum.

---

---

---

---

4. Jetzt soll auch die Anfangsgeschwindigkeit der Kugel variiert werden. Kannst du die Breite des Ventilators und die Anfangsgeschwindigkeit so einstellen, dass du bei verschiedenen Einstellungen die gleiche Zusatzgeschwindigkeit erhältst?

a) Erläutere, welchen Einfluss die Anfangsgeschwindigkeit und die Breite des Ventilators auf die Einwirkungsdauer haben.

Je größer die Anfangsgeschwindigkeit ist, desto \_\_\_\_\_

Je breiter der Ventilator ist, desto \_\_\_\_\_

b) Formuliere deine Überlegungen, wie eine kleinere Anfangsgeschwindigkeit durch die Breite des Ventilators ausgeglichen werden kann. Überprüfe dies mit der Simulation.

---

---

---

---

38

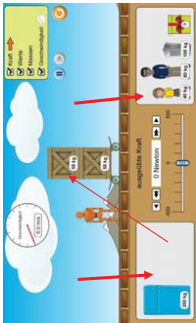
5.2 Masse und Beschleunigung

Information

Je größer die **Masse** eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist die Beschleunigung  $a$ , die der Körper erhält. (bei gleicher Kraft)

Anleitung zur Simulation: „Masse und Beschleunigung“

- 1. Starte die Simulation wieder im Modus „Bewegung“. Unten links und rechts sind Objekte (Kühlschrank, Kiste, Kind, Mann usw.), die eine **unterschiedliche Masse** haben. Du kannst diese Objekte mit der Maus auf dem Wagen platzieren.
- 2. Mit dem Häkchen oben rechts, wendest du die Massen der verschiedenen Objekte an.



Beschleunigung von Massen aus dem Stand

Mit den folgenden Aufgaben untersuchst du den Einfluss der Masse auf die Beschleunigung, wenn ein Fahrzeug mit derselben Kraft aus dem Stand anfährt. Dabei wird die Reibung zwischen dem Wagen und dem Boden nicht berücksichtigt!

- 1. Beschleunige den Wagen mit derselben Kraft (z. B. 200 N) aus dem Stand und bestimme für eine kleine Masse (z. B. 50 kg) und eine doppelt so große Masse (100 kg) die Endgeschwindigkeit des Wagens jeweils nach 4 Sekunden.

a) Notiere in der Tabelle die Endgeschwindigkeit  $v_e$ .

| Kraft<br>in N | Masse<br>in kg | Dauer<br>in s | $v_a$<br>in m/s | $v_e$<br>in m/s | $\Delta v$<br>in m/s | $a$<br>in $m/s^2$ |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------------|
| 200           | 50             | 4             | 0,0             |                 |                      |                   |
| 200           | 100            | 4             | 0,0             |                 |                      |                   |

Hinweis: Wiederhole für einen zuverlässigen Wert jede „Messung“ mehrfach.

- b) Berechne die Geschwindigkeitsänderungen  $\Delta v$  und die Beschleunigungen  $a$  und ergänze sie in der Tabelle.

5.3 Masse und Zusatzgeschwindigkeit

Information

Je größer die **Masse** eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta v$ , die der Körper erhält (sofern die Kraft und Einwirkungsdauer gleichbleiben).

Anleitung zur Simulation: „Masse und Zusatzgeschwindigkeit“

- 1. Verwende den „Modus Feder“. Mit dem Regler unten links kannst du die Masse verändern. Das verändert die Trägheit der Kugel.
- Lasse die Anfangsgeschwindigkeit unverändert.
- Verwende immer dieselbe Einwirkungsstärke, d. h. spanne die Feder immer gleich (z. B. bis zur zweiten Markierung)



Stelle unterschiedliche Massen ein und starte die Simulation.

Betrachte die Stroboskopbilder der Bewegung der Kugeln und beschreibe, wie sie sich unterscheiden.

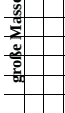
2. Vergleiche die Geschwindigkeitspfeile nach dem Stoß bei einer kleinen und einer großen Masse.

a) Skizziere die Geschwindigkeitspfeile in dein Heft.

kleine Masse



große Masse



$v$

$\Delta v$

$a$

$t=0\text{ s}$

$t=4\text{ s}$

$t=8\text{ s}$

$t=0\text{ s}$

$t=4\text{ s}$

$t=8\text{ s}$

b) Welche Pfeile sind in beiden Fällen gleich lang? Erkläre warum.

c) Wie unterscheiden sich die Pfeile der Zusatzgeschwindigkeit? Erkläre warum.

c) Zeichne für beide Fälle eine Stroboskoptablette (Maßstab 1mm für 1m/s).

kleine Masse



gleiche Kraft

$t=0\text{ s}$

$t=4\text{ s}$

$t=8\text{ s}$

doppelte Masse



$t=0\text{ s}$

$t=4\text{ s}$

$t=8\text{ s}$

d) Vergleiche die Beschleunigung für die beiden Kräfte und formuliere eine Vermutung:

e) Überprüfe deine Vermutungen durch weitere „Messungen“ mit der Simulation.

| Kraft<br>in N | Masse<br>in kg | Dauer<br>in s | $v_a$<br>in m/s | $v_e$<br>in m/s | $\Delta v$<br>in m/s | $a$<br>in m/s <sup>2</sup> |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
| 200           |                | 4             | 0,0             |                 |                      |                            |
| 200           |                | 4             | 0,0             |                 |                      |                            |

2. Finde heraus:

- Welche Kraft muss ein doppelt so schwerer Wagen erfahren, um genauso stark zu beschleunigen wie ein leichter Wagen?
- Mit welcher Kraft muss ein 150kg schwerer Wagen ungefähr beschleunigt werden, um aus dem Stand in 4 Sekunden auf 10 m/s zu kommen?
- Welche Masse hat das Geschenk?

Trage die Werte in die Tabelle ein. Berechne die Beschleunigungen aus der Dauer und der Geschwindigkeitsänderung.

| Kraft in<br>N | Masse<br>in kg | Dauer<br>in s | $v_a$ in<br>m/s | $v_e$ in<br>m/s | $\Delta v$ in<br>m/s | $a$ in<br>m/s <sup>2</sup> |
|---------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------------|
|               |                | 4             | 0,0             |                 |                      |                            |
|               |                | 4             | 0,0             |                 |                      |                            |
|               |                | 4             | 0,0             |                 |                      |                            |
|               |                |               |                 |                 |                      |                            |
|               |                |               |                 |                 |                      |                            |

3. Du darfst jetzt alle Regler beliebig einstellen und auch beliebige Objekte nehmen.

- Ordne zu, welche Größe du womit direkt einstellen kannst

|                    |        |                     |
|--------------------|--------|---------------------|
| Stärke der Kraft   | Objekt | beschleunigte Masse |
| Richtung der Kraft |        | Einwirkungsstärke   |
|                    |        | Einwirkungsrichtung |

- Mit welchen Einstellungen erreichst du in kürzester Zeit aus dem Stand die Maximalgeschwindigkeit (40 m/s)? Begründe deine Überlegung.

---



---



---



---

41

3. Du darfst jetzt alle Regler beliebig einstellen und auch die Feder beliebig spannen.

- Ordne zu, welche Größe du womit direkt einstellen kannst.

|                       |                        |
|-----------------------|------------------------|
| Geschwindigkeit       | Masse                  |
| Volumen der Kugel     | Einwirkungsstärke      |
| Auslenkung der Feder  | Einwirkungsrichtung    |
| Ausrichtung der Feder | Anfangsgeschwindigkeit |

- Mit welchen Einstellungen erhältst du die größtmögliche Endgeschwindigkeit? Begründe deine Überlegung.

---

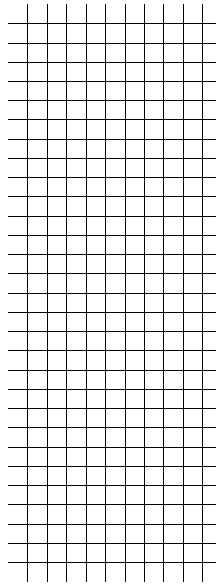


---



---

- Überprüfe deine Überlegung in der Simulation. Zeichne auch das dazugehörige Pfeilbild.



41

[illegible]

303

## 6. Anwendung der Newton'schen Bewegungsgleichung

### 6.1 Alltagsanwendungen

#### Information

Die Newton'sche Bewegungsgleichung lautet:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

#### 1. Streiche das Falsche weg:

- Wenn auf einen Körper eine Kraft  $F$  ausgeübt wird, erhält dieser eine **Beschleunigung / Anfangsgeschwindigkeit**.
- Die Richtung der Kraft und die Richtung der Beschleunigung sind **gleich / verschieden**.
- Je **größer** die Einwirkungsstärke einer Kraft  $F$  ist, desto **größer / kleiner** ist die **Beschleunigung  $a$**  (bei jeweils gleicher Masse).
- Je **größer** die Masse  $m$  des Körpers ist, desto **größer / kleiner** ist die **Beschleunigung  $a$**  (bei jeweils gleicher Kraft).

#### 2. Verteilt euch in Gruppen auf die Beispiele c) bis i) zur Newton'schen Bewegungsgleichung auf den Seiten 19 bis 21 im Schülerheft und erstellt dazu ein Poster.

Das Poster soll dabei folgende Punkte beinhalten:

1. Schildere die **Situation**, die in dem Beispiel genannt wird.
2. Gib an, welche **Größen der Newton'schen Bewegungsgleichung** in der Situation **bewusst verändert bzw. konstant gehalten** werden.
3. Erkläre mit der Newton'schen Bewegungsgleichung, welche **Konsequenz** sich dadurch **für die wirkende Kraft oder die Bewegung** in der Situation ergibt.

43

## 6. Anwendung der Newton'schen Bewegungsgleichung

### 6.1 Alltagsanwendungen

#### Information

Die Newton'sche Bewegungsgleichung lautet:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}$$

#### 1. Streiche das Falsche weg:

- Wenn auf einen Körper eine Kraft  $\vec{F}$  ausgeübt wird, erhält dieser eine **Zusatzgeschwindigkeit / Anfangsgeschwindigkeit**.
- Die Richtung der Kraft und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind **gleich / verschieden**.
- Je **größer** die Einwirkungsstärke einer Kraft  $\vec{F}$  ist, desto **größer / kleiner** ist das **Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$**  (bei jeweils gleicher Einwirkungsdauer und Masse).
- Je **länger** die Einwirkungsdauer  $\Delta t$  ist, desto **größer / kleiner** ist das **Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$**  (bei jeweils gleicher Kraft und Masse).
- Je **größer** die Masse  $m$  des Körpers ist, desto **größer / kleiner** ist das **Tempo der Zusatzgeschwindigkeit  $\Delta \vec{v}$**  (bei jeweils gleicher Kraft und Einwirkungsdauer).

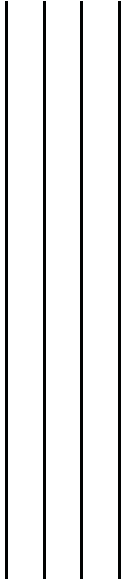
#### 2. Verteilt euch in Gruppen auf die Beispiele c) bis i) zur Newton'schen Bewegungsgleichung auf den Seiten 19 bis 21 im Schülerheft und erstellt ein Poster.

Das Poster soll dabei folgende Punkte beinhalten:

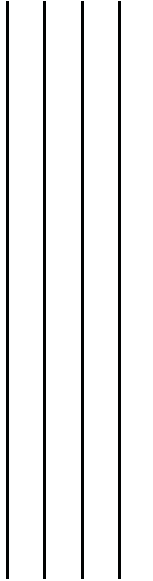
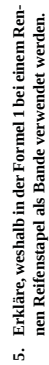
1. Schildere die **Situation**, die in dem Beispiel genannt wird.
2. Gib an, welche **Größen der Newton'schen Bewegungsgleichung** in der Situation **bewusst verändert bzw. konstant gehalten** werden.
3. Erkläre mit der Newton'schen Bewegungsgleichung, welche **Konsequenz** sich dadurch **für die wirkende Kraft oder die Bewegung** in der Situation ergibt.

43

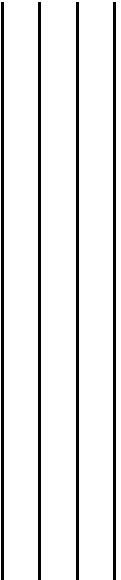
- Wer übt eine Kraft aus?
- Auf wen wird eine Kraft ausgeübt?
- Kannst du  $\Delta t$ ,  $\Delta \vec{v}$ ,  $\vec{F}$  und  $m$  zuordnen?



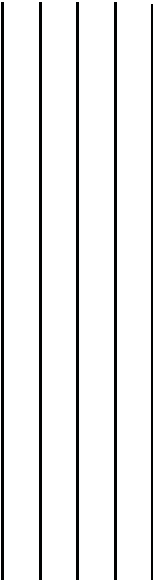
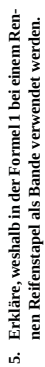
|  |
|--|
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |



- Wer übt eine Kraft aus?
- Auf wen wird eine Kraft ausgeübt?
- Kannst du  $F$ ,  $m$  und  $a$  zuordnen?



|  |
|--|
|  |
|  |
|  |
|  |
|  |



6. Ein Regentropfen trifft ein fahrendes Auto. Natürlich erhält das Auto dadurch eine Zusatzgeschwindigkeit. Warum merkst du davon im Auto nichts?

---

---

---

---

---

7. Mountainbiker fahren oft „Fullies“ (vorne und hinten gefedert). Erkläre, warum das bei einem Downhill hilfreich ist.

---

---

---

---

---

45

6. Ein Regentropfen trifft ein fahrendes Auto. Natürlich erhält das Auto dadurch eine (abbremsende) Beschleunigung. Warum merkst du davon im Auto nichts?

---

---

---

---

---

7. Mountainbiker fahren oft „Fullies“ (vorne und hinten gefedert). Erkläre, warum das bei einem Downhill hilfreich ist.

---

---

---

---

---

45

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Zusammenfassung - eigene Notizen:

46

Zusammenfassung - eigene Notizen:

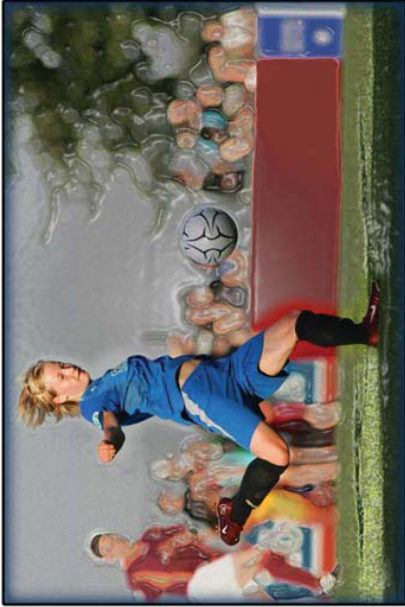
46

Workbooks: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)



## **C.3 Unterrichtsverlaufspläne**

Anbei sind die Unterrichtsverlaufspläne für beide Mechaniklehrgänge abgebildet. Für einen direkten Vergleich sind immer die entsprechenden analog aufgebauten Seiten für das 2DD-Mechanikkonzept und für die 1D-Adaption nebeneinander dargestellt (oben entspricht immer dem 2DD-Mechanikkonzept und unten der 1D-Adaption). Wird in der Darstellung eine leere Seite gezeigt, gibt es kein Analogon im anderen Verlaufsplan.



## **Einführung in die Mechanik**

## **Verlaufspläne**



## **Einführung in die Mechanik**

## **Verlaufspläne**

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

### **Einführung in die Mechanik – Verlaufspläne**

#### **Inhaltsverzeichnis**

1. Darstellung und Beschreibung von Bewegungen
2. Tempo
3. Richtung und Geschwindigkeit
4. Zusatzgeschwindigkeit
5. Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit
6. Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit / Masse und Zusatzgeschwindigkeit
7. Die Newton'sche Bewegungsgleichung

### **Einführung in die Mechanik – Verlaufspläne**

#### **Inhaltsverzeichnis**

1. Darstellung und Beschreibung von Bewegungen
2. Geschwindigkeit
3. Richtung und Geschwindigkeitspfeile
4. Geschwindigkeitsänderung
5. Beschleunigung
6. Kraft, Beschleunigung und Masse
7. Die Newton'sche Bewegungsgleichung

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

|                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Autoren:</b><br/>Prof. Dr. Heiko Krabbe<br/>Marco Seiter</p>                                                                                                        | <p><b>RUHR<br/>UNIVERSITÄT<br/>BOCHUM</b></p> <p><b>RUB</b></p>                                                                                                |
| <p>Ruhr-Universität Bochum, Fakultät<br/>für Physik und Astronomie AG<br/>Didaktik der Physik<br/>Universitätsstraße 150<br/>44801 Bochum</p>                             | <p> <b>RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM</b><br/>FAKULTÄT FÜR PHYSIK UND ASTRONOMIE</p> |
| <p>Prof. Dr. habil Thomas Wilhelm</p> <p>Goethe-Universität Frankfurt a.M.<br/>Institut für Didaktik der Physik<br/>Max-von-Laue-Straße 1<br/>60438 Frankfurt am Main</p> | <p> <b>GOETHE<br/>UNIVERSITÄT</b><br/>FRANKFURT AM MAIN</p>                   |
| <p>©Copyright August 2019</p>                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                |

|                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Autoren:</b><br/>Prof. Dr. Heiko Krabbe<br/>Marco Seiter</p>                                                                                                        | <p><b>RUHR<br/>UNIVERSITÄT<br/>BOCHUM</b></p> <p><b>RUB</b></p>                                                                                                  |
| <p>Ruhr-Universität Bochum<br/>Fakultät für Physik und Astronomie<br/>AG Didaktik der Physik<br/>Universitätsstraße 150<br/>44801 Bochum</p>                              | <p> <b>RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM</b><br/>FAKULTÄT FÜR PHYSIK UND ASTRONOMIE</p> |
| <p>Prof. Dr. habil Thomas Wilhelm</p> <p>Goethe-Universität Frankfurt a.M.<br/>Institut für Didaktik der Physik<br/>Max-von-Laue-Straße 1<br/>60438 Frankfurt am Main</p> | <p> <b>GOETHE<br/>UNIVERSITÄT</b><br/>FRANKFURT AM MAIN</p>                   |
| <p>©Copyright August 2019</p>                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                  |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Thema der 1. Unterrichtseinheit:

- Darstellung und Beschreibung von Bewegungen

Länge der Einheit:

Ca. 70 Min

Lernziele der Einheit:

Die SuS können

- benennen, was zur Darstellung und Beschreibung einer Bewegung angegeben werden muss.
- beschreiben, wie Stroboskopbilder für Bewegungen erstellt werden.
- erklären, wie mit Hilfe von Stroboskopbildern Bewegungen dargestellt werden.

Thema der 1. Unterrichtseinheit:

- Darstellung und Beschreibung von Bewegungen

Länge der Einheit:

Ca. 70 Min

Lernziele der Einheit:

Die SuS können

- benennen, was zur Darstellung und Beschreibung einer Bewegung angegeben werden muss.
- beschreiben, wie Stroboskopbilder für Bewegungen erstellt werden.
- erklären, wie mit Hilfe von Stroboskopbildern Bewegungen dargestellt werden.
- anhand eines Stroboskopbilds die Bewegung eines Körpers beschreiben

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                                                | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                          |
|--------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 Min  | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bild 2.2 zur Flugroute von Max wird gezeigt (Impuls)</li> <li>Die Lehrkraft stellt das Forschungsprojekt zum Weißstorch „Max“ vor.</li> <li>Frage: Was könnt ihr dem Bild über die Flugroute von Max entnehmen?</li> <li>Fazit: Man kann ablesen, wie sich der Storch Max vom Februar bis Oktober 2009 bewegt hat. -&gt; Leitende Fragestellung: Wie kann man phys. Bewegungen beschreiben?</li> </ul>                                                                                                                                  | Bild 2.2 (Folie/Beamer)                                                                                                                                                                             |
| 10 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts                             | Information über die <ul style="list-style-type: none"> <li>physikalische Beschreibung von Bewegungen durch               <ul style="list-style-type: none"> <li>Zeitpunkt der Messung</li> <li>Ort des Gegenstands</li> </ul> </li> <li>Erhöhung der Genauigkeit der Beschreibung durch               <ul style="list-style-type: none"> <li>kleinere Zeitabstände der Messungen</li> <li>höhere Präzision der Orts- und Zeitmessung</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                   | Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch</li> <li>Lesen des roten Kastens im Schülerheft (S. 2)</li> <li>Auswahlaufgabe im Workbook (S. 1, A1)</li> </ul> |
| 10 Min | Anwendung des<br>Konzepts                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bearbeitung der Aufgaben zu Storch Max im Workbook S. 1-2 Aufgabe 2 und 3 (optional: Was müsste man für eine exaktere Darstellung der Flugroute tun?)</li> <li>Besprechung der Aufgaben im Plenum</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Workbook S. 1, A2<br>Workbook S. 2, A3                                                                                                                                                              |
| 15 Min | Einführung des<br>Stroboskopbilds                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erstellen eines Stroboskopbilds zu einer Bewegung (z. B. rollender Ball) durch Überlagerung einzelner Bilder</li> <li>Aufgabe. Beschreibt das Prinzip, wie Stroboskopbilder erstellt werden               <ul style="list-style-type: none"> <li>Feste Position der Kamera</li> <li>Aufnahmen mehrerer Bilder im gleichen zeitlichen Abstand und Überlagerung der Bilder anhand des gleichen Hintergrunds</li> <li>Alternative: Langzeitbelichtung und Beleuchtung des Gegenstands mit Stroboskop (Lichtblitzen)</li> </ul> </li> </ul> | App: Motion Shot (PA, GA)<br><br>(KU, Gespräch)<br>Workbook S. 2, A4                                                                                                                                |
| 10 Min | Umgang mit der<br>Darstellungs-<br>weise Strobo-<br>skopbild | Umkehrung: Beschreibung einer Bewegung anhand eines Stroboskopbilds: <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel: Stroboskopbild des Spielzeugflugzeugs (Bild 2.3) wird gezeigt</li> <li>Aufgaben:               <ol style="list-style-type: none"> <li>Beschreibt die Bewegung des Fliegers. Wann ist der Flieger am schnellsten?</li> <li>Erklärt, woran man das sieht.</li> </ol> </li> <li>Besprechung im Plenum</li> </ul>                                                                                                                                            | Bild 2.3 (Folie/Beamer oder Schülerheft)<br><br>(PA)<br><br>KU                                                                                                                                      |
| 15 Min | Übungs-<br>aufgaben                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgabe: Auswertung des Stroboskopbilds eines hüpfenden Fußballs im Workbook</li> <li>Aufgaben werden im Plenum besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Workbook S. 3, A5<br>KU                                                                                                                                                                             |
| 5 Min  | Zusammenfas-<br>sung                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Eigene Notizen (EA), evtl. Tafel oder Workbook                                                                                                                                                      |
|        | Optional<br>(Hausaufgabe)                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kapitel 2 im Schülerheft lesen</li> <li>Aufgabe 4 (S. 3 im Schülerheft) bearbeiten</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Schülerheft (alternativ: Handy, Folie auf Display, Folienstift oder Aufnahme mit Motion Shot)                                                                                                       |

| Dauer  | Teilabschnitt                                                      | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                          |
|--------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 Min  | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bild 2.2 (SH) Stroboskopbild von Toms Vater auf dem Fahrrad wird gezeigt (Impuls)</li> <li>Die Lehrkraft stellt vor, wie das Bild entstanden ist</li> <li>Frage: Was könnt ihr dem Bild über die Bewegung von Toms Vater entnehmen?</li> <li>Fazit: Man kann ablesen, wo sich das Fahrrad zu bestimmten Zeitpunkten befunden hat und dass das Fahrrad schneller geworden ist</li> <li>-&gt; Leitende Fragestellung: Wie kann man phys. Bewegungen beschreiben?</li> </ul>                                                               | Bild 2.2 (Folie/Beamer)                                                                                                                                                                             |
| 10 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Beschreibung von<br>Bewegungen | Information über die <ul style="list-style-type: none"> <li>physikalische Beschreibung von Bewegungen durch               <ul style="list-style-type: none"> <li>Zeitpunkt der Messung</li> <li>Ort des Gegenstands</li> </ul> </li> <li>Erhöhung der Genauigkeit der Beschreibung durch               <ul style="list-style-type: none"> <li>kleinere Zeitabstände der Messungen</li> <li>höhere Präzision der Orts- und Zeitmessung</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                   | Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch</li> <li>Lesen des roten Kastens im Schülerheft (S. 2)</li> <li>Auswahlaufgabe im Workbook (S. 1, A1)</li> </ul> |
| 10 Min | Anwendung des<br>Konzepts                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Bearbeitung der Aufgaben zu Toms Vater auf dem Fahrrad im Workbook S. 1-2 Aufgabe 2 und 3 (optional: Was müsste man für eine exaktere Darstellung tun?)</li> <li>Besprechung der Aufgaben im Plenum</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Workbook S. 1, A2<br>Workbook S. 2, A3                                                                                                                                                              |
| 15 Min | Einführung des<br>Stroboskopbilds                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erstellen eines Stroboskopbilds zu einer Bewegung (z. B. rollender Ball) durch Überlagerung einzelner Bilder</li> <li>Aufgabe. Beschreibt das Prinzip, wie Stroboskopbilder erstellt werden               <ul style="list-style-type: none"> <li>Feste Position der Kamera</li> <li>Aufnahmen mehrerer Bilder im gleichen zeitlichen Abstand und Überlagerung der Bilder anhand des gleichen Hintergrunds</li> <li>Alternative: Langzeitbelichtung und Beleuchtung des Gegenstands mit Stroboskop (Lichtblitzen)</li> </ul> </li> </ul> | App: Motion Shot (PA, GA)<br><br>(KU, Gespräch)<br>Workbook S. 2, A4                                                                                                                                |
| 10 Min | Umgang mit der<br>Darstellungs-<br>weise Strobo-<br>skopbild       | Umkehrung: Beschreibung einer Bewegung anhand eines Stroboskopbilds: <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel: Stroboskopbild des Autos (Schülerheft Bild 2.3) wird gezeigt</li> <li>Aufgaben:               <ol style="list-style-type: none"> <li>Beschreibt die Bewegung des Autos. Wann ist das Auto am schnellsten?</li> <li>Erklärt, woran man das sieht. (Beschleunigung / längere Strecke in gleicher Zeit)</li> </ol> </li> <li>Besprechung im Plenum</li> </ul>                                                                                               | Bild 2.3 (Folie/Beamer oder Schülerheft)<br><br>(PA)<br><br>KU                                                                                                                                      |
| 15 Min | Übungs-<br>aufgaben                                                | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgabe: Auswertung des Stroboskopbilds eines fallenden Fußballs im Workbook</li> <li>Aufgaben werden im Plenum besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Workbook S. 2, A5<br>KU                                                                                                                                                                             |
| 5 Min  | Zusammenfas-<br>sung                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren (schriftlich) mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Eigene Notizen (EA), evtl. Tafel oder Workbook                                                                                                                                                      |
|        | Optional<br>(Hausaufgabe)                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kapitel 2 im Schülerheft lesen</li> <li>Aufgabe 4 (S. 3 im Schülerheft) bearbeiten</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Schülerheft (alternativ: Handy, Folie auf Display, Folienstift oder Aufnahme mit Motion Shot)                                                                                                       |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Themen der 2. Unterrichtseinheit:

- Tempo

Länge der Einheit:

Ca. 85 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Definition des Tempos wiedergeben.
- das (Durchschnitts-)Tempo berechnen.
- Tempomessungen planen und durchführen.
- das Tempo von Körpern aus Stroboskopbildern ermitteln.

Themen der 2. Unterrichtseinheit:

- Geschwindigkeit

Länge der Einheit:

Ca. 85 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Definition der Geschwindigkeit wiedergeben.
- die (Durchschnitts-)Geschwindigkeit berechnen.
- Geschwindigkeitsmessungen planen und durchführen.
- die Geschwindigkeit von Körpern aus Stroboskopbildern ermitteln.
- Laufzeiten und Laufstrecken ins Verhältnis setzen (400m-Lauf).

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                               | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                                    |
|--------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen | <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchführung von Versuch V1 Schülerheft S. 3:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Ein ferngesteuertes Auto soll eine vorgegebene Route fahren. Dem Schüler mit der Fernsteuerung werden die Augen verbunden, die Anweisungen kommen von den übrigen Schülern</li> </ul> </li> <li>Alternative (falls kein ferngesteuertes Auto zur Verfügung steht):               <ul style="list-style-type: none"> <li>Video eines ferngesteuerten Autos, das eine Route abfährt, wird abgespielt. Ein Schüler soll mit verbundenen Augen mit der Maus/dem Finger anhand der Anweisungen der Mitschüler der Bewegung des Autos folgen.</li> </ul> </li> <li>Bewusstmachung:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Wdh. aus der letzten Stunde: Wie werden Bewegungen phys. beschrieben?<br/>→ <b>Ort und Zeitpunkt</b></li> <li>Wie wurde bei dem Spiel die Bewegung beschrieben? Sammlung und Ordnung der verwendeten Ausdrücke an der Tafel<br/>→ <b>Richtung</b> (nach oben, rechts...) <b>und Tempo</b> (schnell(er), langsam(er))</li> </ul> </li> </ul> <p>Leitsatz für diese und die Folgende Einheit: Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, kann man auch an jedem Punkt der Bewegung angeben, <b>wie schnell und wohin</b> er sich bewegt.</p> | V1 Schülerheft S. 3<br>Ferngesteuertes Auto<br><br>Video eines ferngesteuerten Autos, Beamer, PC<br><br>ggf. Tafel                                                                                            |
| 15 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Tempo   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information über die physikalische Definition des Tempos               <ul style="list-style-type: none"> <li>Das Tempo beschreibt, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt.</li> <li>Bezeichnung mit <math>v</math> und Angabe in Einheiten wie m/s oder km/h.</li> <li>Quotient aus zurückgelegter Strecke <math>\Delta s</math> und dafür benötigter Zeit <math>\Delta t</math>: <math>v = \frac{\Delta s}{\Delta t}</math></li> <li><math>\Delta</math> (Delta) bezeichnet immer den Unterschied zwischen einem Anfangs- und einem Endpunkt (<math>\Delta s</math>: Unterschied in der Strecke, <math>\Delta t</math>: Unterschied in der Zeit).</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 3 3.1 Tempo bis rotes Kasten S. 4)</li> <li>Aufgabe im Workbook (S. 5, A1-A3)</li> </ul> |
| 10 Min | Berechnung des<br>Tempos                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiele zur Berechnung von Tempo Schülerheft S. 4               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Tempo eines Skaters, b) Tempo beim 100-m-Lauf</li> </ul> </li> <li>Übungsaufgabe Berechnung von Tempo beim 100-m-Lauf (in Teilabschnitten)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Schülerheft S. 4<br><br>Workbook S. 6 A4 (EA, PA)                                                                                                                                                             |
| 15 Min | Messung des<br>Tempos                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Planung und Durchführung einer Tempomessung               <ul style="list-style-type: none"> <li>c) Tempomessung eines Fahrradfahrers (Schülerheft S. 5)</li> </ul> </li> <li>oder vergleichbare Alternative (z. B. ferngesteuertes Auto, Modelleisenbahn)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Schülerheft S. 5 (GA, KU)<br>Workbook S. 6 A5                                                                                                                                                                 |
| 15 Min | Auswertung eines<br>Stroboskopbilds         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel zum Tempo im Stroboskopbild               <ul style="list-style-type: none"> <li>d) Tempo des Spielzeugfliegers Schülerheft S. 5</li> </ul> </li> <li>Abmessung der zurückgelegten Strecke im Stroboskopbild<br/>Umrechnung in Realgröße</li> <li>Übungsaufgabe Bestimmung des Tempos im Stroboskopbild des hüpfenden Balls</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Bild 2.3 (Beamer)<br>Schülerheft S. 5 (EA, PA)<br><br>Workbook S. 7 A6                                                                                                                                        |
| 15 Min | weiterführende<br>Aufgaben                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgaben zum 400m-Lauf (Startposition &amp; Bahnlänge, Durchschnittstempo)</li> </ul> <p><b>Alle Aufgaben werden im Plenum besprochen</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Workbook S. 8, A7, A8 (EA)<br>KU                                                                                                                                                                              |

| Dauer  | Teilabschnitt                                       | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                                               |
|--------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchführung von Versuch V1 Schülerheft S. 3:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Ein ferngesteuertes Auto soll in einem vorgegebenen Rechteck parken. Dem Schüler mit der Fernsteuerung werden die Augen verbunden (alternativ: mit Rücken zur Bahn), die Anweisungen kommen von den übrigen Schülern</li> </ul> </li> <li>Alternative (falls kein ferngesteuertes Auto zur Verfügung steht):               <ul style="list-style-type: none"> <li>Video eines ferngesteuerten Autos mit einer eindimensionalen Bewegung wird abgespielt. Ein Schüler soll mit verbundenen Augen mit der Maus/dem Finger anhand der Anweisungen der Mitschüler der Bewegung des Autos folgen.</li> </ul> </li> <li>Bewusstmachung:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Wdh. aus der letzten Stunde: Wie werden Bewegungen phys. beschrieben?<br/>→ <b>Ort und Zeitpunkt</b></li> <li>Wie wurde bei dem Spiel die Bewegung beschrieben? Sammlung und Ordnung der verwendeten Ausdrücke an der Tafel<br/>→ <b>Richtung</b> (vorwärts, rückwärts) <b>und Geschwindigkeit</b> (schnell(er), langsam(er))</li> </ul> </li> </ul> <p>Leitsatz für diese und die Folgende Einheit: Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, kann man auch an jedem Punkt der Bewegung angeben, <b>wie schnell und wohin</b> er sich bewegt.</p> | V1 Schülerheft S. 3<br>Ferngesteuertes Auto<br><br>Video eines ferngesteuerten Autos, Beamer, PC<br><br>ggf. Tafel                                                                                                       |
| 15 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Geschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information über die physikalische Definition der Geschwindigkeit               <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Geschwindigkeit beschreibt, wie schnell sich ein Gegenstand bewegt.</li> <li>Bezeichnung mit <math>v</math> und Angabe in Einheiten wie m/s oder km/h.</li> <li>Quotient aus zurückgelegter Strecke <math>\Delta s</math> und dafür benötigter Zeit <math>\Delta t</math>: <math>v = \frac{\Delta s}{\Delta t}</math></li> <li><math>\Delta</math> (Delta) bezeichnet immer den Unterschied zwischen einem Anfangs- und einem Endpunkt (<math>\Delta s</math>: Unterschied in der Strecke, <math>\Delta t</math>: Unterschied in der Zeit).</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 3, 3.1 Geschwindigkeit bis rotes Kasten S. 4)</li> <li>Aufgabe im Workbook (S. 5, A1-A3)</li> </ul> |
| 10 Min | Berechnung der<br>Geschwindigkeit                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiele zur Berechnung von Geschwindigkeit Schülerheft S. 4               <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Geschwindigkeit eines Skaters, b) Geschwindigkeit beim 100-m-Lauf</li> </ul> </li> <li>Übungsaufgabe Berechnung von Geschwindigkeit beim 100-m-Lauf (in Teilabschnitten)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Schülerheft S. 4<br><br>Workbook S. 6 A4 (EA, PA)                                                                                                                                                                        |
| 15 Min | Messung der<br>Geschwindigkeit                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Planung und Durchführung einer Geschwindigkeitsmessung               <ul style="list-style-type: none"> <li>c) Geschwindigkeitsmessung eines Fahrradfahrers (Schülerheft S. 5)</li> </ul> </li> <li>oder vergleichbare Alternative (z. B. ferngesteuertes Auto, Modelleisenbahn)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Schülerheft S. 5 (GA, KU)<br>Workbook S. 6 A5                                                                                                                                                                            |
| 15 Min | Auswertung eines<br>Stroboskopbilds                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel zur Geschwindigkeit im Stroboskopbild               <ul style="list-style-type: none"> <li>d) Geschwindigkeit des Autos Schülerheft S. 5</li> </ul> </li> <li>Abmessung der zurückgelegten Strecke im Stroboskopbild<br/>Umrechnung in Realgröße</li> <li>Übungsaufgabe Bestimmung der Geschwindigkeit im Stroboskopbild des fallenden Balls. (Maßstab ca. 1 mm = 0,01 m; <math>v \approx 0,325 \text{ m/s}</math> bis <math>0,6 \text{ m/s}</math>)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Bild 2.3 (Beamer)<br>Schülerheft S. 5 (EA, PA)<br><br>Workbook S. 7 A6                                                                                                                                                   |
| 15 Min | weiterführende<br>Aufgaben                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgaben zum 400m-Lauf (Startposition &amp; Bahnlänge, Durchschnittsgeschwindigkeit)</li> </ul> <p><b>Alle Aufgaben werden im Plenum besprochen</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Workbook S. 8, A7, A8 (EA)<br>KU                                                                                                                                                                                         |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer | Teilabschnitt          | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                            | Material/Medien/Sozialform                     |
|-------|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 5 Min | Zusammenfassung        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> <li>Alternativ: Workbook S. 9 Aufgabe A9, A10</li> </ul>                                                                                                  | Eigene Notizen (EA), evtl. Tafel oder Workbook |
|       | Optional (Hausaufgabe) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchlesen von Beispiele e) Tempo in Natur und Technik Schülerheft S. 5 <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebe zu jedem Tempobereich ein weiteres Beispiel.</li> </ul> </li> <li>Aufgabe 11 auf S. 9 im Workbook bearbeiten</li> </ul> | Schülerheft S. 5<br>Workbook S. 9, A11         |

| Dauer | Teilabschnitt          | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                 | Material/Medien/Sozialform                     |
|-------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 5 Min | Zusammenfassung        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> <li>Alternativ: Workbook S. 9 Aufgabe A9, A10</li> </ul>                                                                                                                       | Eigene Notizen (EA), evtl. Tafel oder Workbook |
|       | Optional (Hausaufgabe) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchlesen von Beispiele e) Geschwindigkeit in Natur und Technik Schülerheft S. 5 <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebe zu jedem Geschwindigkeitsbereich ein weiteres Beispiel.</li> </ul> </li> <li>Aufgabe 11 auf S. 9 im Workbook bearbeiten</li> </ul> | Schülerheft S. 5<br>Workbook S. 9, A11         |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Themen der 3. Unterrichtseinheit:

- Richtung und Geschwindigkeit

Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Bewegungsrichtung von Objekten durch Pfeile darstellen.
- zwischen der Richtung und dem Ziel eines Objekts unterscheiden.
- die Bewegungsrichtung und das Tempo von Objekten zusammen als Geschwindigkeit darstellen.
- Geschwindigkeiten im Sachzusammenhang interpretieren.
- den Unterschied zwischen Tempo und Geschwindigkeit erklären.
- in Stroboskopbild Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile und Momentangeschwindigkeitspfeilen unterscheiden.
- Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile in Stroboskopbild konstruieren.

Themen der 3. Unterrichtseinheit:

- Richtung und Geschwindigkeitspfeile

Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Bewegungsrichtung von Objekten durch Pfeile darstellen.
- zwischen der Richtung und der Orientierung eines Objekts unterscheiden.
- die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit von Objekten zusammen als Geschwindigkeitspfeil darstellen.
- Geschwindigkeitspfeile im Sachzusammenhang interpretieren.
- den Unterschied zwischen Geschwindigkeit und Geschwindigkeitspfeil erklären.
- (in Stroboskopbild Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile und Momentangeschwindigkeitspfeilen unterscheiden).
- Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild konstruieren.

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                                       | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                       |
|--------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 Min  | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rückblick auf Leitsatz der letzten Stunde:<br/>Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss man an jeden Punkt der Bewegung angeben, <b>wie schnell und wohin</b> er sich bewegt.</li> <li>Wiederholung: Wie sind wir darauf gekommen? Was wurde in der letzten Stunde geklärt? <ul style="list-style-type: none"> <li>Versuch: Bewegung eines Fahrzeuges nachfahren</li> <li>Wie schnell = Tempo (Definition, Einheiten, Berechnung/Messung)</li> </ul> </li> <li>Was ist noch offen? – wohin = Richtung</li> <li>Leitfrage dieser Einheit: Wie kann die Bewegungsrichtung physikalisch angegeben werden?</li> </ul>                                                            | <p>Folie oder Tafelanschrieb oder Schülerheft S. 3 lesen</p> <p>(Evtl. Tafelbild aus der Vorstunde)</p> <p>ggf. Tafel</p>                                                                        |
| 5 Min  | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Richtung        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information (z. B. anhand Bild 3.8) über das Konzept der Richtung <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben.</li> <li>Der Pfeil zeigt immer (tangential) entlang der Bewegungsbahn.</li> <li>Die Bewegungsrichtung kann sich im Verlauf der Bewegung ändern.</li> <li>Die Bewegungsrichtung ist nicht unbedingt identisch mit dem Ziel der Bewegung.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                              | <p>Alternativen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch, ggf. Tafel</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 6, 3.2 Richtung)</li> </ul>                              |
| 15 Min | Bestimmung<br>von Richtung<br>und Ziel              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Übungsaufgaben: <ul style="list-style-type: none"> <li>Bewegungsrichtungen einzeichnen und Ziel bestimmen</li> <li>Gleiche Richtungen und gleiche Ziele identifizieren</li> <li>Unterschied zwischen Richtung und Ziel erklären</li> </ul> </li> <li>Aufgabenlösungen werden besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <p>Workbook S. 11/12</p> <p>A1, A2, A3, A4</p>                                                                                                                                                   |
| 5 Min  | Überleitung                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rückbezug zum Einstieg. Um die Bewegung zu beschreiben, muss man <b>Tempo und Richtung</b> zusammen angeben. Wie könnte man das mit den Pfeilen machen? <ul style="list-style-type: none"> <li>Mit der Pfeillänge kann das Tempo der Bewegung dargestellt werden.</li> <li>Je größer das Tempo ist, desto länger ist der Pfeil.</li> <li>Durch einen Maßstab (z. B. 1mm entspricht 10 km/h) könnte man die Pfeillänge genau festlegen.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                              | <p>Schülertext S. 7</p>                                                                                                                                                                          |
| 10 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Geschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information über das Konzept der Geschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Geschwindigkeit <math>\vec{v}</math> eines Gegenstands setzt sich zusammen aus seinem Tempo und seiner der Bewegungsrichtung.</li> <li>Die Geschwindigkeit wird durch einen Geschwindigkeitspfeil dargestellt</li> <li>Die Richtung des Geschwindigkeitspfeils gibt die Richtung der Bewegung, seine Länge gibt das Tempo der Bewegung an.</li> <li>Zwei Geschwindigkeiten sind nur gleich, wenn sie das gleiche Tempo und die gleiche Richtung haben.</li> <li>Für die Geschwindigkeit schreibt man das Symbol <math>\vec{v}</math>, für das Tempo nur <math>v</math>.</li> </ul> </li> </ul> | <p>Alternativen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch, ggf. Tafel</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 7, 3.3 Geschwindigkeit bis S. 8 roter Kasten)</li> </ul> |

| Dauer  | Teilabschnitt                                                       | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                              |
|--------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 Min  | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rückblick auf Leitsatz der letzten Stunde:<br/>Um die Bewegung eines Gegenstands zu beschreiben, muss man an jeden Punkt der Bewegung angeben, <b>wie schnell und wohin</b> er sich bewegt.</li> <li>Wiederholung: Wie sind wir darauf gekommen? Was wurde in der letzten Stunde geklärt? <ul style="list-style-type: none"> <li>Versuch: Bewegung eines Fahrzeuges nachfahren</li> <li>Wie schnell = Geschwindigkeit (Definition, Einheiten, Berechnung/Messung)</li> </ul> </li> <li>Was ist noch offen? – wohin = Richtung</li> <li>Leitfrage dieser Einheit: Wie kann die Bewegungsrichtung physikalisch angegeben werden?</li> </ul> | <p>Folie oder Tafelanschrieb oder Schülerheft S. 3 lesen</p> <p>(Evtl. Tafelbild aus der Vorstunde)</p> <p>ggf. Tafel</p>                                                                               |
| 5 Min  | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Richtung                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information (z. B. anhand Bild SH 3.7) über das Konzept der Richtung <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Bewegungsrichtung wird mit einem Pfeil angegeben.</li> <li>Die Bewegungsrichtung kann sich im Verlauf der Bewegung ändern.</li> <li>Die Bewegungsrichtung und Orientierung des Gegenstands unterscheiden</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <p>Alternativen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch, ggf. Tafel</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 6, 3.2 Richtung)</li> </ul>                                     |
| 15 Min | Bestimmung<br>von Richtung<br>und Orientie-<br>rung                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Übungsaufgaben: <ul style="list-style-type: none"> <li>Bewegungsrichtungen einzeichnen (Hilfe: SH Bild 3.8)</li> <li>Gleiche Richtungen identifizieren</li> <li>Unterschied zwischen Richtung und Orientierung erklären</li> </ul> </li> <li>Aufgabenlösungen werden besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <p>Workbook S. 11/12</p> <p>A1, A2, A3, A4</p>                                                                                                                                                          |
| 5 Min  | Überleitung                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Rückbezug zum Einstieg. Um die Bewegung zu beschreiben, muss man <b>Geschwindigkeit und Richtung</b> zusammen angeben. Wie könnte man das mit den Pfeilen machen? <ul style="list-style-type: none"> <li>Mit der Pfeillänge kann die Geschwindigkeit der Bewegung dargestellt werden.</li> <li>Je größer die Geschwindigkeit ist, desto länger ist der Pfeil.</li> <li>Durch einen Maßstab (z. B. 1mm entspricht 10 km/h) könnte man die Pfeillänge genau festlegen.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                               | <p>Schülertext S. 7</p>                                                                                                                                                                                 |
| 10 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Geschwindig-<br>keitspfeile     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information über das Konzept der Geschwindigkeitspfeile <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Geschwindigkeitspfeil eines Gegenstands setzt sich zusammen aus dem Betrag seiner Geschwindigkeit und seiner der Bewegungsrichtung.</li> <li>Die Richtung des Geschwindigkeitspfeils gibt die Richtung der Bewegung, seine Länge gibt den Betrag der Geschwindigkeit der Bewegung an.</li> <li>Zwei Geschwindigkeitspfeile sind nur gleich, wenn sie den gleichen Geschwindigkeitsbetrag und die gleiche Richtung haben.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                        | <p>Alternativen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch, ggf. Tafel</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 7, 3.3 Geschwindigkeitspfeile bis S. 8 roter Kasten)</li> </ul> |
| 10 Min | Unterscheidung<br>Geschwindig-<br>keitspfeil und<br>Geschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel: Schülerheft S. 8 a) Geschwindigkeit aus Geschwindigkeitspfeil ablesen</li> <li>Aufgabe: Workbook S. 13, A1: Wer hat gleiche Geschwindigkeit, gleichen Geschwindigkeitspfeil? <ul style="list-style-type: none"> <li>Pkw 4 &amp; 5 haben den gleichen Geschwindigkeitspfeil, Pkw 1, 4 &amp; 5 die gleiche Geschwindigkeit</li> <li>Pkw 1,4,5: <math>v = 32,5</math> km/h, Pkw 2: <math>v = 12,5</math> km/h, Pkw 3: <math>v = 55</math> km/h!</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                             | <p>Schülerheft S. 8 Beispiel a)</p> <p>Workbook S. 13, A1</p>                                                                                                                                           |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                                                     | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Material/Medien/Sozialform                                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Unterscheidung Tempo und Geschwindigkeit                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel: Schülerheft S. 8 a) Tempo aus Geschwindigkeitspfeil ablesen</li> <li>Aufgabe: Workbook S. 13, A1: Wer hat gleiche Geschwindigkeit, gleiches Tempo? <ul style="list-style-type: none"> <li>Pkw 4 &amp; 5 haben gleiche Geschwindigkeit, Pkw 1, 4 &amp; 5 das gleiche Tempo</li> <li>Pkw 1,4,5: <math>v = 32,5 \text{ km/h}</math>, Pkw 2: <math>v = 12,5 \text{ km/h}</math>, Pkw 3: <math>v = 55 \text{ km/h}</math></li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Schülerheft S. 8 Beispiel a)<br>Workbook S. 13, A1                                                       |
| 10 Min | Einzeichnen von Geschwindigkeiten (ohne Maßstab)<br>(mit Maßstab) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgabe: Workbook S. 14, A2, A3 <ul style="list-style-type: none"> <li>Pkw: unterschiedliche Richtung und/oder Länge der Pfeile</li> <li>Lkw: gleiche Richtung und Länge der Pfeile</li> <li>Zwei Fahrräder: gleiche Richtung unterschiedliche Länge</li> <li>Zwei Fahrräder: gleiche Länge unterschiedliche Richtung</li> </ul> </li> <li>Aufgabe: Workbook S. 14, A4 <ul style="list-style-type: none"> <li>Geschwindigkeitspfeile für 3 Flugzeuge mit unterschiedlichen Richtungen nach Maßstab (1 cm entspricht 100 km/h)</li> </ul> </li> <li>Aufgabenlösungen werden besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                       | Workbook S. 14<br>A2<br>A3a<br>A3b<br>A4                                                                 |
| 15 Min | Durchschnittsgeschwindigkeit im Stroboskopbild                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel b) Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Traktors und des Spielzeugfliegers <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Pfeilfuß des Durchschnittsgeschwindigkeitspfeils beginnt zwischen den Punkten A und B, für die das Tempo berechnet wurde und zeigt von Punkt A in die Richtung von Punkt B</li> </ul> </li> <li>Konstruktion im Bild des Spielzeugfliegers (Bild 2.3) auf dem OHP nachvollziehen <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler vorne die Geschwindigkeitspfeile konstruieren lassen</li> </ul> </li> <li>Aufgabe: Workbook S. 15, A5: <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild einzeichnen (Maßstab 1 mm Pfeillänge entspricht der Geschwindigkeit 1 mm/s)</li> </ul> </li> <li>Aufgabenlösungen werden besprochen</li> </ul> | Schülerheft S. 8 Beispiel b)<br><br>Bild 2.3 auf Folie für den OHP<br>Folienstifte<br>Workbook S. 15, A5 |
| 5 Min  | Zusammenfassung                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde (den letzten Stunden) gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                             |
|        | Optional (Hausaufgabe)                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>S. 7 Kasten für Spezialisten lesen und ein weiteres Beispiel für das genannte Phänomen mit den Schneeflocken nennen -&gt; Scheinkräfte</li> <li>Beispiel d) Fluglotsen -&gt; Bild 3.14 wird gezeigt</li> <li>Frage: Muss der Lotse die Piloten warnen?</li> <li>Auflösung in der nächsten Stunde: <ul style="list-style-type: none"> <li>Nein die Flugzeuge treffen sich nicht, obwohl die Flugbahnen sich kreuzen.</li> <li>Bild 3.15 zur Auflösung</li> </ul> </li> <li>Aufgabe 6 im Workbook S. 15 bearbeiten</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Schülertext S. 7<br>Bild 3.14 (Folie/Beamer)<br><br>Bild 3.15 (Folie/Beamer)<br>Workbook S. 15 A6        |

| Dauer  | Teilabschnitt                                                           | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Material/Medien/Sozialform                                                                               |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Einzeichnen von Geschwindigkeitspfeilen (ohne Maßstab)<br>(mit Maßstab) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgabe: Workbook S. 14, A2, A3 <ul style="list-style-type: none"> <li>Pkw: unterschiedliche Richtung und/oder Länge der Pfeile</li> <li>Lkw: gleiche Richtung und Länge der Pfeile</li> <li>Zwei Fahrräder: gleiche Richtung unterschiedliche Länge</li> <li>Zwei Fahrräder: gleiche Länge unterschiedliche Richtung</li> </ul> </li> <li>Aufgabe: Workbook S. 14, A4 <ul style="list-style-type: none"> <li>Geschwindigkeitspfeile für 3 Flugzeuge mit unterschiedlichen Richtungen nach Maßstab (1 cm entspricht 100 km/h)</li> </ul> </li> <li>Aufgabenlösungen werden besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                     | Workbook S. 14<br>A2<br>A3a<br>A3b<br>A4                                                                 |
| 15 Min | Durchschnittsgeschwindigkeit im Stroboskopbild                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel b) Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild des Traktors und des Spielzeugfliegers <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Pfeilfuß des Durchschnittsgeschwindigkeitspfeils beginnt zwischen den Punkten A und B, für die die Geschwindigkeit berechnet wurde und zeigt von Punkt A in die Richtung von Punkt B</li> </ul> </li> <li>Konstruktion im Bild des Autos (Bild 2.3) auf dem OHP nachvollziehen <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler vorne die Geschwindigkeitspfeile konstruieren lassen</li> </ul> </li> <li>Aufgabe: Workbook S. 15, A5: <ul style="list-style-type: none"> <li>Durchschnittsgeschwindigkeitspfeile im Stroboskopbild einzeichnen (Maßstab 1 mm Pfeillänge entspricht der Geschwindigkeit 1 mm/s)</li> </ul> </li> <li>Aufgabenlösungen werden besprochen</li> </ul> | Schülerheft S. 8 Beispiel b)<br><br>Bild 2.3 auf Folie für den OHP<br>Folienstifte<br>Workbook S. 15, A5 |
| 5 Min  | Zusammenfassung                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde (den letzten Stunden) gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                             |
|        | Optional (Hausaufgabe)                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>S. 7 Kasten für Spezialisten lesen und ein weiteres Beispiel für das genannte Phänomen mit den Schneeflocken nennen -&gt; Scheinkräfte</li> <li>Beispiel d) Staffellauf -&gt; Bild 3.13 wird gezeigt</li> <li>Frage: Warum wird der Staffelstab bei möglichst großer Geschwindigkeit übergeben</li> <li>Auflösung in der nächsten Stunde: <ul style="list-style-type: none"> <li>Nächste Läufer kann sofort bei großer Geschwindigkeit loslaufen und muss nicht erst Geschwindigkeit abnehmen</li> </ul> </li> <li>Aufgabe 6 im Workbook S. 15 bearbeiten</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                 | Schülertext S. 7<br>Bild 3.13 (Folie/Beamer)<br><br>Workbook S. 15 A6                                    |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

### Themen der 4. Unterrichtseinheit:

- Zusatzgeschwindigkeit

### Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

### Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Definition der Zusatzgeschwindigkeit nennen.
- einen Zusammenhang zwischen der Richtung einer Einwirkung und der Zusatzgeschwindigkeit herstellen.
- die Zusatzgeschwindigkeit aus der Anfangs- und Endgeschwindigkeit konstruieren.
- die Endgeschwindigkeit aus der Anfangs- und Zusatzgeschwindigkeit konstruieren.
- eigene Konstruktionen von Anfangs-, Zusatz- und Endgeschwindigkeiten für Anwendungsbeispiele erstellen.

### Themen der 4. Unterrichtseinheit:

- Geschwindigkeitsänderung

### Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

### Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- unterschiedliche Anfangs- und Endgeschwindigkeiten beobachten und beschreiben
- die Definition der Geschwindigkeitsänderung wiedergeben.
- die Geschwindigkeitsänderung aus der Anfangs- und Endgeschwindigkeit konstruieren.
- die Endgeschwindigkeit aus der Anfangsgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung konstruieren.
- eigene Konstruktionen von Anfangs-, Endgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsänderung für Anwendungsbeispiele erstellen.

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                                             | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der letzten Unterrichtseinheit: Geschwindigkeit               <ul style="list-style-type: none"> <li>Definition der Geschwindigkeit (Richtung und Tempo)</li> <li>Darstellung der Geschwindigkeit durch Geschwindigkeitspfeile</li> </ul> </li> <li>Schüler führen Versuch 1 Schülertext S. 10 in Gruppenarbeit durch               <ul style="list-style-type: none"> <li>Aus Stiften wird ein Tor gebaut und die Kugel mit dem Lineal „angeschnippt“</li> <li>Teil 1: Die Kugel befindet sich in Ruhe</li> <li>Teil 2: Kugel bewegt sich bereits parallel zum Tor und soll senkrecht zur Bewegung in Richtung Tor gestoßen werden. Hierbei Variation der Stoßstärke.</li> </ul> </li> <li>Auftrag: Schüler sollen jeweils die Anfangs- und Endgeschwindigkeit der Kugel beschreiben und ob die Kugel ins Tor trifft               <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Anfangsgeschwindigkeit bei Teil 1 ist 0, bei Teil 2 zeigt die Anfangsgeschwindigkeit nach rechts.</li> <li>Die Endgeschwindigkeit bei Teil zeigt in Richtung des Tors, bei Teil 2 zeigt die Endgeschwindigkeit nach rechts oben</li> <li>Bei Übung 1 trifft die Kugel immer ins Tor, bei Übung 2 hängt dies von der Stärke des Stoßes ab, Kugel kann auch am Tor vorbeierollen</li> </ul> </li> <li>Sammlung der Beschreibungen an der Tafel</li> <li>Leitfrage: Wie hängt die Endgeschwindigkeit mit der Anfangsgeschwindigkeit und der Einwirkung zusammen?</li> </ul>      | V1 Schülertext S. 10<br>Stifte, Lineal, Kugel<br><br>Tafel                                                                                                                                                                                                                         |
| 15 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Zusatzgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> <li>Es wird nun der Fall betrachtet, dass die Kugel das Tor verfehlt (Bild 4.3)</li> <li>Information über die Darstellung von Anfangs- und Endgeschwindigkeit vor und nach einem Stoß in Stroboskopbildern (Wichtig! In diesem Kapitel werden ausschließlich Momentangeschwindigkeiten betrachtet.):               <ul style="list-style-type: none"> <li>Anfangsgeschwindigkeit wird mit <math>\vec{v}_A</math> bezeichnet und blau dargestellt</li> <li>Endgeschwindigkeit wird mit <math>\vec{v}_E</math> bezeichnet und orange dargestellt</li> </ul> </li> <li>Information über Konzept der Zusatzgeschwindigkeit               <ul style="list-style-type: none"> <li>Durch eine Einwirkung erhält ein Körper eine Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math></li> <li>Der Gegenstand führt zusätzlich zur Anfangsgeschwindigkeit eine weitere Bewegung in Richtung der Zusatzgeschwindigkeit aus</li> <li>Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich</li> <li>Der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit verbindet die Pfeilspitze der Anfangsgeschwindigkeit mit der Pfeilspitze der Endgeschwindigkeit</li> </ul> </li> <li>Handlungsmöglichkeit:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Pfeile auf separate Folien zeichnen, um somit die Verschiebung der Pfeile für die Konstruktion sichtbar zu machen (Bild 4.7 und 4.9)</li> <li>Alternativ verschieben der Pfeile am PC (Beamer)</li> </ul> </li> </ul> | Alternativen:<br>o Lehrervortrag/Klassengespräch<br>o Lesen im Schülerheft (S. 10 bis S.11, Kapitel 4.1)<br>o Aufgabe im Workbook (S. 19, A1)<br>Alternativen:<br>o Lehrervortrag/Klassengespräch<br>o Schülertext S. 11 bis S. 12<br>o Aufgaben im Workbook (S. 19/20, A2 und A3) |

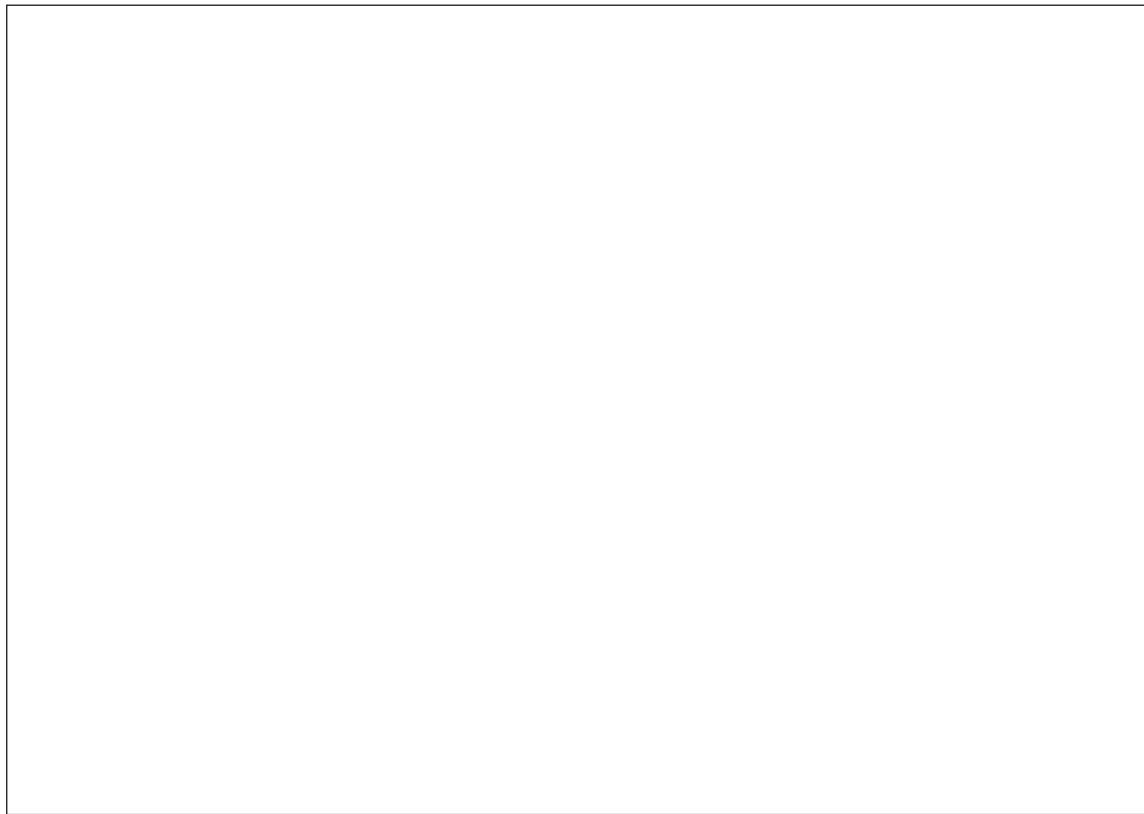
| Dauer  | Teilabschnitt                                                          | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                  |
|--------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler führen Versuch 1 Schülertext S. 10 in Gruppenarbeit durch               <ul style="list-style-type: none"> <li>Ein Spielzeugauto wird eine Rampe runterfahren gelassen.</li> <li>Teil 1: Der Wagen befindet sich in Ruhe</li> <li>Teil 2: Wagen bewegt sich bereits vor dem Startpunkt der Messung</li> </ul> </li> <li>Auftrag: Schüler sollen jeweils die Anfangs- und Endgeschwindigkeit des Wagens beschreiben               <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Anfangsgeschwindigkeit bei Teil 1 ist 0, bei Teil 2 zeigt die Anfangsgeschwindigkeit nach rechts.</li> <li>Die Endgeschwindigkeit zeigt in beiden Fällen in die gleiche Richtung, bei Teil 2 ist diese aber größer</li> </ul> </li> <li>Sammlung der Beschreibungen an der Tafel               <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der Darstellung mit Geschwindigkeitspfeilen (Farbwahl s.u.)</li> <li>Darstellung von Anfangs- und Endgeschwindigkeit vorher und nachher</li> <li>Problem: Haben die Wagen dieselbe Endgeschwindigkeit (gleiche Pfeillänge)?</li> <li>Warum wird der Wagen schneller? -&gt; Einwirkung entlang der Rampe durch Gravitationskraft</li> </ul> </li> <li>Leitfrage: Wie hängt die Endgeschwindigkeit mit der Anfangsgeschwindigkeit und der Einwirkung zusammen?</li> </ul> | V1 Schülertext S. 10<br>Rampe und Autos<br><br>Evtl. Stroboskopbild erstellen (Motion Shot) und auswerten oder Messung per Lichtschranke.<br><br>Tafel/ Folie<br>Farbige Kreide/Stifte o.ä. |
| 5 Min  | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Geschwindigkeitsänderung           | Wichtig! In diesem Kapitel werden ausschließlich Momentangeschwindigkeiten betrachtet:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>Information über Konzept der Geschwindigkeitsänderung               <ul style="list-style-type: none"> <li>Durch eine Einwirkung erfährt ein Körper eine Geschwindigkeitsänderung <math>\Delta \vec{v}</math></li> <li>Der Gegenstand erhält zusätzlich zur Anfangsgeschwindigkeit eine weitere Geschwindigkeit in Richtung der Geschwindigkeitsänderung.</li> <li>Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Geschwindigkeitsänderung sind gleich.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Alternativen:<br>o Lehrervortrag/Klassengespräch<br>o Lesen im Schülerheft (S. 10 bis S.11, Kapitel 4.1)<br>o Aufgabe im Workbook (S. 19, A1)                                               |
| 10 Min | Konstruktion von<br>Geschwindigkeitsänderung und<br>Endgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information zur Konstruktion:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Anfangsgeschwindigkeit wird mit <math>\vec{v}_A</math> bezeichnet und blau dargestellt.</li> <li>Endgeschwindigkeit wird mit <math>\vec{v}_E</math> bezeichnet und orange dargestellt.</li> <li>Der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung verbindet die Pfeilspitze der Anfangsgeschwindigkeit mit der Pfeilspitze der Endgeschwindigkeit.</li> </ul> </li> <li>Alternative Handlungsmöglichkeiten um somit die Verschiebung der Pfeile für die Konstruktion sichtbar zu machen (Bild 4.7 und 4.9):               <ul style="list-style-type: none"> <li>Pfeile auf separate Folien zeichnen,</li> <li>Alternativ verschieben der Pfeile am PC (Beamer)</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Alternativen:<br>Lehrervortrag/Klassengespräch<br>o Schülertext S. 11 bis S. 12<br>o Aufgabe im Workbook (S. 19/20, A2 und A3)                                                              |
| 15 Min | Umgang mit<br>Geschwindigkeitsänderung                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Alltagsbeispiel für Geschwindigkeitsänderungen mit Konstruktion der Darstellung               <ul style="list-style-type: none"> <li>Schülerheft S. 14 Beispiele</li> </ul> </li> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben 4 und 5 im Workbook (S. 21/22)</li> <li>Aufgabe wird im Plenum besprochen               <ul style="list-style-type: none"> <li>Gemeinsame Besprechung der Lösung auf einer Folie von A4 und A5</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Schülerheft S. 14<br>Beispiele a), b) 1)-3)<br><br>Workbook S. 21/22, A4 und A5<br>(EA, PA)<br>Folie von A4 und A5                                                                          |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                                      | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Material/Medien/Sozialform                                                                                                 |
|--------|----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15 Min | Umgang mit neuen Konzept der Zusatzgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> <li>Beispiel für die Konstruktion der Endgeschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>Schülerheft S. 12 Beispiel a) Eishockey</li> <li>Oberer Teil von Bild 4.11 auf Folie (alternativ Beamer)</li> <li>Konstruktion der Endgeschwindigkeit</li> </ul> </li> <li>Beispiel für die Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>Schülerheft S. 12 Beispiel b) Murmelspiel</li> <li>Bild 4.12 auf Folie (alternativ Beamer)</li> <li>Konstruktion der Zusatzgeschwindigkeit und der Einwirkungsrichtung</li> </ul> </li> </ul> | <p>Schülerheft S. 12 Beispiel a)</p> <p>Schülerheft S. 13 Beispiel b)</p>                                                  |
| 25 Min | Übungsaufgabe                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben 4 im Workbook (S. 21)</li> <li>Aufgabe wird im Plenum besprochen <ul style="list-style-type: none"> <li>Gemeinsame Besprechung der Lösung auf einer Folie von A4</li> </ul> </li> <li>Schüler bearbeiten Aufgabe 5 bis 9 im Workbook (S. 22/23) <ul style="list-style-type: none"> <li>Je nach Zeit können die Aufgaben 10 und 11 in die Hausaufgabe verlegt werden</li> </ul> </li> <li>Besprechung der Aufgabe im Plenum</li> </ul>                                                                                               | <p>Einzelarbeit</p> <p>Workbook S. 21, A4</p> <p>Folie von A4</p> <p>Workbook S. 22/23, A5 bis A9</p> <p>Partnerarbeit</p> |
| 5 Min  | Zusammenfassung                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                               |
|        | Optional (Hausaufgabe)                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgabe 10 und Aufgabe 11 (S. 24 im Workbook) bearbeiten</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Workbook S. 24, A10 und A11                                                                                                |

| Dauer  | Teilabschnitt          | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                | Material/Medien/Sozialform                 |
|--------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 25 Min | Übungsaufgabe          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler bearbeiten Aufgabe 6 bis 10 im Workbook (S. 23/24) <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgaben 11 und 12 optional je nach Zeit (ggf. in die Hausaufgabe verlegen)</li> </ul> </li> <li>Besprechung der Aufgabe im Plenum</li> </ul> | Workbook S. 23/24, A6 bis A10 (EA, PA; GA) |
| 5 Min  | Zusammenfassung        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                         | Eigene Notizen / evtl. Tafel               |
|        | Optional (Hausaufgabe) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgabe 11 und Aufgabe 12 (S. 25 im Workbook) bearbeiten</li> </ul>                                                                                                                                                                             | Workbook S. 25, A11, A12                   |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)



Themen der 5. Unterrichtseinheit:

- Beschleunigung

Länge der Einheit:

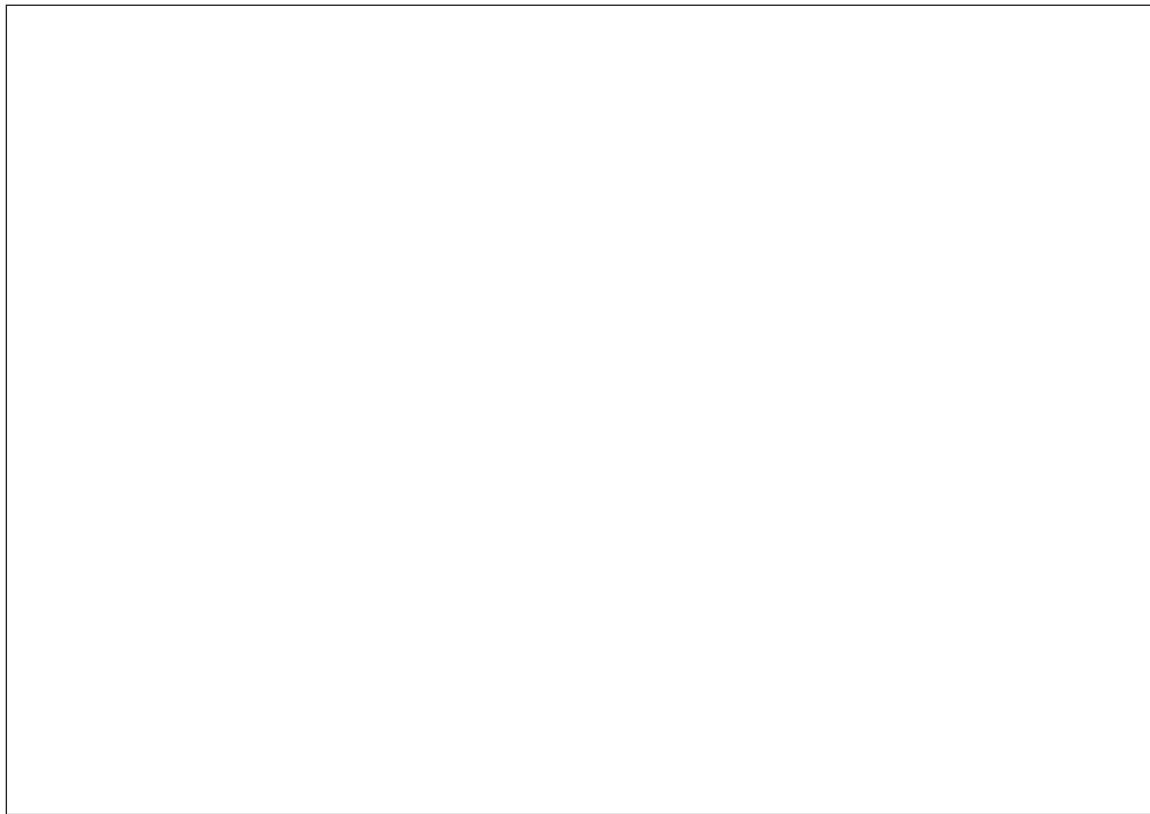
Ca. 70 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Definition der Beschleunigung nennen.
- den Unterschied zwischen der Geschwindigkeitsänderung und der Beschleunigung erklären.
- die Geschwindigkeitsänderung aus der Beschleunigung konstruieren.
- die Beschleunigung aus der Geschwindigkeitsänderung konstruieren.
- einen Zusammenhang zwischen der Richtung einer Einwirkung und der Beschleunigung herstellen.

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)



| Dauer  | Teilabschnitt                                      | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Material/Medien/Sozialform                                                                                                  |
|--------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der letzten Unterrichtseinheit: Geschwindigkeitsänderung <ul style="list-style-type: none"> <li>Definition der Geschwindigkeitsänderung</li> </ul> </li> <li>Vergleich der Beschleunigung von Rennwagen (0 auf 100 km/h) <ul style="list-style-type: none"> <li>Ferrari 430 Scuderia: 3,6s; Jaguar F-Type SVR: 3,7 s, Porsche Carrera GT: 3,8s</li> <li>Was ist jeweils die Geschwindigkeitsänderung? Wer beschleunigt schneller.<br/>(gleiche Geschwindigkeitsänderung in unterschiedlicher Zeit)</li> </ul> </li> <li>Rückblick auf Versuch 1 auf S. 10 im Schülertext <ul style="list-style-type: none"> <li>unterschiedliche Geschwindigkeitsänderungen in unterschiedlicher Zeit</li> </ul> </li> </ul> <p>→ Leitfrage: Wie kann man die Beschleunigung bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsänderungen in unterschiedlichen Zeiträumen vergleichen?</p> | Tafel                                                                                                                       |
| 10 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Beschleunigung | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information über Konzept der Beschleunigung <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Beschleunigung beschreibt, wie schnell sich die Geschwindigkeit eines Gegenstands über die Zeit verändert (Beschleunigung pro Zeit).</li> <li>Bezeichnung mit <math>a</math> und Angabe in Einheiten wie <math>m/s^2</math></li> <li>Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsänderung, der Beschleunigung und der Zeit: <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\Delta v = a \cdot \Delta t</math></li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Alternativen:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch</li> <li>Schülertext S. 12</li> </ul> |
| 10 Min | Umgang mit<br>neuen Konzept<br>der Beschleunigung  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Konstruktion der Geschwindigkeitsänderung aus der gleichmäßigen Beschleunigung <ul style="list-style-type: none"> <li>Schülerheft S. 12-13 Bild 4.10, Bild 4.11 und Bild 4.12</li> <li>Workbook S. 28 Aufgabe 1</li> </ul> </li> <li>Beispiel: Vergleich von verschiedenen Beschleunigung bei gleicher Geschwindigkeitsänderung <ul style="list-style-type: none"> <li>Schülerheft S. 13 Bild 4.13</li> <li>Workbook S. 29 Aufgabe 2</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Schülerheft S. 12 / 13<br>Aufgaben im Workbook<br>S. 28 A1<br><br>S. 29 A2                                                  |
| 15 Min | Übungsaufgabe                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>SuS bearbeiten die Aufgaben 3 und 4 im Workbook (S. 30)</li> <li>Besprechung der Aufgabe im Plenum</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Einzelarbeit<br>Workbook S. 30, A3 und A4                                                                                   |
| 20 Min | Verknüpfung<br>mit eigenen<br>Erfahrungen          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler führen Versuch 1 und 2 Schülertext S. 16 im Plenum durch:<br/>Es wird versucht ein Auto anzuschieben und abzubremesen, <ul style="list-style-type: none"> <li>erst alleine dann mit mehreren Schülern,</li> <li>mal langsam und mal schnell</li> <li>mit und ohne Insassen</li> </ul> </li> <li>Die SuS schildern ihre Erfahrungen und gehen dabei auf die Stärke und Richtung der Beschleunigung und der Einwirkung ein.</li> <li>→ Bei einer stärkeren Einwirkungsstärke ist die Beschleunigung größer/stärker.</li> <li>→ Die Einwirkung und die Beschleunigung haben dieselbe Richtung.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                              | V1 / V2 Schülertext S. 16<br>V4 Schülertext S. 17<br>Alternative: Einkaufswagen im Supermarkt (nur 1-dim)                   |
| 5 Min  | Zusammenfassung                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                                |
|        | Optional<br>(Hausaufgabe)                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Konstruktion der Beschleunigungspfeile in den Beispielen auf S. 14 im Schülertext nachvollziehen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Schülertext S. 14                                                                                                           |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Themen der 5. Unterrichtseinheit:

- Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit

Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Definition der Kraft, als Zusammenfassung der Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtungen nennen.
- den Zusammenhang zwischen einer Einwirkung und der Zusatzgeschwindigkeit eines Gegenstands erklären.
- bei einer gegebenen Einwirkung Vorhersagen über die Bewegung eines Körpers machen.

Themen der 6. Unterrichtseinheit:

- Kraft, Beschleunigung und Masse

Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- schildern, dass die notwendige Einwirkung von der Stärke der Beschleunigung und der beschleunigten Masse abhängt
- die Definition der Kraft, als Zusammenfassung der Einwirkungsstärke und Einwirkungsrichtungen nennen.
- den Zusammenhang zwischen einer Kraft und der Beschleunigung eines Gegenstands erklären.
- bei einer gegebenen Kraft Vorhersagen über die Bewegung eines Körpers machen.
- die Definition der Masse nennen.
- den Zusammenhang zwischen der Masse und der Beschleunigung erklären.

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                               | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                         |
|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der letzten Unterrichtseinheit: Zusatzgeschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>Definition der Zusatzgeschwindigkeit</li> <li>Konstruktion von Anfangs-, Zusatz- und Endgeschwindigkeitspfeilen</li> <li>Die Richtung der Einwirkung und die Richtung der Zusatzgeschwindigkeit sind gleich</li> </ul> </li> <li>Schüler führen Versuch 1 Schülertext S. 15 in Gruppenarbeit durch <ul style="list-style-type: none"> <li>Es wird mit einem Holzklotz gegen eine bereits rollende Kugel gestoßen. Beim zweiten Mal soll ungefähr doppelt so stark gestoßen werden.</li> <li>Die Schüler sollen jeweils eine Aussage über das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit machen</li> </ul> </li> <li>Leitfrage: Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Einwirkung und der Zusatzgeschwindigkeit<br/>→ Bei einer stärkeren Einwirkung ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit größer</li> </ul> | V1 Schülertext S. 15<br>Kugel, kleiner Holzklotz                                                                                                                                                   |
| 10 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Kraft   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information über das Konzept der Kraft. <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Einwirkungsstärke und die Einwirkungsrichtung werden durch im Begriff der Kraft zusammengefasst, die Kraft wird mit dem Symbol <math>\vec{F}</math> dargestellt</li> <li>Je größer die Einwirkungsstärke einer Kraft auf einen Körper ist, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Alternativen:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 15 beide roten Kästen)</li> <li>Aufgabe im Workbook (S. 27, A1)</li> </ul> |
| 10 Min | Beispiele zum<br>neuen Konzept<br>der Kraft | <ul style="list-style-type: none"> <li>Besprechen der Beispiele aus dem Schülertext im Klassengespräch</li> <li>a) Magnet und b) Formel I</li> <li>Wie unterscheidet sich jeweils die Einwirkungsstärke in den Beispielen und warum?</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Schülertext S. 16<br>Beispiel a) und b)                                                                                                                                                            |
| 40 Min | Umgang mit<br>neuen Konzept<br>der Kraft    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler simulieren verschiedene Einwirkungsstärken durch eine Feder in der Simulation „Stoss“, Anleitung zur Simulation befindet sich im Workbook <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schüler sollen den Zusammenhang zwischen Kraft und Zusatzgeschwindigkeit überprüfen</li> <li>Im ersten Schritt wird die Einwirkungsstärke bei einer festen Richtung (senkrecht zur Bewegungsrichtung) variiert</li> <li>Im zweiten Schritt kann zusätzlich die Einwirkungsrichtung durch den Winkel der Feder variiert werden</li> </ul> </li> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben im Workbook, Besprechung anschließend im Plenum</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                      | Gruppenarbeit<br>PC mit Simulation „Stoss“<br>Anleitung zur Simulation im Workbook S. 28-33<br><br>Workbook S. 29-33, A2-A6<br>Klassengespräch                                                     |
| 5 Min  | Zusammenfassung                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                                                                                                       |

| Dauer  | Teilabschnitt                               | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                         |
|--------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 Min  | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der letzten Unterrichtseinheit: Beschleunigung <ul style="list-style-type: none"> <li>Definition der Beschleunigung</li> <li>Die Richtung der Einwirkung</li> </ul> </li> <li>Bewusstmachung der Erfahrungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Welche Kräfte/Einwirkungen waren für eine langsame/schnelle Beschleunigung erforderlich.</li> <li>Wie änderte sich die notwendige Kraft/Einwirkung, mit der Anzahl der Insassen.</li> </ul> </li> <li>Leitfragen: <ol style="list-style-type: none"> <li>Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Kraft/Einwirkung und der Beschleunigung.</li> <li>Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Masse und der Beschleunigung?</li> </ol> </li> </ul> |                                                                                                                                                                                                    |
| 5 Min  | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Kraft   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Information über das Konzept der Kraft. <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Einwirkungsstärke und die Einwirkungsrichtung werden durch im Begriff der Kraft zusammengefasst, die Kraft wird mit dem Symbol <math>\vec{F}</math> dargestellt</li> <li>Je größer die Einwirkungsstärke einer Kraft auf einen Körper ist, desto größer ist die Beschleunigung</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Alternativen:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>Lehrervortrag/Klassengespräch</li> <li>Lesen im Schülerheft (S. 16 beide roten Kästen)</li> <li>Aufgabe im Workbook (S. 33, A1)</li> </ul> |
| 5 Min  | Beispiele zum<br>neuen Konzept<br>der Kraft | <ul style="list-style-type: none"> <li>Besprechen der Beispiele aus dem Schülertext im Klassengespräch</li> <li>a) Magnet und b) Formel I</li> <li>Wie unterscheidet sich jeweils die Einwirkungsstärke in den Beispielen und warum?</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Schülertext S. 17<br>Beispiel a) und b)                                                                                                                                                            |
| 20 Min | Umgang mit<br>neuen Konzept<br>der Kraft    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler simulieren verschiedene ausgeübte Kräfte in der Simulation „Phet: Kraft und Bewegung“, Anleitung zur Simulation befindet sich im Workbook <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schüler sollen den Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung überprüfen</li> <li>Im ersten Schritt wird der Wagen aus dem Stand beschleunigt</li> <li>Im zweiten Schritt hat der Wagen bereits eine Anfangsgeschwindigkeit</li> </ul> </li> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben im Workbook</li> <li>Besprechung anschließend im Plenum</li> </ul>                                                                                                                                                                  | Gruppenarbeit<br>PC mit Simulation „Phet: Kraft und Bewegung“, Stoppuhren<br>Anleitung zur Simulation im Workbook S. 34-37<br><br>Workbook S. 35-37, A2-A5<br>Klassengespräch                      |
| 5 Min  | Zwischenzusammenfassung                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, eine Antwort auf die erste Leitfrage</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                                                                                                       |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Themen der 6. Unterrichtseinheit:

- Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit / Masse und Zusatzgeschwindigkeit

Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Definition der Einwirkungsdauer nennen.
- den Zusammenhang zwischen der Einwirkungsdauer einer Kraft und der Zusatzgeschwindigkeit erklären.
- die Definition der Masse nennen.
- den Zusammenhang zwischen der Masse und der Zusatzgeschwindigkeit erklären.

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                                             | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                          |
|--------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der letzten Unterrichtseinheit: Einwirkung und Zusatzgeschwindigkeit <ul style="list-style-type: none"> <li>Definition der Kraft</li> <li>Zusammenhang zwischen Einwirkungsstärke und Zusatzgeschwindigkeit</li> </ul> </li> <li>Schüler führen Versuch 3 Schülertext S. 16 in Gruppenarbeit durch <ul style="list-style-type: none"> <li>Es wird mit einem Föhn eine bereits rollende Kugel abgelenkt. Beim zweiten Mal werden zwei Föhne nebeneinandergelegt, so dass der Luftstrom länger auf die Kugel wirken kann.</li> <li>Die Schüler sollen jeweils eine Aussage über das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit machen</li> </ul> </li> <li>Leitfrage: Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Einwirkungsdauer und der Zusatzgeschwindigkeit<br/> → Bei zwei Föhnen ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit größer.</li> </ul> | V3 Schülertext S. 16<br>Kugel, 2 Föhne<br>(alternativ „Pusten“)<br><br>Tafel                                                                                                        |
| 10 Min | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Einwirkungs-<br>dauer | Die Lehrkraft informiert über <ul style="list-style-type: none"> <li>das Konzept der Einwirkungsdauer. <ul style="list-style-type: none"> <li>Je größer die Einwirkungsdauer einer Kraft ist, die auf einen Gegenstand ausgeübt wird, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit.</li> <li>Eine kleine Kraft, die über einen langen Zeitraum ausgeübt wird, kann die gleiche Zusatzgeschwindigkeit zur Folge haben wie eine große Kraft, die nur einen kurzen Moment wirkt.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Lehrervortrag/Klassengespräch<br>Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Lesen im Schülerheft (S. 16, Kapitel 5.2)</li> <li>Aufgabe im Workbook (S. 35, A1)</li> </ul> |
| 5 Min  | Beispiele zum<br>neuen Konzept<br>Einwirkungs-<br>dauer   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Besprechen der Beispiele aus dem Schülertext im Klassengespräch</li> <li>a) Seitenwind und b) Formel I</li> <li>Wie unterscheidet sich jeweils die Einwirkungsstärke und die Einwirkungsdauer in den Beispielen?</li> <li>Welche Folgen hat dies für die Zusatzgeschwindigkeit?</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Klassengespräch<br>Schülertext S. 17                                                                                                                                                |
| 15 Min | Umgang mit<br>neuen Konzept<br>Einwirkungs-<br>dauer      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler simulieren verschiedene Einwirkungsdauern durch einen Ventilator in der Simulation „Stoss“, Anleitung zur Simulation befindet sich im Workbook <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schüler sollen den Zusammenhang zwischen der Einwirkungsdauer und der Zusatzgeschwindigkeit überprüfen</li> <li>Hierbei wird die Einwirkungsdauer durch die breite eines Ventilators variiert, der eine konstante Kraft ausübt</li> </ul> </li> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben im Workbook, Besprechung anschließend im Plenum</li> </ul> <p style="text-align: center;">--- Ende von Einwirkungsdauer ---</p>                                                                                                                                                                                                                            | Gruppenarbeit<br>PC mit Simulation „Stoss“<br>Anleitung zur Simulation im Workbook S. 36-38<br><br>Workbook S. 37-38, A2 – A4<br>Klassengespräch                                    |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                               | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                         |
|--------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen | <ul style="list-style-type: none"> <li>Versuch 4 Schülertext S. 17 wird im Plenum durchgeführt               <ul style="list-style-type: none"> <li>Es soll etwa gleichstark gegen einen Fußball und dann gegen einen Medizinball getreten werden.</li> <li>Die Schüler sollen eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit machen.</li> </ul> </li> <li>Schüler führen Versuch 5 Schülertext S. 17 in Gruppenarbeit durch               <ul style="list-style-type: none"> <li>Nun soll etwa gleichstark gegen unterschiedlich schwere Kugeln gestoßen werden.</li> <li>Die Schüler sollen auch hier wieder eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit machen</li> </ul> </li> <li>Das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit wird umso größer, je leichter die Kugel/ der Ball ist. Bei einem schweren Gegenstand ist bei gleichstarker Einwirkung die Zusatzgeschwindigkeit kleiner.</li> <li>Leitfrage: Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Masse und der Zusatzgeschwindigkeit</li> </ul> | Plenum<br>V4 Schülertext S. 17<br>Fußball, Medizinball<br><br>Gruppenarbeit<br>V5 Schülertext S. 17<br>Unterschiedlich schwere Kugeln<br><br>Tafel |
| 5 Min  | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Masse   | Die Lehrkraft informiert über <ul style="list-style-type: none"> <li>das Konzept der Masse.               <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Masse wird mit dem Symbol <math>m</math> bezeichnet. Sie wird üblicherweise in der Einheit 1 kg angegeben.</li> <li>Je größer die Masse eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper erhält.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Lehrervortrag/Klassengespräch<br>Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Lesen im Schülerheft (S. 16, Kapitel 5.2)</li> </ul>         |
| 5 Min  | Beispiele zum<br>neuen Konzept<br>Masse     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Besprechen der Beispiele aus dem Schülertext im Klassengespräch</li> <li>a) Leichtathletik</li> <li>Wie unterscheidet sich jeweils die Masse in dem Beispiel.</li> <li>Welche Auswirkung hat dies auf die Zusatzgeschwindigkeit?</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Klassengespräch<br>Schülertext S. 18                                                                                                               |
| 15 Min | Umgang mit<br>neuen Konzept<br>Masse        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler simulieren verschiedene Massen in der Simulation „Stoss“, Anleitung zur Simulation befindet sich im Workbook               <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schüler sollen den Zusammenhang zwischen der Masse und der Zusatzgeschwindigkeit überprüfen</li> <li>Hierbei wird im ersten Schritt die Masse bei einer konstanten Einwirkung variiert.</li> <li>Im zweiten Schritt werden systematisch Masse und Einwirkung variiert.</li> </ul> </li> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben im Workbook, Besprechung anschließend im Plenum</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Gruppenarbeit<br>PC mit Simulation „Stoss“<br>Anleitung zur Simulation im Workbook S. 39-41<br><br>Workbook S. 39-41, A1 – A3<br>Klassengespräch   |
| 5 Min  | Zusammenfassung                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                                                       |

|        |                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                     |
|--------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Überleitung                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Aufgreifen der 2. Leitfrage:               <ul style="list-style-type: none"> <li>Es soll etwa gleichstark gegen einen Fußball und dann gegen einen Medizinball getreten werden.</li> </ul> </li> <li>Die Schüler formulieren Vermutung zur zweiten Leitfrage sollen eine Aussage über die Zusatzgeschwindigkeit machen.               <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Beschleunigung wird umso größer, je leichter der Ball ist. Bei einem schweren Gegenstand ist bei gleichstarker Einwirkung die Beschleunigung kleiner.</li> </ul> </li> </ul>                   | Plenum<br><br>Fußball, Medizinball<br><br>ggf. Tafel                                                                                                                |
| 5 Min  | Einführung des<br>neuen Konzepts<br>Masse | Die Lehrkraft informiert über das Konzept der Masse. <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Masse wird mit dem Symbol <math>m</math> bezeichnet. Sie wird üblicherweise in der Einheit 1 kg angegeben.</li> <li>Je größer die Masse eines Gegenstands ist, auf den eine Kraft ausgeübt wird, desto kleiner ist die Beschleunigung, die der Körper erhält.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                | Lehrervortrag/Klassengespräch<br>Alternativen: <ul style="list-style-type: none"> <li>Lesen im Schülerheft (S. 16, Kapitel 5.2)</li> </ul>                          |
| 5 Min  | Beispiele zum<br>neuen Konzept<br>Masse   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Besprechen der Beispiele aus dem Schülertext im Klassengespräch</li> <li>a) PKW vs. LKW</li> <li>Wie unterscheidet sich jeweils die Masse in dem Beispiel.</li> <li>Welche Auswirkung hat dies auf die Beschleunigung?</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Klassengespräch<br>Schülertext S. 18                                                                                                                                |
| 15 Min | Umgang mit<br>neuen Konzept<br>Masse      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler simulieren verschiedene Massen in der Simulation „Phet: Kraft und Bewegung“, Anleitung zur Simulation befindet sich im Workbook               <ul style="list-style-type: none"> <li>Die Schüler sollen den Zusammenhang zwischen der Masse und der Beschleunigung überprüfen</li> <li>Hierbei wird im ersten Schritt die Masse bei einer konstanten Einwirkung variiert.</li> <li>Im zweiten Schritt werden systematisch Masse und Einwirkung variiert.</li> </ul> </li> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben im Workbook, Besprechung anschließend im Plenum</li> </ul> | Gruppenarbeit<br>PC mit Simulation „Phet: Kraft und Bewegung“<br>Anleitung zur Simulation im Workbook S. 39-41<br><br>Workbook S. 39-41, A1 – A3<br>Klassengespräch |
| 5 Min  | Zusammenfassung                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                                                                        |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

Themen der 7. Unterrichtseinheit:

- Die Newton'sche Bewegungsgleichung

Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Newton'schen Bewegungsgleichung nennen.
- den Zusammenhang zwischen einer Kraft, der Einwirkungsdauer, der Masse des Körpers und der Zusatzgeschwindigkeit, die der Körper erhält erklären.
- Alltagsanwendungen mit Hilfe der NBG erklären.

Themen der 7. Unterrichtseinheit:

- Die Newton'sche Bewegungsgleichung

Länge der Einheit:

Ca. 80 Min

Lernziele der Stunde:

Die SuS können

- die Newton'schen Bewegungsgleichung nennen.
- den Zusammenhang zwischen einer Kraft, der Masse des Körpers und der Beschleunigung, die der Körper erhält erklären.
- Alltagsanwendungen mit Hilfe der NBG erklären.

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer  | Teilabschnitt                                        | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der letzten Unterrichtseinheiten: Einwirkung, Einwirkungsdauer und Masse               <ul style="list-style-type: none"> <li>Definition der Kraft, Einwirkungsdauer und Masse</li> <li>Wiederholung des Zusammenhangs zwischen:                   <ul style="list-style-type: none"> <li>Einwirkungsstärke und Zusatzgeschwindigkeit</li> <li>Einwirkungsdauer und Zusatzgeschwindigkeit</li> <li>Masse und Zusatzgeschwindigkeit</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Klassengespräch                                                                                                                                                                   |
| 15 Min | Einführung der<br>Newton'schen<br>Bewegungsgleichung | <p>Die Lehrkraft informiert über</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>die Newton'sche Bewegungsgleichung               <ul style="list-style-type: none"> <li>Einflussfaktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit, die ein Körper durch eine Einwirkung erhält sind: Kraft (Richtung und Stärke der Einwirkung), die Einwirkungsdauer und die Masse</li> <li>Weitere Einflussfaktoren gibt es nicht</li> <li>Alle Einflussfaktoren werden in der Newton'schen Bewegungsgleichung (abgekürzt NBG) zusammengefasst:                   <math display="block">\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \Delta \vec{v}</math> <ol style="list-style-type: none"> <li>Wenn eine Kraft <math>\vec{F}</math> auf einen Körper wirkt, erhält dieser eine Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math></li> <li>Richtung der Kraft <math>\vec{F}</math> und Richtung der Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math> sind gleich</li> <li>Je größer die Einwirkungsstärke der Kraft <math>\vec{F}</math>, desto größer ist das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math>.</li> <li>Je größer die Einwirkungsdauer <math>\Delta t</math>, desto größer das Tempo der Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math>.</li> <li>Je größer die Masse <math>m</math> eines Körpers, desto kleiner ist das Tempo Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math></li> </ol> </li> <li>Die Maßeinheit für die Kraft heißt Newton (N)</li> <li>Die Einheit kann mithilfe der Einheiten der Einwirkungsdauer <math>\Delta t</math> (Sekunden s), der Masse <math>m</math> (Kilogramm kg) und der Zusatzgeschwindigkeit <math>\Delta \vec{v}</math> (Meter pro Sekunde m/s) ausgedrückt werden:                   <math display="block">1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}</math> </li> </ul> </li> </ul> | <p>Lehrervortrag/Klassengespräch</p> <p>Alternativen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lesen im Schülerheft (S. 18)</li> <li>Aufgabe im Workbook (S. 43, A1)</li> </ul> |

| Dauer  | Teilabschnitt                                        | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                        |
|--------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 10 Min | Motivation/<br>Aktivierung von<br>Vorwissen          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Wiederholung der letzten Unterrichtseinheiten: Einwirkung und Masse               <ul style="list-style-type: none"> <li>Definition der Kraft und Masse</li> <li>Wiederholung des Zusammenhangs zwischen:                   <ul style="list-style-type: none"> <li>Einwirkungsstärke und Beschleunigung</li> <li>Masse und Beschleunigung</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Klassengespräch                                                                                                                                                                   |
| 15 Min | Einführung der<br>Newton'schen<br>Bewegungsgleichung | <p>Die Lehrkraft informiert über</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>die Newton'sche Bewegungsgleichung               <ul style="list-style-type: none"> <li>Einflussfaktoren auf die Zusatzgeschwindigkeit, die ein Körper durch eine Einwirkung erhält sind: Kraft (Richtung und Stärke der Einwirkung) und die Masse</li> <li>Weitere Einflussfaktoren gibt es nicht</li> <li>Alle Einflussfaktoren werden in der Newton'schen Bewegungsgleichung (abgekürzt NBG) zusammengefasst:                   <math display="block">\vec{F} = m \cdot a</math> <ol style="list-style-type: none"> <li>Wenn eine Kraft <math>F</math> auf einen Körper wirkt, erhält dieser eine Beschleunigung <math>a</math></li> <li>Richtung der Kraft <math>F</math> und Richtung der Beschleunigung <math>a</math> sind gleich</li> <li>Je größer die Einwirkungsstärke der Kraft <math>F</math>, desto größer ist die Beschleunigung <math>a</math>.</li> <li>Je größer die Masse <math>m</math> eines Körpers, desto kleiner ist die Beschleunigung</li> </ol> </li> <li>Die Maßeinheit für die Kraft heißt Newton (N)</li> <li>Die Einheit kann mithilfe der Einheiten der Masse <math>m</math> (Kilogramm kg) und der Beschleunigung <math>a</math> (Meter pro Sekunde <math>\text{m/s}^2</math>) ausgedrückt werden:                   <math display="block">1 \text{ N} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}</math> </li> </ul> </li> </ul> | <p>Lehrervortrag/Klassengespräch</p> <p>Alternativen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lesen im Schülerheft (S. 18)</li> <li>Aufgabe im Workbook (S. 43, A1)</li> </ul> |
| 35 Min | Beispiele zur<br>Newton'schen<br>Bewegungsgleichung  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Besprechung von Beispiel a) Fausten oder Stoppen? im Plenum</li> <li>Bild 6.1 wird gezeigt               <ul style="list-style-type: none"> <li>Soll der Torwart den Ball mit Hinblick auf das Verletzungsrisiko lieber Halten oder Zurückfausten?</li> </ul> </li> <li>Pfeilbilder zu den drei Situationen auf der Folie oder auf der Tafel zeichnen lassen               <ul style="list-style-type: none"> <li>In welchem Fall ist der Pfeil der Geschwindigkeitsänderung am kürzesten?</li> <li>Was bedeutet dies für die Kraft?</li> </ul> </li> <li>Besprechung von Beispiel b) Auffahrunfall eines Autos               <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler lesen sich den Text auf Seite 19 im Schülerheft durch</li> <li>Frage: Welche Faktoren sind in den beiden Fällen (Auto gegen Betonwand und Auto gegen Drahtzaun gleich? Welche sind verschieden?</li> <li>Schüler sollen mit Hilfe der NBG argumentieren, warum im zweiten Fall die Kraft geringer ist.</li> <li>Argumentation wird durch die Lehrkraft an der Tafel anhand der NBG als Sicherung nochmals verdeutlicht.</li> </ul> </li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p>Klassengespräch</p> <p>Schülerheft S. 19</p> <p>Folie / Tafel</p> <p>Schülerheft S. 19</p> <p>Tafel</p>                                                                        |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)

| Dauer      | Teilabschnitt                                 | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Material/Medien/Sozialform                                                                                                                                                                                              |
|------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 35 Min     | Beispiele zur Newton'schen Bewegungsgleichung | <ul style="list-style-type: none"> <li>Besprechung von Beispiel a) Fausten oder Stoppen? im Plenum</li> <li>Bild 6.1 wird gezeigt <ul style="list-style-type: none"> <li>Soll der Torwart den Ball mit Hinblick auf das Verletzungsrisiko lieber Halten, Zurückfausten oder den Ball ablenken?</li> </ul> </li> <li>Pfeilbilder zu den drei Situationen auf der Folie oder auf der Tafel zeichnen lassen <ul style="list-style-type: none"> <li>In welchem Fall ist der Pfeil der Zusatzgeschwindigkeit am kürzesten?</li> <li>Was bedeutet dies für die Kraft?</li> </ul> </li> <li>Besprechung von Beispiel b) Auffahrunfall eines Autos <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler lesen sich den Text auf Seite 19 im Schülertext durch</li> <li>Frage: Welche Faktoren sind in den beiden Fällen (Auto gegen Betonwand und Auto gegen Drahtzaun gleich? Welche sind verschieden?</li> <li>Schüler sollen mit Hilfe der NBG argumentieren, warum im zweiten Fall die Kraft geringer ist.</li> <li>Argumentation wird durch die Lehrkraft an der Tafel anhand der NBG als Sicherung nochmals verdeutlicht.</li> </ul> </li> <li>Postererstellung zu Anwendungsbeispielen der NBG</li> <li>Anleitung zur Postererstellung im Workbook S. 43 Aufgabe 2</li> <li>Schüler werden in Gruppen aufgeteilt</li> <li>Beispiele zur NBG c) bis i) werden auf die Gruppen aufgeteilt</li> <li>Schüler stellen sich die Beispiele in einem Museumsrundgang dem anderen Gruppen vor</li> </ul> | Klassengespräch<br>Schülertext S. 19<br><br>Folie / Tafel<br><br>Schülertext S. 19<br><br>Tafel<br><br>Gruppenarbeit<br>Workbook S. 43, A2<br>Beispiele c) bis i) im Schülertext S. 19 bis S. 21<br><br>Museumsrundgang |
| 15 Min     | Übung zur NBG                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben 3 bis 7 im Workbook (S. 44/45)</li> <li>Aufgaben werden im Plenum besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Einzelarbeit<br>Workbook S. 44/45, A3 – A7                                                                                                                                                                              |
| 5 Min      | Zusammenfassung                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                                                                                                                            |
| (Optional) | Rückblick über die Reihe                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Lehrer gibt einen Rückblick über die gelaufen Unterrichtseinheiten und macht die gewonnen Kompetenzen für Schüler nochmal transparent</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Tafel                                                                                                                                                                                                                   |

| Dauer      | Teilabschnitt            | Unterrichtsgeschehen/Aufträge/Tafelbild                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Material/Medien/Sozialform                                                                                       |
|------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|            |                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Postererstellung zu Anwendungsbeispielen der NBG</li> <li>Anleitung zur Postererstellung im Workbook S. 43 Aufgabe 2</li> <li>Schüler werden in Gruppen aufgeteilt</li> <li>Beispiele zur NBG c) bis i) werden auf die Gruppen aufgeteilt</li> <li>Schüler stellen sich die Beispiele in einem Museumsrundgang dem anderen Gruppen vor</li> </ul> | Gruppenarbeit<br>Workbook S. 43, A2<br>Beispiele c) bis i) im Schülertext S. 19 bis S. 21<br><br>Museumsrundgang |
| 15 Min     | Übung zur NBG            | <ul style="list-style-type: none"> <li>Schüler bearbeiten die Aufgaben 3 bis 7 im Workbook (S. 44-45)</li> <li>Aufgaben werden im Plenum besprochen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                           | Einzelarbeit<br>Workbook S. 44/45, A3 – A7                                                                       |
| 5 Min      | Zusammenfassung          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die SuS formulieren mit eigenen Worten, was sie in der Stunde gelernt haben.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                           | Eigene Notizen / evtl. Tafel                                                                                     |
| (Optional) | Rückblick über die Reihe | <ul style="list-style-type: none"> <li>Der Lehrer gibt einen Rückblick über die gelaufen Unterrichtseinheiten und macht die gewonnen Kompetenzen für Schüler nochmal transparent</li> </ul>                                                                                                                                                                                              | Tafel                                                                                                            |

Verlaufspläne: 2DD-Mechanikkonzept (oben) und 1D-Adaption (unten)



## **D Fachwissenstest zu Kraft und Bewegung**

## Test – Kraft und Bewegung

|               |                                                                                                                                       |                                                                      |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
|               | Alter                                                                                                                                 | Geschlecht                                                           |
| Schule: _____ | <div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> </div> | <input type="checkbox"/> weiblich                                    |
| Klasse: _____ |                                                                                                                                       | <input type="checkbox"/> männlich<br><input type="checkbox"/> divers |

### Code

| Die <u>ersten beiden Buchstaben</u> des ersten <b>Vornamens</b> deines Vaters |  | Der <u>Tag</u> deines <b>Geburtsdatums</b> |  | Der <u>zweite Buchstabe</u> deines <b>Vornamens</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------|--|-----------------------------------------------------|
| P E ter<br>M i chael                                                          |  | 0 7 .04.1994<br>3 1 .01.1993               |  | M A rco<br>F E lix                                  |
|                                                                               |  |                                            |  |                                                     |

Liebe Schülerin, lieber Schüler

mit der Teilnahme an diesem Test leistest du einen wichtigen Beitrag zu einem Forschungsprojekt, das die Verbesserung des Physikunterrichts zum Ziel hat.

Bearbeite bitte **ALLE** Aufgaben und lass keine aus. Wenn du dir mal nicht sicher bist, kreuze die Lösung an, die du für die Beste hältst. **Bitte nicht zurückblättern.**

Für uns ist es wichtig, dass du die Fragen auf den folgenden Seiten selbstständig beantwortest. Wir wollen nicht herausfinden, wer der Beste ist. Außerdem bekommen weder dein Lehrer oder deine Lehrerin noch deine Eltern deine Antworten oder deine Ergebnisse mitgeteilt.

Der Test besteht aus Multiple-Choice Fragen, bei denen immer nur **EINE** Antwort richtig ist. Bitte geh beim Bearbeiten der Aufgaben folgendermaßen vor:

- |                                                                                                                                                                               | Nicht eindeutig                                                                                                         | Eindeutig                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| • Immer nur <b>EINE</b> Antwortmöglichkeit ankreuzen und das Kreuz mittig im Antwortkästchen platzieren.                                                                      | <input checked="" type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/>            |
| • Wenn du dich vertan hast und eine Antwort verändern willst, male das falsch angekreuzte Kästchen vollständig aus und kreuze die richtige Antwort an.                        |                                                                                                                         | <input checked="" type="checkbox"/><br><input checked="" type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> |
| • Wenn du ein Kästchen ausgemalt hast und dir später, aber sicher bist, dass dies doch die richtige Antwort ist, setze ein neues Kreuz unmittelbar <b>NEBEN</b> das Kästchen. |                                                                                                                         | <input type="checkbox"/><br><input checked="" type="checkbox"/><br><input checked="" type="checkbox"/><br><input type="checkbox"/> |

Die Seiten sind beidseitig bedruckt, beachte also bitte auch immer die **Rückseiten**.

**Danke für deine Hilfe!**

Wir möchten nun deine Meinung über Physik und deinen Physikunterricht erfahren. Es gibt keine „richtigen“ Antworten zu den einzelnen Fragen, sondern wir sind an deiner persönlichen Meinung und deinen Erfahrungen interessiert.

Wie sehr stimmst du mit den folgenden Aussagen überein?

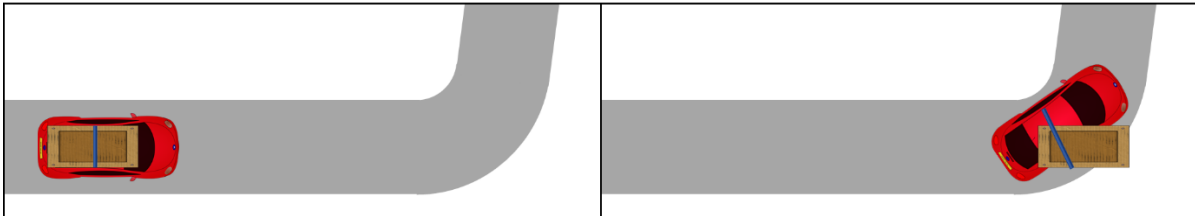
(Bitte in jeder Zeile nur **ein** Kästchen ankreuzen.)

|                                                                                      | Stimme<br>ganz zu        | Stimme<br>eher zu        | Stimme<br>eher<br>nicht zu | Stimme<br>gar<br>nicht zu |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| <b>Im Allgemeinen macht es mir Spaß, mich mit physikalischen Themen zu befassen.</b> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Ich lese gerne etwas über Physik.</b>                                             | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Ich beschäftige mich gerne mit physikalischen Problemen.</b>                      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Ich eigne mir gerne neues Wissen in der Physik an.</b>                            | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Ich bin interessiert, Neues in der Physik zu lernen.</b>                          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |

|                                                                                           | Stimme<br>ganz zu        | Stimme<br>eher zu        | Stimme<br>eher<br>nicht zu | Stimme<br>gar<br>nicht zu |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| <b>Ich glaube, dass ich anspruchsvollen Stoff im Physikunterricht leicht lernen kann.</b> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Normalerweise kann ich Prüfungsfragen im Physikunterricht gut beantworten.</b>         | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Ich lerne neuen Stoff im Physikunterricht schnell.</b>                                 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Den Stoff im Physikunterricht finde ich einfach.</b>                                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Wenn ich in Physik unterrichtet werde, verstehe ich neue Begriffe leicht.</b>          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |
| <b>Es fällt mir leicht, neue Ideen im Physikunterricht zu verstehen.</b>                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>   | <input type="checkbox"/>  |

N1.Z.01

**Der Fahrer eines Autos transportiert eine Kiste auf dem Dach, ohne sie richtig fest zu machen. Beim Fahren durch eine Kurve rutscht die Kiste vom Dach des Autos.**



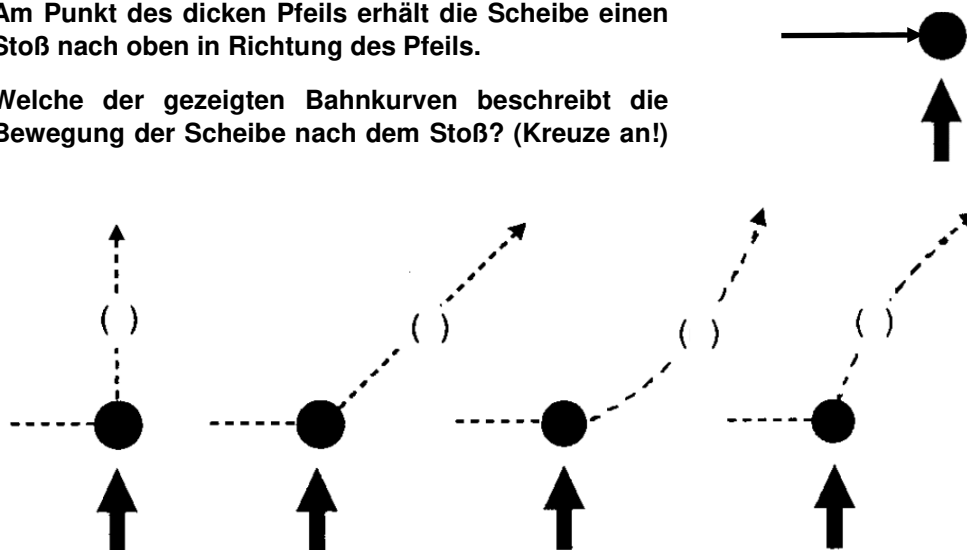
**Was ist die Ursache dafür?**

- ☐ Das Paket fällt herunter, weil die Reibungskraft in der Kurve geringer ist.
- ☐ Durch die Kreisbewegung wird das Paket von der Zentrifugalkraft nach außen gedrückt.
- ☐ Das Paket verbleibt in seinem Bewegungszustand. Das Auto fährt quasi unter dem Paket weg.
- ☐ Der Fahrer übt über das Lenken eine Kraft auf die Kiste aus, wodurch diese herunterfällt.

N2.KB.ZS.01

**Eine Scheibe bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit auf einer reibungsfreien Oberfläche. Am Punkt des dicken Pfeils erhält die Scheibe einen Stoß nach oben in Richtung des Pfeils.**

**Welche der gezeigten Bahnkurven beschreibt die Bewegung der Scheibe nach dem Stoß? (Kreuze an!)**



Test – Kraft und Bewegung

N2.KBK.0G.06.A

**Maria drückt gegen einen schweren Stein, doch er bewegt sich nicht. Wieso?**

- ☐ Er bewegt sich nicht. Daher können keine Kräfte wirken.
  - ☐ Maria übt auf den Stein eine Kraft aus, aber die vom Stein ausgeübte Kraft ist größer.
  - ☐ Es muss eine zweite Kraft auf den Stein wirken, die Marias Kraft entgegengesetzt ist.
  - ☐ Der Stein ist schwerer als Maria.
- 

B4.02

**Welche Aussage über die Geschwindigkeitsänderung ist richtig?**

- ☐ Um eine Bewegung umzukehren, muss die Geschwindigkeitsänderung kleiner sein als die Anfangsgeschwindigkeit.
  - ☐ Um eine Bewegung umzukehren muss die Geschwindigkeitsänderung größer sein als die Anfangsgeschwindigkeit.
  - ☐ Die Geschwindigkeitsänderung kann nie größer sein als die Endgeschwindigkeit.
  - ☐ Die Geschwindigkeitsänderung kann nie größer sein als die Anfangsgeschwindigkeit.
- 

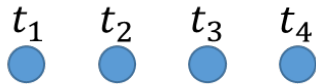
N2.KKB.02.A

**Amelia schlägt einen Puck auf einer ebenen, reibungsfreien Oberfläche. Dann beobachtet sie die Geschwindigkeit des Pucks. Welche der folgenden Aussagen ist am ehesten richtig?**

- ☐ Die Geschwindigkeit ist konstant, weil die von Amelia ausgeübte Kraft weiterhin auf den Puck wirkt.
- ☐ Die Geschwindigkeit ist konstant, weil keine horizontale Kraft auf den Puck wirkt.
- ☐ Die Geschwindigkeit nimmt ab, weil keine horizontale Kraft auf den Puck wirkt.
- ☐ Die Geschwindigkeit beträgt 0, weil keine horizontale Kraft auf den Puck wirkt.

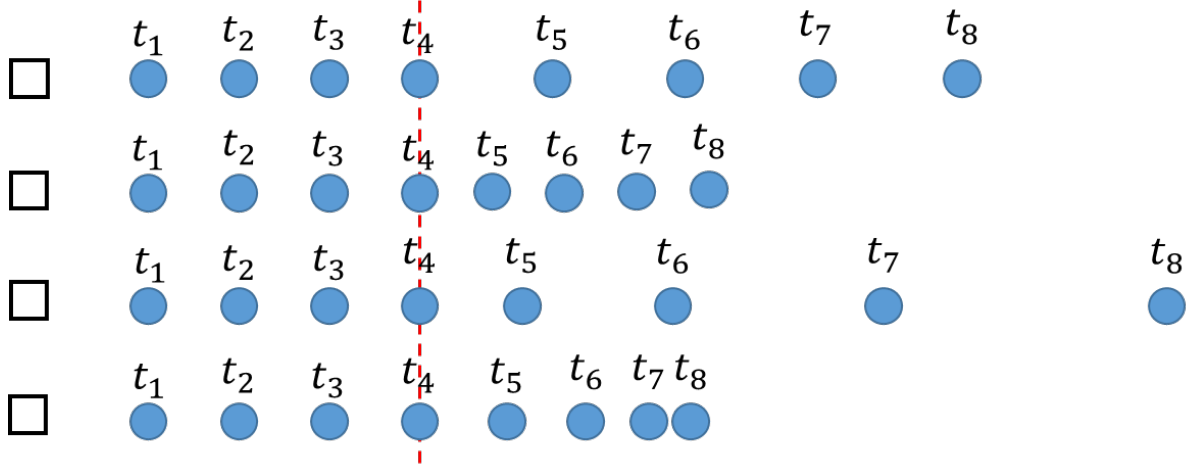
N2.KB.E.01

Ein Körper bewegt sich wie im unteren Stroboskopbild mit einer konstanten Geschwindigkeit von links nach rechts.



Ab dem Zeitpunkt  $t_4$  wird eine konstante Kraft in Bewegungsrichtung auf den Körper ausgeübt. Welches der 4 darunterliegenden Stroboskopbilder beschreibt die Bewegung am besten?

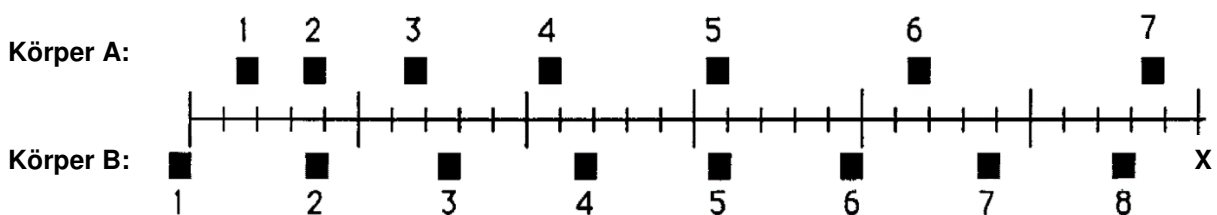
Kreuze an!



B2.E.01

Die Abbildung zeigt die Positionen zweier Körper im zeitlichen Abstand von jeweils 0,2s.

Die Körper bewegen sich nach rechts.



Sind die beiden Körper irgendwann einmal gleich schnell?

- ☐ Nein.
- ☐ Ja, zu den Zeitpunkten 2 und 5.
- ☐ Ja, irgendwann im Intervall von 3 bis 4.
- ☐ Darüber ist keine Aussage möglich.

Test – Kraft und Bewegung

N2.KKB.04.A

**Eine Rakete bewegt sich im Weltall reibungsfrei. Wenn der Astronaut den Antrieb der Rakete während des Flugs ausschaltet, wird**

- ☐ die Rakete gleichmäßig immer langsamer, bis die Kraft des Antriebs verbraucht ist.
  - ☐ die Rakete gleichmäßig immer langsamer, weil keine Kräfte auf sie wirken.
  - ☐ sich die Rakete mit einer konstanten Geschwindigkeit weiterbewegen, weil keine Kräfte auf sie wirken.
  - ☐ sich die Rakete mit einer konstanten Geschwindigkeit weiterbewegen, weil die Kraft des Antriebs immer noch auf sie wirkt.
- 

B1.03

**Eine Schwimmerin ist im Wasser  $4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  schnell.**

**Welche Zeit in Minuten benötigt sie für eine Strecke von 100 m?**

- ☐ 1,5 Minuten
  - ☐ 2,5 Minuten
  - ☐ 15 Minuten
  - ☐ 25 Minuten
- 

N2.KBK.0G.02

**Ein Apfel hängt am Baum. Der Apfel bewegt sich nicht.**

**Welche Kräfte wirken auf den Apfel.**

- ☐ Nur eine nach oben gerichtete Kraft durch den Ast.
- ☐ Es wirken keine Kräfte, da der Apfel sich in Ruhe befindet.
- ☐ Sowohl eine nach unten gerichtete Gewichtskraft, als auch eine nach oben gerichtete Kraft durch den Ast.
- ☐ Nur eine nach unten gerichtete Gewichtskraft.

N2.VKB.02

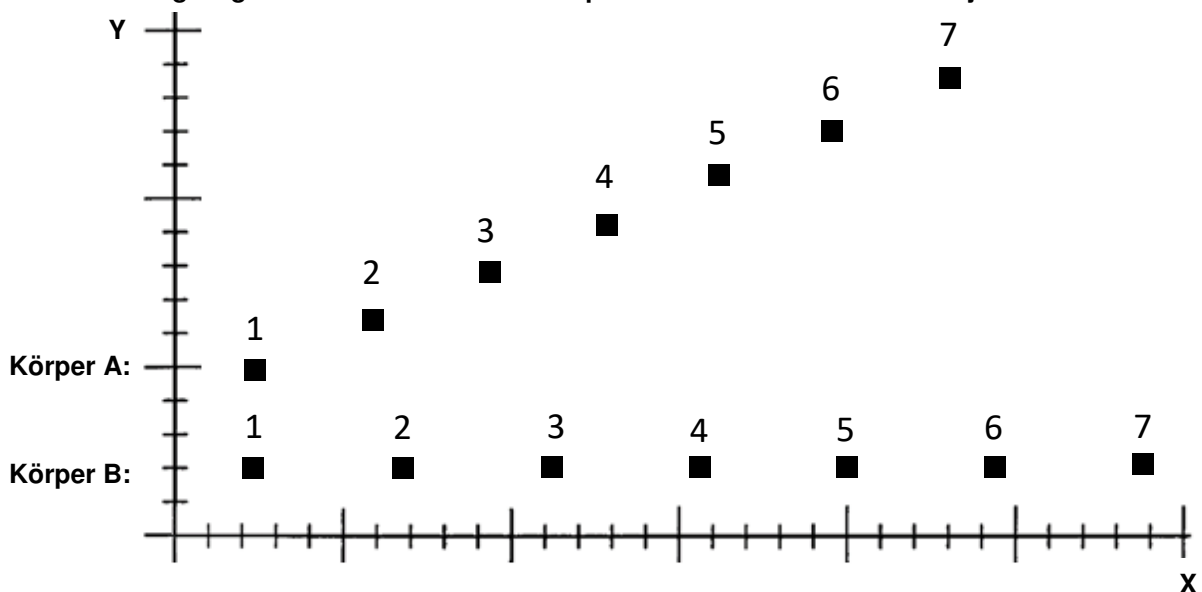
Zwei Seifenkisten werden mit gleichen CO<sub>2</sub>-Gasflaschen aus dem Stand auf gerader Strecke angetrieben. Eine Seifenkiste ist dabei doppelt so schwer wie die andere.

Vergleiche die Endgeschwindigkeiten der Seifenkisten, wenn die Gasflaschen sich gleich entleeren.

- ☐ Die schwere Seifenkiste hat eine größere Geschwindigkeit als die leichte.
- ☐ Die leichte Seifenkiste hat eine größere Geschwindigkeit als die schwere.
- ☐ Beide haben die gleiche Geschwindigkeit.
- ☐ Der Vergleich ist nur möglich, wenn man das genaue Gewicht der Seifenkisten kennt.

B2.Z.02

Die Abbildung zeigt die Positionen zweier Körper im zeitlichen Abstand von jeweils 1s.



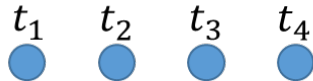
Welcher der beiden Körper ist schneller?

- ☐ Körper A ist schneller als Körper B.
- ☐ Darüber ist keine Aussage möglich.
- ☐ Körper B ist schneller als Körper A.
- ☐ Beide Körper sind gleich schnell.

Test – Kraft und Bewegung

N2.KB.ES.01

Ein Körper bewegt sich wie im unteren Stroboskopbild mit einer konstanten Geschwindigkeit von links nach rechts.

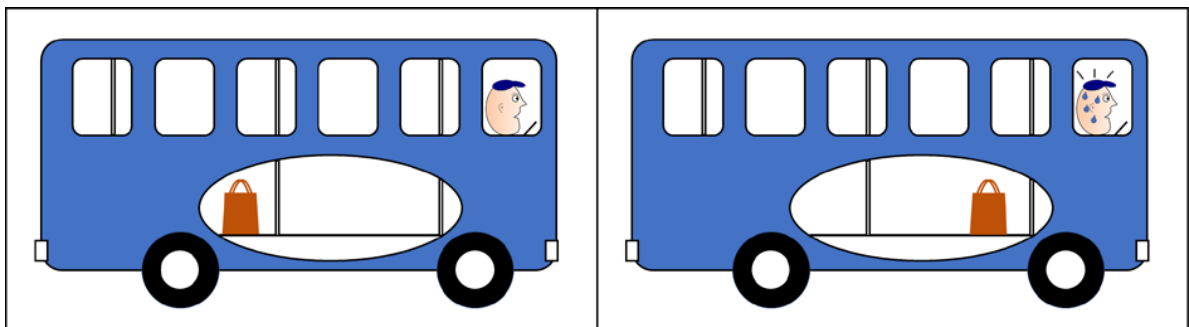


Zum Zeitpunkt  $t_4$  wird ein kurzer Stoß entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung auf den Körper ausgeübt. Welches der 4 Stroboskopbilder beschreibt die Bewegung am besten? Kreuze an!

- ☐
- ☐
- ☐
- ☐

N1.E.01

Ein Bus macht während der Fahrt eine Vollbremsung. Eine Tasche bewegt sich während des Bremsvorgangs im Bus weiter nach vorne.



Was ist die Ursache dafür?

- ☐ Da die Reibungskraft auf die Tasche nicht ausreicht, bewegt sie sich im Bus weiter nach vorne.
- ☐ Durch das Bremsen wirkt eine Kraft auf die Tasche, die sie nach vorne drückt.
- ☐ Durch den Bremsvorgang wird die Reibung zwischen Tasche und Bus aufgehoben.
- ☐ Die Kraft der Tasche ist nicht groß genug, um sich der Bremskraft zu widersetzen.

Test – Kraft und Bewegung

N2.VKB.01

**Ein Fußball und ein Medizinball werden mit der gleichen Kraft getreten.**

**Welche Aussage über die Geschwindigkeit der Bälle nach dem Tritt ist richtig?**

- ☐ Beide Bälle haben anschließend die gleiche Geschwindigkeit.
  - ☐ Der Fußball hat eine größere Geschwindigkeit als der Medizinball.
  - ☐ Über die Geschwindigkeit kann hier keine Aussage gemacht werden.
  - ☐ Der Medizinball hat eine größere Geschwindigkeit als der Fußball.
- 

B1.01

**Ein Sportler läuft 3000 m in genau 10 Minuten.**

**Wie schnell ist der Sportler in Metern pro Sekunde?**

- ☐  $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
  - ☐  $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
  - ☐  $50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
  - ☐  $300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- 

N2.KBK.0G.05.A

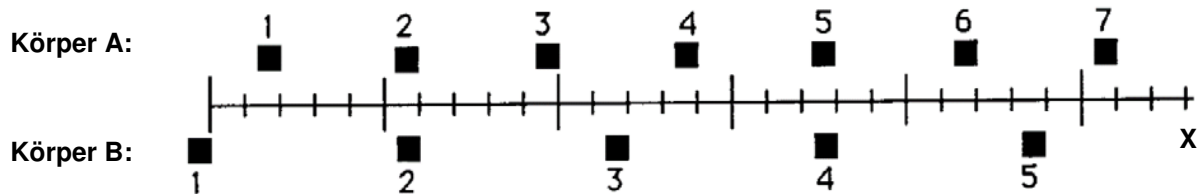
**Während des Besuches in einem Labor beobachtet Madison einen Tropfen eines glänzenden Materials. Der Tropfen scheint in der Luft zu schweben. Dabei bewegt er sich nicht. Was kann Madison daraus schlussfolgern?**

- ☐ Die Gewichtskraft kann nicht auf den Tropfen wirken, da er nicht herunterfällt.
- ☐ Die Gewichtskraft muss auf den Tropfen wirken, da er sonst davon schweben würde.
- ☐ Es wirken keine Kräfte auf den Tropfen, da er sich nicht bewegt.
- ☐ Alle Kräfte, die auf den Tropfen wirken, heben sich gegenseitig auf.

Test – Kraft und Bewegung

B2.E.02

Die Abbildung zeigt die Positionen zweier Körper im zeitlichen Abstand von jeweils 1 Sekunde. Die Körper bewegen sich nach rechts.



Welcher der beiden Körper ist schneller?

- ☐ Körper A ist schneller als Körper B.
  - ☐ Darüber ist keine Aussage möglich.
  - ☐ Körper B ist schneller als Körper A.
  - ☐ Beide Körper sind gleich schnell.
- 

N2.KKB.01

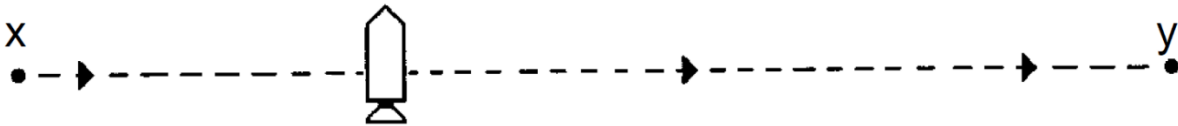
Ein Schlittschuh-Läufer beschleunigt aus dem Stand und gleitet anschließend ohne weitere aktive Bewegung weiter auf dem Eis. Die Reibung zwischen Schlittschuh und Eis soll hierbei vernachlässigt werden.

Welche Aussage über die Bewegung des Schlittschuh-Läufers trifft zu?

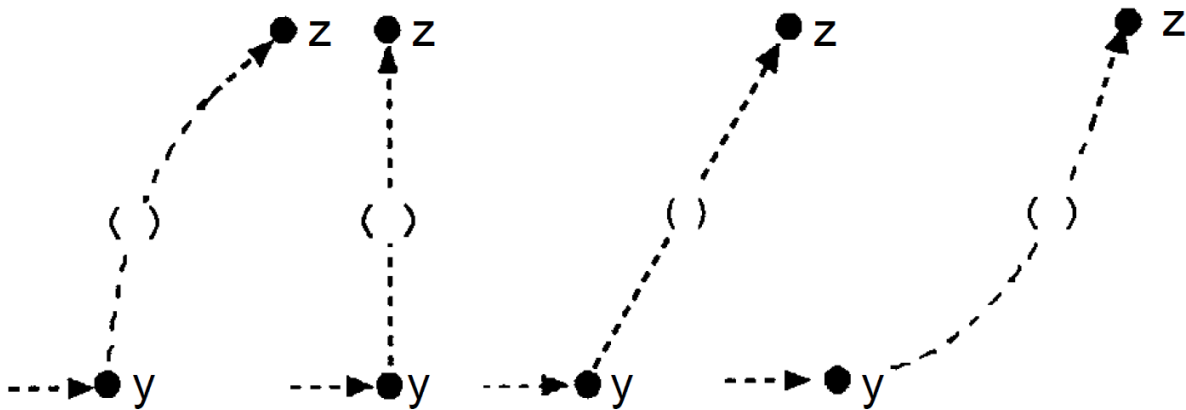
- ☐ Der Schlittschuh-Läufer wird mit der Zeit immer langsamer, da seine Antriebskraft fehlt.
- ☐ Der Schlittschuh-Läufer bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit weiter, da keine horizontale Kraft auf ihn wirkt.
- ☐ Der Schlittschuh-Läufer wird langsamer, da er nicht mehr aktiv beschleunigt.
- ☐ Der Schlittschuh-Läufer wird langsamer, da keine horizontale Kraft auf ihn wirkt.

N2.KB.Z.01

Ein Raumschiff, das sich im Weltraum von Position „x“ nach Position „y“ bewegt, wird nicht von äußeren Kräften beeinflusst. An Punkt „y“ wird der Raketenmotor gezündet und das Raumschiff bewegt sich auf einen Punkt „z“ zu. Der Motor erzeugt einen konstanten Schub im rechten Winkel zur Linie „xy“.



Welche Kurve beschreibt die Bahn der Rakete von „y“ nach „z“ am besten?



B1.02

Ein Vogel fliegt in der Luft und ist  $120 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  schnell.

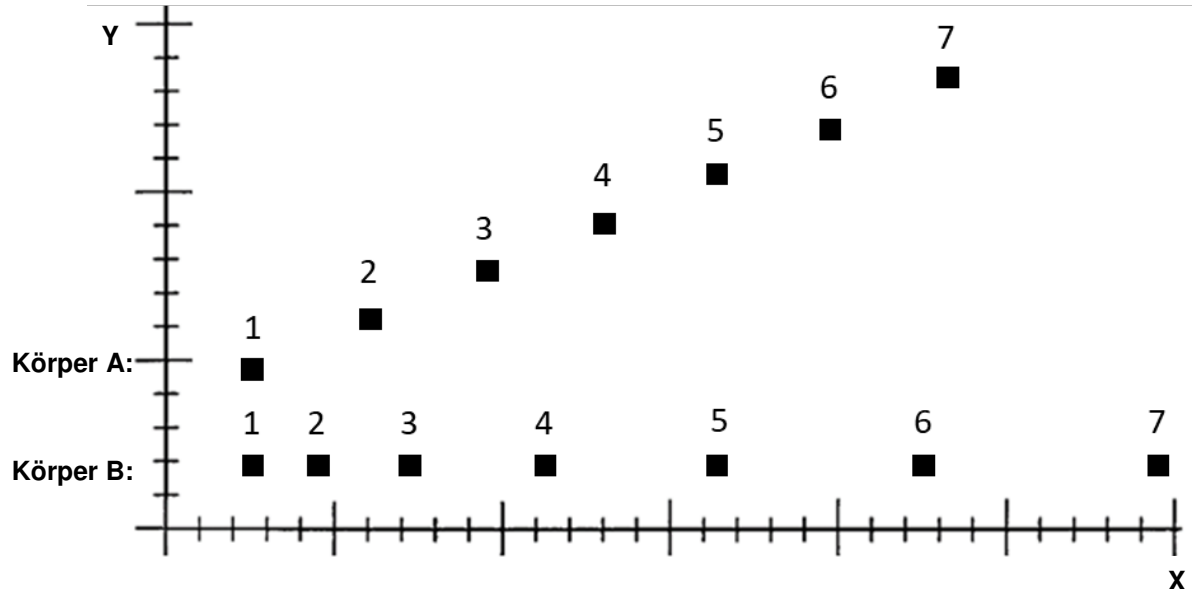
Welchen Weg in km legt der Vogel dabei in einer Zeit von 10 Minuten zurück?

- ☐ 2 km
- ☐ 20 km
- ☐ 120 km
- ☐ 1200 km

Test – Kraft und Bewegung

B2.Z.01

Die Abbildung zeigt die Positionen zweier Körper im zeitlichen Abstand von jeweils 0,2s.



Sind die beiden Körper irgendwann einmal gleich schnell?

- ☐ Nein
- ☐ Ja, zu den Zeitpunkten 1 und 5
- ☐ Ja, irgendwann im Intervall von 3 bis 4
- ☐ Darüber ist keine Aussage möglich.

N2.VBK.02

Ein Motorrad und ein Ferrari beschleunigen beide aus der Ruhe auf 100 km/h und brauchen dazu beide genau 6,5 Sekunden. Sie haben also die gleiche durchschnittliche Beschleunigung.

Was gilt dabei für die Kräfte, die auf die Fahrzeuge wirken?

- ☐ Auf das Motorrad wirkt eine größere Kraft.
- ☐ Auf den Ferrari wirkt eine größere Kraft.
- ☐ Auf beide Fahrzeuge wirkt die gleiche Kraft.
- ☐ Auf keines der beiden Fahrzeuge wirkt eine Kraft, da die Beschleunigung durch den Motor entsteht.

N2.KB.04.A

**José lässt einen Stein vom Dach eines hohen Gebäudes fallen. Die Gewichtskraft wirkt auf den Stein. Der Luftwiderstand soll vernachlässigt werden. Was kann man über die Fallgeschwindigkeit des Steins sagen?**

- ☐ Die Fallgeschwindigkeit wird konstant sein, weil die Gewichtskraft konstant ist.
  - ☐ Die Fallgeschwindigkeit wird zunächst zunehmen und dann konstant bleiben, weil die Gewichtskraft konstant ist.
  - ☐ Die Fallgeschwindigkeit wird ständig zunehmen, weil die Gewichtskraft konstant ist.
  - ☐ Die Fallgeschwindigkeit wird zunehmen, weil die Gewichtskraft zunimmt.
- 

B4.01

**Zwei gleiche Körper werden aus dem Stand konstant beschleunigt. Der zweite Körper wird doppelt so lange beschleunigt wie der erste.**

**Was gilt für die Endgeschwindigkeit?**

- ☐ Beide Körper haben die gleiche Endgeschwindigkeit.
- ☐ Die Endgeschwindigkeit vom zweiten Körper ist doppelt so groß, wie die des ersten Körpers.
- ☐ Die Endgeschwindigkeit vom zweiten Körper ist halb so groß, wie die des ersten Körpers.
- ☐ Da nur die Beschleunigungen bekannt sind, kann man über die Endgeschwindigkeiten nichts sagen.

N2.VBK.01

**Zwei Einkaufswagen bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit und sollen gleichzeitig gestoppt werden, indem gleich lang eine Kraft ausgeübt wird. Einkaufswagen „A“ ist dabei doppelt so schwer wie Einkaufswagen „B“.**

**Vergleiche die Kräfte, die für das Stoppen der Wagen benötigt wird. Welche Aussage stimmt?**

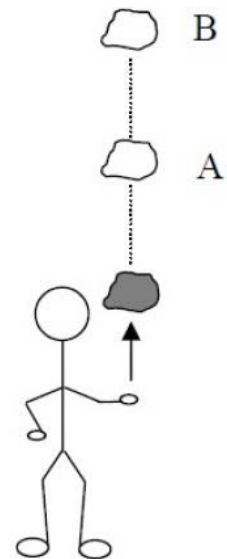
- ☐ Es ist keine Aussage über die Kräfte möglich, wenn man die Reibung nicht kennt.
  - ☐ Auf beide Einkaufswagen muss die gleiche Kraft ausgeübt werden.
  - ☐ Auf Einkaufswagen „B“ muss eine größere Kraft ausgeübt werden als auf „A“.
  - ☐ Auf Einkaufswagen „A“ muss eine größere Kraft ausgeübt werden als auf „B“.
- 

N2.BK.04.A

**Derek wirft einen Stein senkrecht in die Luft. Der Stein verlässt seine Hand, bewegt sich aufwärts durch Punkt A bis zum höchsten Punkt B.**

**Wieso stoppt der Stein im Punkt B? Luftreibung soll vernachlässigt werden.**

- ☐ Auf den Stein wirken im Punkt B keine Kräfte.
- ☐ Die Gewichtskraft und die von Derek ausgeübte Kraft sind jetzt gleich groß.
- ☐ Es ist keine von Derek ausgeübte Kraft mehr übrig.
- ☐ Die Gewichtskraft hat den Stein bis zum Stillstand verlangsamt.





# **E Liste der digitalen Anlagen der vorliegenden Arbeit**

Da in der vorliegenden Arbeit viel mit Excel-Tabellen und R- sowie SPSS-Skripten gearbeitet wurde, findet sich auf der beiliegenden DVD ein digitaler Anhang, der aus folgenden Elementen besteht:

## **Digitale Version der Dissertation**

- Dissertationsschrift (Dateiformat: PDF)

## **Interventionsmaterialien für beide Treatments**

- SchülerInnenhefte, Workbooks und Unterrichtsverlaufspläne (Dateiformat: PDF) sowie die bereitgestellten Simulationen

## **Dateien und Dokumente der Hauptstudie**

- Rohdaten der Erhebung (Dateiformat: Excel)
- Dateien zur Analyse der Daten:
  - Tabellen zu den verwendeten Daten in den verschiedenen Auswertungsmethoden (Dateiformat: Excel)
  - Dateien der Rasch-Analysen mit Winsteps (Dateiformat: Textdokument)

- Dateien der Analysen mit SPSS (Dateiformat: SPSS Statistics Data Document, SPSS Statistics Syntax File, SPSS Statistics Output Dokument)
- Skripte und Workspaces der Analysen mit R-Studio (Dateiformate: R-Datei, R Workspace)

# F Liste der aus der Dissertation hervorgegangenen Publikationen

## Zeitschriftenartikel

- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2021a). Elementarisierung der Mechanik in der Sekundarstufe I - Ergebnisse einer Studie. *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 1(20), 1-14.

## Tagungsbandbeiträge

- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2021b). Vergleich von Elementarisierungen der Mechanik in der Sekundarstufe I. In: Habig, S. (Hrsg.), *Naturwissenschaftlicher Unterricht und Lehrerbildung im Umbruch?* Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, online Jahrestagung 2020, 133–136.
- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2020a). Vergleich von Zugängen zur Mechanik in der Sekundarstufe I. In: Habig, S. (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen.* Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019, 1051–1054.
- Seiter, M., Krabbe, H. & Wilhelm, T. (2020b). Vergleich von Zugängen zur Mechanik in der Sekundarstufe I. In: *PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung 2020*, 271–280.



# G Lebenslauf

## Persönliche Daten

|                   |                                                                              |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Name              | Marco Seiter                                                                 |
| Anschrift         | An der Körne 16<br>59174 Kamen                                               |
| Geburtsdatum, Ort | 23.03.1994, Unna                                                             |
| E-Mail, Telefon   | <a href="mailto:Marco.seiter@rub.de">Marco.seiter@rub.de</a> , 02307/2783028 |



## Berufliche Tätigkeit

|             |                                                                                                                   |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2018 – 2021 | Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der AG Didaktik der Physik an der Ruhr-Universität Bochum und Promotionsstudent |
| 2017 – 2018 | Wissenschaftliche Hilfskraft in der AG Didaktik der Physik an der Ruhr-Universität Bochum                         |

## Schulische Ausbildung und Studium

|             |                                                                                                                                         |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2013 – 2018 | Studium an der Ruhr Universität Bochum:                                                                                                 |
| 2016 – 2018 | Master of Education Mathematik und Physik <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Abschluss Master of Education (06.09.2018)</li></ul>  |
| 2013 – 2016 | Lehramt 2-Fach-Bachelor Mathematik und Physik <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Abschluss Bachelor of Arts (21.07.2016)</li></ul> |
| 2004 – 2013 | Städtisches Gymnasium Kamen <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Fachhochschulreife (28.06.2013)</li></ul>                           |
| 2000 – 2004 | Friedrich-Ebert-Grundschule Kamen                                                                                                       |

## Sprachkenntnisse

|          |                     |
|----------|---------------------|
| Deutsch  | Muttersprache       |
| Englisch | in Wort und Schrift |