

Wechselwirkungskonzepte der Physik und ihre Propädeutik für die gymnasiale Oberstufe

Dissertation

zur

Erlangung des Grades eines Doktors der Pädagogik

vorgelegt von

Sebastian Launer

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen

Siegen 2020

Gutachter der Dissertation	Prof. Dr. Oliver Schwarz (Betreuer)	Universität Siegen
	Prof. Dr. Wieland Müller	Universität Landau

Tag der mündlichen Prüfung: 30.06.2020

Zusammenfassung

In der Physik spielen grundlegende Modelle und Konzeptgedanken eine herausragende Rolle. Im Schulunterricht werden Modellüberlegungen traditionell vielfach thematisiert - z.B. das Model der Punktmasse, des starren Körpers, des idealen Gases oder der Elektronenleitung in Metallen. Eine naheliegende Frage ist daher, ob auch das Konzeptartige am physikalischen Denken im Schulunterricht vermittelbar ist und in welchem Ausprägungsgrad physikalische Konzepte schon bisher gelehrt werden. Zur Untersuchung dieser Problemstellung befasst sich die vorliegende Dissertationsschrift mit den verschiedenen Konzepten der Wechselwirkung und ihrer fachdidaktischen Aufbereitung.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung von Unterrichtsreihen, welche die zugrundeliegenden Wechselwirkungskonzepte in den Vordergrund der unterrichtlichen Vermittlung rücken. Es werden die bekannten Wirkungskonzepte der Kraft, des Feldes, der Geometrisierung und der Austauschteilchen untersucht. Zur Erstellung der unterrichtlichen Handhabungsvorschläge werden die Konzepte sehr genau in Hinsicht ihrer historischen Genese, sowie ihrer fachwissenschaftlichen und fachdidaktischen Auffassung erörtert. Die Entwicklungsarbeit stellt sich dabei die Aufgabe, nicht nur physikalische Inhalte, sondern auch die Physik als Prinzipienwissenschaft für Schülerinnen und Schüler verständlich zu machen. Aus diesem Grund sind die Unterrichtsreihen im Rahmen eines historisch-erforschendem Lernens angelegt.

Die inhaltlichen und methodischen Legitimationen der dargelegten Unterrichtsvorhaben werden sowohl allgemeinbildend, mithilfe der didaktischen Analyse nach Klafki mit den fünf Grundfragen, als auch fachdidaktisch, vorgenommen. Begleitet wird dies von einer Schulbuchanalyse, die den jetzigen unterrichtlichen Zustand darstellt und aufzeigt, dass die Wechselwirkungskonzepte zwar angesprochen werden, diese aber in Hinblick einer Problemlöseorientierung und einer Förderung des Prinzipien Denkens Schwächen aufweisen.

Im Rahmen der vorherrschenden Kompetenzorientierung liest man in den Lehrplänen oft, dass Sachverhalte von den Schülerinnen und Schülern durch eigenständiges Forschen erlernt werden sollen. Davon ausgehend wird zudem in der Arbeit untersucht, ob Lernende dazu in der Lage sind, sich physikalische Wechselwirkungskonzepte selbst zu erarbeiten.

Abstract

Basic models and conceptual thoughts play a major role in the field of physics. Also as far as school education is concerned, theoretical model considerations - e.g. those of the models of point mass, of rigid bodies, of the ideal gas or of electron conduction in metals - are traditionally and frequently covered.

This raises the obvious question whether the conceptual aspect of physical thought processes and theories can be conveyed via school teaching/education and to what extent physics concepts have previously been taught.

In order to examine this problem formulation, this dissertation deals with the different concepts of (physical) interaction and their treatment in subject didactics. The aim of this thesis is to help develop lesson plans which put the underlying concepts of interaction into the focus of educational teaching. In this regard, the established effect-based physical concepts of force, of fields, of geometrization and of mediators will be examined.

In order to establish concrete recommendations for teaching practices regarding them, those concepts will be closely analyzed as to their historical emergence as well as their current role and understanding in the field of physics and its subject didactics.

The underlying work sees its purpose not only in making different topics and aspects of Physics as a school subject understandable for students, but to enable them to further their understanding of physics as a science of principles as a whole.

Thus, the units of lesson plans as presented in this dissertation are developed within a framework of historical and explorative learning. Decisions regarding contents and teaching methodology of the given lesson plans are legitimized both via the didactics of general education, through an analysis as per Klafki's „five basic questions“, and via the subject didactics of physics, as well.

All of this is accompanied by an analysis of school books, which reveals the current state of affairs in the institutional teaching of Physics and which points out that, while concepts of interaction within Physics are part of the subject matter dealt with therein, those books also present obvious shortcomings as far as a focus on problem-solving competencies and promoting principle-based thinking are concerned.

Current curricula, with their predominant emphasis on competence-oriented teaching, often speak of the need for students to learn through self-directed research and examination of subject matters. Based on this idea, this thesis analyses whether students are able to conceive of physical concepts of interaction through independent study.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	11
1.1. Hintergrund und Legitimation der Arbeit	11
1.2. Physikalische Legitimation	12
1.3. Aufbau der Arbeit	16
2. Grundlagen der Arbeit	19
2.1. Klassische Unterrichtsanalysen	19
2.2. Die didaktische Analyse nach Klafki	21
2.2.1. Die fünf didaktischen Grundfragen	22
2.2.1.1. Frage 1: Exemplarität	22
2.2.1.2. Frage 2: Gegenwartsbedeutung	22
2.2.1.3. Frage 3: Zukunftsbedeutung	23
2.2.1.4. Frage 4: Thematische Strukturierung	23
2.2.1.5. Frage 5: Zugänglichkeit	23
2.3. Historisches Lernen	23
2.3.1. Martin Wagenschein	24
2.3.2. Walter Jung	25
2.3.3. Wilfried Kuhn	25
2.3.4. Stellungen von Physikhistorikern	26
2.4. Erforschendes Lernen	27
2.5. Präkonzepte und Fehlvorstellungen	27
2.6. Formulierung der zugrundeliegenden Forschungsfragen	29
3. Wechselwirkungskonzepte	31
3.1. Konzepte in der Physik	31
3.1.1. Allgemein	31
3.1.2. Themata	35
3.1.3. Zusätzliche Legitimation	37
3.1.4. Eine mögliche Definition	37
3.2. Das Konzept der Kraft	39
3.2.1. Historische Entwicklung	39
3.2.2. Fachwissenschaftliche Sicht	49
3.2.3. Anmerkungen aus der Fachdidaktik	52
3.3. Das Konzept des Feldes	57
3.3.1. Historische Entwicklung	57
3.3.2. Fachwissenschaftliche Sicht	64
3.3.3. Anmerkungen aus der Fachdidaktik	69

3.4.	Das Konzept der Geometrisierung	75
3.4.1.	Historische Entwicklung	75
3.4.2.	Fachwissenschaftliche Sicht	85
3.4.3.	Anmerkungen aus der Fachdidaktik	89
3.5.	Das Konzept der Austauschteilchen	94
3.5.1.	Historische Entwicklung	96
3.5.2.	Fachwissenschaftliche Sicht	106
3.5.3.	Anmerkungen aus der Fachdidaktik	110
4.	Nicht anschlussfähige und überholte Wechselwirkungskonzepte	115
4.1.	Der Karlsruher Physikkurs als ein nicht-anschlussfähiges Konzept . .	115
4.2.	Die Wirbeltheorie nach Descartes als ein überholtes Konzept	119
5.	Antworten auf Klafkis Fragen	123
5.1.	Das Kraftkonzept	124
5.1.1.	Legitimation nach KLP	124
5.1.2.	Legitimation nach Klafki	124
5.2.	Das Feldkonzept	127
5.2.1.	Legitimation nach KLP	127
5.2.2.	Legitimation nach Klafki	128
5.3.	Das Geometrisierungskonzept	131
5.3.1.	Legitimation nach KLP	131
5.3.2.	Legitimation nach Klafki	131
5.4.	Das Austauschteilchenkonzept	134
5.4.1.	Legitimation nach KLP	134
5.4.2.	Legitimation nach Klafki	135
5.5.	Zusammenfassung	138
5.6.	Interpretation	139
6.	Untersuchungen zu den physikalischen Konzepten der Wechselwirkungen mithilfe einer Schulbuchanalyse	141
6.1.	Das Schulbuch als Spiegelbild des Unterrichts	141
6.2.	Ablauf der Schulbuchuntersuchung	142
6.3.	Analyse der Schulbücher	146
6.3.1.	Auswahl der Schulbücher	146
6.3.2.	Bestimmung der Analyseeinheit	147
6.3.3.	Bestimmung der Kategorien und Unterkategorien mit Beispielen	148
6.3.4.	Formulierung von Kodierregeln	150
6.3.5.	Materialdurchlauf	151
6.3.5.1.	Wechselwirkungskonzepte in Kuhn Physik 2	151
6.3.5.2.	Wechselwirkungskonzepte in Impulse Physik	156
6.3.5.3.	Wechselwirkungskonzepte im Metzler	160
6.3.5.4.	Wechselwirkungskonzepte im Duden Physik	167

6.3.5.5.	Wechselwirkungskonzepte im Cornelsen Oberstufen Gesamtband	172
6.4.	Zusammenfassung der Ergebnisse	179
6.4.1.	Kuhn Physik 2	179
6.4.2.	Impulse Physik	179
6.4.3.	Metzler Physik	179
6.4.4.	Duden Physik	180
6.4.5.	Cornelsen Gesamtband Oberstufe	180
6.5.	Überarbeitung und Revision des Kategoriensystems und der Katego- riendefinition	180
6.6.	Ergebnisinterpretation	180
6.6.1.	Das Kraftkonzept	181
6.6.2.	Das Feldkonzept	183
6.6.3.	Das Geometrisierungskonzept	185
6.6.4.	Das Austauschteilchenkonzept	187
6.6.5.	Überblick	189
7.	Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht	
	- Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien	191
7.1.	Das Kraftkonzept	194
7.1.1.	Ein anderer Weg	194
7.1.2.	Stunden der Unterrichtseinheit	196
7.1.3.	Inhalt der Stunden im Detail	198
7.2.	Das Feldkonzept	209
7.2.1.	Stunden der Unterrichtseinheit	209
7.2.2.	Inhalt der Stunden im Detail	211
7.3.	Das Geometrisierungskonzept	231
7.3.1.	Kurze Legitimation	231
7.3.2.	Stunden der Unterrichtseinheit	232
7.3.3.	Inhalt der Stunden im Detail	233
7.4.	Das Austauschteilchenkonzept	266
7.4.1.	Kurze Legitimation	266
7.4.2.	Stunden der Unterrichtseinheit	267
7.4.3.	Inhalt der Stunden im Detail	268
7.5.	Schülerorientierte Diskussion über die vier behandelten Wechselwir- kungskonzepte	300
7.5.1.	Mögliche Analogien zur Beziehung zwischen Theorie und Kon- zept	300
8.	Grenzen der selbstgesteuerten Erkenntnisgewinnung	305
8.1.	Grundlage der Forschungsidee	305
8.2.	Durchführung	306
8.3.	Ergebnis	306

8.4. Clusterung	308
8.5. Interpretation	310
8.6. Ausweitung des Forschungsprogramms	311
8.7. Schlussfolgerung	312
9. Evaluation der Unterrichtseinheiten	313
9.1. Evaluation zu den vorangegangenen Elementarisierungen am Beispiel des Kraft und Feldkonzeptes	313
9.2. Kraftkonzept	315
9.2.1. Der Fragebogen (vorher)	315
9.2.2. Clustern der Antworten	318
9.2.3. Zusammenfassung	325
9.2.4. Der Fragebogen (nachher)	326
9.2.5. Clustern der Antworten	328
9.2.6. Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse	333
9.3. Feldkonzept	334
9.3.1. Der Fragebogen (vorher)	334
9.3.2. Clustern der Antworten	337
9.3.3. Zusammenfassung	342
9.3.4. Der Fragebogen (nachher)	343
9.3.4.1. Clustern der Antworten	345
9.3.5. Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse	350
10. Schlussfolgerungen	353
A. Arbeitsblätter zu den Handhabungen	357
A.1. Arbeitsblätter zum Kraftkonzept	357
A.2. Arbeitsblätter zum Feldkonzept	371
A.3. Arbeitsblätter zum Geometrisierungskonzept	380
A.4. Arbeitsblätter zum Austauscheteilchenkonzept	396
A.5. Allgemeines	407
B. Fragebögen zur Evaluation der Wechselwirkungskonzepte	409
B.1. Kraftkonzept	409
B.2. Feldkonzept	412
C. Verlaufspläne der Unterrichtsstunden	415
C.1. Kraftkonzept	415
C.2. Feldkonzept	430
C.3. Geometrisierungskonzept	448
C.4. Austauscheteilchenkonzept	458
D. Literaturverzeichnis	467

E. Abbildungsverzeichnis	477
F. Tabellenverzeichnis	481

1. Einleitung

Es ist die wichtigste Kunst des Lehrers, die Freude am Schaffen und am Erkennen zu wecken.

(Einstein)

1.1. Hintergrund und Legitimation der Arbeit

Das Konzept der Wechselwirkungen ist - vergleichbar mit dem Erhaltungskonzept - ein Grundbaustein zum Verständnis der Physik als Naturwissenschaft. Aus diesem Grund sollte es für jede Physiklehrkraft essentiell sein, sich mit diesem Themenfeld zu befassen. Eine Reihe von Kernlehrplänen für die gymnasiale Oberstufe enthalten Züge der Allgemeinen Relativitätstheorie und der Elementarteilchenphysik. Beide Gebiete stehen in enger Verbindung mit zwei Wechselwirkungskonzepten, die zuvor in der Schule kaum bis gar nicht thematisiert wurden, die Allgemeine Relativitätstheorie mit dem Geometrisierungskonzept und die Elementarteilchenphysik mit dem Austauschteilchenkonzept. Somit wurden bildungspolitisch beide Konzepte für die Schule legitimiert, sie haben also einen wesentlich höheren Stellenwert bekommen. Zum Beispiel ist in NRW eine Behandlung nun nicht mehr allein in einem Exkurs möglich, sondern ist integraler Pflichtbestandteil in der Oberstufe. Angesichts dieser Tatsache muss man einen wesentlich tieferen Blick auf die Materie werfen und sich überlegen, wie eine angemessene Behandlung in der Schule vonstatten gehen könnte. Im Rahmen dieser Arbeit werden zusätzlich auch die grundlegenden Konzepte der Kraft und des Feldes detailliert analysiert. Diese sind zwar schon länger didaktisch aufbereitet, aber in den hier vorgeschlagenen Unterrichtssequenzierungen soll der konzeptuale Gedanke der Physik auf einer schulisch realisierbaren Basis weiter in den Vordergrund gerückt werden, um den Lernertrag im Basiskonzept der Wechselwirkungen zu verbessern. Eine zugehörige Legitimation dieses Gedankens lässt sich in 3.1.2 finden.

Natürlich gibt es neben den zwei „klassischen“ Konzepten - Kraft, Feld - und den in den Lehrplänen neu aufkommenden Konzepten der Geometrisierung und der Austauschteilchen viele weitere Wechselwirkungskonzepte, die behandelt werden könnten. Darunter sind beispielsweise:

- Physikalisch überholte Konzepte:
 - Wirbeltheorie nach Descartes
 - Impetustheorie
 - Le-Sage-Gravitation
 - Korpuskeltheorie des Lichts
- In der Grundlagenforschung gebräuchliche Konzepte:
 - Variationsprinzip
 - Prinzip des kleinsten Zwangs
 - Hamiltonprinzip (auch Prinzip der kleinsten Wirkung)
- Schulfachdidaktisch kontrovers diskutierte Konzepte:
 - Karlsruher Physikkurs

Diese Konzepte weisen in gewisser Hinsicht auch sehr interessante Aspekte der Physik auf, haben aber ihre jeweiligen Schwächen. Entweder sie sind völlig überholt (Le-Sage-Gravitation), nur beschränkt einsetzbar (Korpuskeltheorie), nicht tragfähig zum Ausbau oder zur Lösung schwieriger Probleme (Karlsruher Physikkurs) oder sind sowohl mathematisch als auch in ihrer verallgemeinerten Art kognitiv zu anspruchsvoll für Schülerinnen und Schüler (Hamiltonprinzip). Diese Konzepte sind im Rahmen eines kleinen Exkurses, bspw. eines historischen oder fachwissenschaftlichen Lehrervortrags, sehr interessant für die Lernenden, werden aber das grundlegende physikalische Verständnis bei ausführlicheren Behandlung nicht verbessern können. Detaillierter wird diese These beispielhaft für zwei dieser Konzepte in Kapitel 4 behandelt.

1.2. Physikalische Legitimation

In diesem Unterkapitel soll die Frage verfolgt werden, warum die Behandlung von Wechselwirkungskonzepten didaktisch-physikalisch wichtig ist. Dazu wird die Hypothese betrachtet, dass *Schülerinnen und Schüler das Wesen der Physik wesentlich besser verstehen können, wenn Sie die Physik sowohl als Prinzipienwissenschaft als auch als Erfahrungswissenschaft erkennen*. Bisher sehen die meisten Lernenden diese Naturwissenschaft nämlich eher als „Formelkatalog“ zur Berechnung technischer Zusammenhänge an.

Um Schülerinnen und Schülern die Physik als Prinzipienwissenschaft ansatzweise zu veranschaulichen, sollten ihnen zu Beginn ihrer Oberstufenkurse zunächst einige Grundannahmen und Methodiken erläutert werden.

Dazu zählen die als Prämisse der Forschung zu verinnerlichen Grundannahmen (vgl. [LIC15, 282 f.]):

- **Realität:**

Es gibt eine objektive Realität, die unserem Wahrnehmungs- und Denkvermögen zugänglich ist. Vielleicht gibt es Phänomene, die wir in der Realität mit unseren Sinnesorganen oder Messmethodiken gar nicht erfassen und infolge dessen auch nicht erklären oder verstehen können.

- **Separabilität:**

In der Physik wird eigentlich immer das Separabilitätsprinzip vorausgesetzt. Man kann Teile eines Systems untersuchen und äußere Einflüsse so weit minimieren, dass man sie vernachlässigen kann. Das bekannteste Beispiel ist hier der in der Schule behandelte freie Fall eines Körpers ohne Beachtung der Luftreibung, des Auftriebs, der Oberflächengestalt des Fallkörpers, der Eigenrotation etc..

- **Universalität:**

In der Physik geht man davon aus, dass es grundlegende Naturgesetze gibt, die universelle Gültigkeit haben und damit orts-/zeitunabhängig sind. Daraus ergibt sich auch bspw. die Reproduzierbarkeit von Experimenten oder die Invarianz gegenüber Beschreibungen.

Darauf aufbauend sollten wichtige Methodiken der Physik angesprochen werden (vgl. [LIC15, 284 f.]):

- **Induktion und Deduktion:**

Der Schluss vom Besonderen auf das Allgemeine bzw. der Schluss vom Allgemeinen auf das Besondere.

- **Ockhams Rasiermesser:**

Wenn zwei gleichwertige, aber unterschiedliche Beschreibungen vorliegen, ist die einfachere, die weniger Annahmen und Parameter aufweist, vorzuziehen.

- **Modellbildung:**

Es werden Modelle erstellt, die die Wirklichkeit so gut es geht, im Rahmen ihrer Gültigkeit, wiedergeben.

- **Idealisierungen und Vereinfachungen:**

Gerade in der Modellbildung finden Idealisierungen statt, d.h. es werden Aspekte vernachlässigt, die schwer zu behandeln sind und kaum Auswirkungen auf das zu Untersuchende haben.

Die wohl bekannteste und erfolgreichste Idealisierung ist die Anwendung der Mathematik [KUH16, Vorwort]. In der Physik werden „Dinge“ mit Begriffen und Einheiten versehen, die dann wiederum mit mathematischen Operatoren ($=$, $+$, $-$, $\cdot$, $:$, Δ , ∇ etc.) verknüpft werden.

- **Experimente / Gedankenexperimente:**

Die zentrale Methode und die oberste Instanz in der Physik ist die experimentelle Methode. Hier entscheidet eine „zuvor im Rahmen von Modellüberlegungen und theoretischen Vorhersagen geplante Versuchsanordnung darüber, ob die prognostizierte Entität, Zusammenhänge oder Phänomene in der Natur tatsächlich vorhanden sind“ [KUH16, Vorwort]. Neben dem tatsächlich gemachten Experiment kann aber auch das Gedankenexperiment stehen. Manche Experimente wurden gar nicht durchgeführt, entweder weil sie technisch noch nicht möglich waren (bspw. Zeitdilatation in der SRT) oder weil keine Notwendigkeit bestand, da genaues Durchdenken grundlegende Erkenntnisse ermöglichte (bspw. Schrödingers Katze).

Auf diesen Grundannahmen und Methodiken aufbauend wurden im Laufe der historischen Entwicklung der Physik grundlegende Prinzipien entdeckt (vgl. 3.1). Diese wenigen Grundprinzipien sind das Fundament der Naturwissenschaft. Dazu gehören unter anderen:

- Das Erhaltungsprinzip
- Das Symmetrieprinzip
- Das Konstanzprinzip
- Das Extremalprinzip
- Das Wechselwirkungsprinzip u.a.

Auf diesen Prinzipien steht das Gerüst der Physik mit ihren Gesetzen, Strukturen und Konzepten. Diese Prinzipien hätten sich zur Beschreibung der Natur auch herauskristallisiert, wenn in der Historie andere Begriffe und Größen gewählt worden wären oder namhafte Physiker wie Newton oder Faraday andere Wege eingeschlagen hätten [KUH16, Vorwort]. Die Gesetze könnte man auf völlig anderer, zueinander äquivalenter Weise formal aufschreiben, aber die Grundprinzipien wären die selben. Diese Prinzipien, die aus Erfahrungen heraus der Natur abgelauscht wurden (Physik als Erfahrungswissenschaft), würden auch intelligente außerirdische Lebensformen erkennen, die sich mit den ihnen gegebenen Sinnesorganen mit der Natur beschäftigen würden.

Wer nun „das Wesen der Physik und ihre Erkenntnisse erfassen will, muss vor allem ihre Leitprinzipien und -ideen verstehen“ [KUH16, Vorwort]. Und das ist es, was wir im Ansatz doch von unseren Schülerinnen und Schülern verlangen. Gerade in der neuen Kompetenzorientierung wird erwartet, dass kein reines Formel-Anwendungswissen vermittelt wird, sondern den Lernenden Möglichkeiten offenbart werden, physikalische Phänomene und Zusammenhänge wirklich zu verstehen. Dazu hier ein Zitat aus dem aktuellen Kernlehrplan Physik Sek. II aus NRW:

„Schülerinnen und Schüler können in Zusammenhängen mit eingegrenzter Komplexität physikalische Phänomene und Zusammenhänge unter

Verwendung von Theorien, übergeordneten Prinzipien/Gesetzen und Basis Konzepten beschreiben und erläutern. Sie können zur Lösung physikalischer Probleme zielführend Definitionen, Konzepte sowie funktionale Beziehungen zwischen physikalischen Größen angemessen und begründet auswählen.“[KER13, 21]

In der Summe lässt sich sagen, dass die Physik nur bei Beachtung ihrer grundlegenden Prinzipien richtig zu verstehen ist. Der Physikdidaktiker Bleichroth schreibt:

„Das anschaulich erfaßbare Prinzip, die grundlegende Idee, der tragende Wirkungs-, Bedeutungs- oder Zweckzusammenhang, von dem aus erschließt sich ein Inhalt, das vermag aber auch viele weitere Inhalte zu erschließen.“ [BLE91, 96]

Diese Prinzipien sind eng verbunden mit den Wechselwirkungen, die in unserer Natur stattfinden. Somit sind Unterrichtsvorhaben, die einen speziellen Blick auf die Wechselwirkungskonzepte werfen, gut dafür geeignet, Prinzipien zu vermitteln und damit das Verständnis für die Physik nachhaltig zu verbessern. Des Weiteren wird „dieses Verständnis [...] tiefer sein, wenn die historischen Wege, auf denen man die [Prinzipien/Konzepte] aufgedeckt hat, verinnerlicht werden konnten“[KUH16, Vorwort].

Neben dem besseren Verständnis durch die prinzipienhafte Darlegung der Physik werden den Schülerinnen und Schülern dadurch auch Denkhilfen für die Lösung (komplexer) physikalischer Probleme vermittelt. Oft denken die Lernenden bei Problemlösungen zu kompliziert und verfolgen gleichzeitig mehrere Ansätze.

Als Beispiel sei hier der Wurf genannt. Bei einer Beschränkung dieses Sachverhaltes beispielsweise auf das Prinzip der Energieerhaltung können schnell adäquate Teillösungen gefunden werden, ohne Beachtung einer zugrundeliegenden gleichmäßig beschleunigten Bewegung, der hier wirkenden Kräfte etc.. Wer die grundlegenden Prinzipien kennt und anwenden kann, erhält dadurch eine kognitive Entlastung und kann sich somit besser auf Wesentliches konzentrieren.

Als weiterer Punkt kann hier noch der Umgang mit Schülervorstellungen oder Präkonzepten erwähnt werden. In der Fachdidaktik wird diesem Sachverhalt eine große Rolle bei der Erlernung von Physik zugeschrieben. Die Schülerinnen und Schüler haben zu vielen Vorgängen in der Natur bzw. in ihrem Alltag eigene Muster, Ideen, Vorstellungen und Modelle zu deren Erklärung entwickelt. Diese - oft falschen - Konzepte sollen im Unterricht bspw. durch Experimente aufgegriffen und verändert werden. Leider sind diese Konzepte bei den Schülerinnen und Schülern aber stark verinnerlicht und schwer durch richtige Sichtweisen zu ersetzen. Hierbei gibt es in der Fachdidaktik mehrere Ansätze, z.B. die Erzeugung eines kognitiven Konflikts

bei den Lernenden. Diese und auch andere Methoden bauen auf der Prinzipienhaftigkeit der Physik auf. Beispielsweise wurde das Prinzip der Energieerhaltung von den Schülerinnen und Schülern verstanden und auch anerkannt, wodurch ihrerseits angewandte Präkonzepte, die dieses verletzen, überdacht und angepasst bzw. verworfen werden müssen. Also zeigt sich auch hier die enorme Bedeutung, die den Prinzipien zuzuschreiben ist.

Aus diesen Gründen heraus beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit den vier - für die Schule ansprechendsten - Wechselwirkungsprinzipien der Physik und liefert mögliche schulnahe, alltagstaugliche und historienbezogene Handhabungen mit praktisch erprobten Elementarisierungsvorschlägen.

1.3. Aufbau der Arbeit

Zunächst wird der fachdidaktische Rahmen präsentiert, indem die konzeptuelle und praktische Gestaltung des Unterrichts anzusiedeln ist, die in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde. Hierzu zählen die klassischen Unterrichtsanalysen - speziell der Klafkis -, der Ansatz des historischen Lernens und dem erforschenden Lernen. Dies mündet in der Darlegung der zugrundeliegenden Forschungsfragen.

Im folgenden Kapitel wird das fachphysikalische Schwerpunktthema dieser Arbeit betrachtet, nämlich die Modellierung von Wechselwirkungen. Hier wird der Konzeptgedanke der Physik im Allgemeinen beleuchtet und anschließend werden die vier bekanntesten Wechselwirkungskonzepte der Physik (Kraft-, Feld-, Geometrisierung- und Austauschteilchenkonzept) im Detail untersucht. Hierbei werden die jeweilige historische Genese des Konzeptes, die fachwissenschaftliche und die didaktische Sichtweise erörtert. Zur Verdeutlichung der nicht immer präsenten Tatsache, dass auch physikalische Konzepte im Wandel der Zeit als überholt oder unbrauchbar angesehen werden können, erfolgt im Kapitel 4 beispielhaft die Darlegung eines überholten, nicht anschlussfähigen Wechselwirkungskonzeptes. Nach der Darstellung der Konzepte, wird im Rahmen einer Forschungsfrage die unterrichtliche Legitimation der Behandlung von Wechselwirkungskonzepten mithilfe der Beantwortung von Klafkis bildungstheoretischen fünf Fragen allgemein didaktisch untersucht. Zur späteren potentiellen Neugestaltung von Unterrichtsreihen wird in Kapitel 6 die aktuelle Lage des Konzeptgedankens von physikalischen Wechselwirkungen mithilfe einer Schulbuchanalyse untersucht, um die mögliche Notwendigkeit eines anderen Ansatzes in der unterrichtlichen Handhabung besser zu erkennen und Bekanntes, was sich in der Praxis bewährt hat, einpflegen zu können. Im Anschluss daran werden dann mögliche Handhabungen für den Unterricht, die dem historisch-genetischen Lernen folgen und die die aus den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse beinhalten, dargestellt und didaktisch begründet.

Da die selbstgesteuerte Erkenntnisgewinnung einen immer höheren Stellenwert in

der Didaktik zugeschrieben bekommt, wird in Kapitel 8 untersucht, ob dieses Werkzeug im Rahmen der Wechselwirkungen stärker zum Einsatz kommen kann. Zur Vervollständigung wurden die dargestellten Unterrichtsvorhaben in einer kleinen Untersuchung evaluiert und die Erkenntnisse im vorletzten Kapitel aufgezeigt. Am Ende der Arbeit stehen Schlussfolgerungen, die die zugrundeliegenden Forschungsfragen hinsichtlich ihrer Beantwortung durch diese Arbeit reflektieren.

2. Grundlagen der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll zum einen zeigen, ob die jeweiligen Wechselwirkungskonzepte (Kraft, Feld, Geometrisierung und Austauschteilchen) im Rahmen von Klafkis Überlegungen überhaupt unterrichtbar sind, und zum anderen sollen Unterrichtseinheiten zu den Konzepten erarbeitet werden, die dem historischen Lernen nach Wagenschein, Wilfried Kuhn und Walter Jung genügen.

Zunächst soll darauf eingegangen werden, warum diese klassischen Unterrichtsanalysen gewählt wurden, danach werden die Grundlagen kurz dargestellt.

2.1. Klassische Unterrichtsanalysen

Aktuell werden die meisten Unterrichtskonzepte für die Erarbeitung von Inhalten mithilfe des Kompetenzmodells aufgestellt bzw. auf ihre Tauglichkeit für modernen Unterricht analysiert. Als Grundlage wurde hier hingegen die tiefergehende didaktische Analyse nach Klafki gewählt. Das ist auch aus aktueller fachdidaktischer Sicht ein problemloser Schritt, da eine Grundlage der Kompetenzorientierung bzw. des Kompetenzmodells die kritisch-konstruktive Didaktik nach Klafki mit dessen Perspektivschema gewesen ist.

Dadurch werden anzustrebende Kompetenzen nicht ausgeklammert, vielmehr sind sie im Rahmen der Legitimation - auch einer gesetzgeberischen laut Kernlehrplan - schon vorgegeben (vgl. 2.2).

Einem angehenden Lehrer wird - vor allem im Referendariat - die Bedeutung von Lernzielen aufgezeigt und der Unterrichtserfolg wird an diesen gemessen. Lernziele „organisieren die Unterrichtsplanung (wo will ich wann sein?) und tragen zur Strukturierung des Unterrichts (Progression des kognitiven Leistungsstands) wesentlich bei“ [KIR09, 83]. Sie stellen im Großen und Ganzen ein verfeinerte Kompetenzorientierung dar, nur in ihrer Formulierung lassen sich größere Unterschiede ausmachen¹. Das Planungsinstrument nach Klafki mit seiner didaktischen Analyse hilft dabei, mögliche Lernziele für Unterrichtseinheiten bzw. Stunden zu erkennen. Es stellt somit einen Grundpfeiler zur gelingenden Unterrichtsplanung dar. Des Weiteren steht diese Analyse der moderneren Kompetenzorientierung nicht gegenüber, da der in

¹Die unterschiedliche Formulierung soll von einer *Input-* zu einer *Outputorientierung* des Unterrichts führen.

dieser Arbeit betrachtete Bildungsgehalt im Kompetenzmodell der Bildungsstandards der KMK deutlich abgebildet wird. Die vier grundlegenden Kompetenzbereiche sind „*Fachwissen*“, „*Erkenntnisgewinnung*“, „*Kommunikation*“ und „*Bewertung*“. Der Bereich *Fachwissen* gliedert sich in vier Basiskonzepte, worunter das Konzept der *Wechselwirkung* eines ist. Ihm wird also begrifflich als Basiskonzept der Physik eine große Bedeutung zuteil. Eine didaktische Analyse hilft nun, einen differenzierteren Blick auf das Konzept zu werfen.

Die möglichen unterrichtlichen Handhabungen werden mithilfe von Konzeptionen nach Martin Wagenschein erarbeitet. An Wagenscheins Ansichten wurde zwar viel Kritik geübt, was aber nicht dazu führen sollte, seine Absichten komplett abzulehnen, nur weil sie im Ganzen nicht pragmatisch anzuwenden sind. Die zugrundeliegenden Ideen werden aber bis heute im Rahmen der naturwissenschaftlichen Lehrausbildung aufgezeigt und eine Anwendung, bei passenden Bedingungen, angeraten.²

Seine elementaren Prinzipien lassen sich - wenn auch in anderer Form - in unserem heutigen Bildungssystem wiederfinden und somit zum Aufbau von Unterrichtssequenzen legitimieren. Das *Sokratische Prinzip* kann in dem Kompetenzbereich der *Kommunikation* einordnet werden³, das *genetische Prinzip* ist unter anderem Inhalt der *Bedingungsanalyse* sowie des Kompetenzbereichs der *Bewertung*⁴ und das *Exemplarische* steckt im Kompetenzbereich der *Erkenntnisgewinnung*.⁵

²Hauptkritikpunkt ist das Initialproblem bzw. die Unmöglichkeit jeden Bildungsinhalt so aufzubereiten, dass die Schülerinnen und Schüler vor ein exemplarisches, adaptives und reichhaltiges Problem gestellt werden, das in ihrem Interessenhorizont steht und gelöst werden kann. Wenn aber ein tragbares Problem vorliegt, ist eine genetische Lösung legitim

³bspw. K1: Die Schülerinnen und Schüler tauschen sich über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendung unter angemessener Fachsprache und fachtypischer Darstellungen aus. [KMK04, 12]

⁴bspw. B4: Die Schülerinnen und Schüler benennen Auswirkungen physikalischer Erkenntnisse in historischen [...] Zusammenhängen. [KMK04, 12]

⁵bspw. E1: Die SuS beschreiben Phänomene und führen sie auf bekannte physikalische Phänomene zurück. [KMK04, 11]

2.2. Die didaktische Analyse nach Klafki

Die Unterrichtsvorbereitung ist der Ort, an dem das Verhältnis der Wechselwirkung von Theorie und Praxis ausgetragen werden muss

(Klafki)

Bevor und während der Planung einer Unterrichtsreihe sollte man immer überlegen, ob sie inhaltlich und methodisch legitimiert ist. Rechtlich ist die Legitimation zweifelsohne durch Lehrpläne und Schulcurricula vorgegeben, einerseits durch „konzeptbezogene“ und andererseits durch „prozessbezogene Kompetenzen“, die die Schülerinnen und Schüler zu einem gewissen Zeitpunkt erlangt haben sollen. Aber gerade diese Kompetenzorientierung liefert den Lehrerinnen und Lehrern auch die Freiheit der gestalterischen Umsetzung, lediglich das „Was“ und „Wann“ ist in gewissem Maße vorgegeben. Die konkrete Stundenplanung lässt uns aber zum einen entscheiden, an welchen Gegenständen oder Experimenten ein Sachverhalt (konzeptbezogen) erarbeitet werden soll, zum anderen welche Methodik (prozessbezogen) den Schülerinnen und Schülern näher gebracht oder bei dieser Gelegenheit vertieft werden soll. Dieser Freiheitsgrad muss nun vom Lehrer wertvoll und sinnvoll ausgenutzt werden. Die nötige Legitimation kann man hervorragend mithilfe der didaktischen Analyse nach Wolfgang Klafki schaffen. Er liefert mit fünf Fragen Prüfinstrumente für Lehrerinnen und Lehrer, mit denen der tatsächliche Schritt vom vorgegebenen Bildungsinhalt zum Bildungsgehalt vollzogen werden kann. Den Sinn dieser ausführlichen Unterrichtsvorbereitung beschreibt Klafki folgendermaßen:

„Die Vorbereitung soll eine oder mehrere Möglichkeiten zu fruchtbaren Begegnungen bestimmter Kinder mit bestimmten Bildungsinhalten entwerfen.“ [KLA62, 6]

Das Konzept der didaktischen Analyse nach Klafki ist zwar schon rund 50 Jahre alt und wurde in manchen Gesichtspunkten von ihm selbst in den siebziger Jahren angepasst, aber der Kern der Analyse ist auch heute sehr brauchbar. Die Analyse im Ganzen wurde immer wieder ein wenig geändert, ausgebaut und umformuliert, aber die zentralen fünf Fragen, die sich eine Lehrerin oder ein Lehrer stellen sollte/könnte, sind dieselben geblieben⁶. Auch in der heutigen Physikdidaktik wird die didaktische Analyse benutzt, „um ein Thema didaktisch auszuloten, um Ziele zu einem thematischen Bereich aufzufinden“ [KIR09, 84]. Die fünf Grundfragen werden hier von *Ernst Kircher* nur zusammengefasst zu vier Zieldimensionen (*Bildungsgehalt*,

⁶Die didaktische Analyse wurde nach einiger Kritik ergänzt durch die *Lehr-Lern-Prozessstruktur (als methodische Struktur)* und die *Erweisbarkeit und Überprüfbarkeit*, wodurch aus den fünf Fragen sieben Aspekte der kritisch-konstruktiven Didaktik zur Unterrichtplanung wurden. Erweitert um eine Bedingungsanalyse erhält man das Perspektivschema von 1980.

Zukunftsbedeutung aus Schülersicht, Gegenwartsbedeutung aus Schülersicht und die innere Struktur des Themas). Letztlich wird also die Exemplarität und Zugänglichkeit verschmolzen zur Dimension des Bildungsgehalts. Auch diese vier Dimensionen werden bei Ernst Kircher, ähnlich wie bei Klafki [KLA62] und Häußler & Lauterbach [HAE76], aufgegliedert in ein Fragekatalog [KIR09, 88 ff.].

Wichtig ist aber aus der heutigen didaktischen Sicht, dass Klafkis Analyse der Freilegung des Bildungsgehaltes⁷ dient, der vom Lehrplan schon vorgegebenen Bildungsinhalte. Sie ist aber kein Instrument der Lehrplanung oder Curriculum-Planung (vgl. [MEY07, 89]).

2.2.1. Die fünf didaktischen Grundfragen

Die folgenden Zitate sind in ([KLA62, 15 ff.]) zu finden.

2.2.1.1. Frage 1: Exemplarität

„Welchen größeren bzw. welchen allgemeinen Sinn- oder Sachzusammenhang vertritt und erschließt der Inhalt? Welches Urphänomen oder Grundprinzip, welches Gesetz, Kriterium, Problem, welche Methode, Technik oder Haltung lässt sich in der Auseinandersetzung mit ihm „exemplarisch“ erfassen?“

Es soll also die Beispielhaftigkeit des Themas, der Grundsätze, Grundprinzipien, die an diesem Thema gelernt werden können, herauskristallisiert werden.

2.2.1.2. Frage 2: Gegenwartsbedeutung

„Welche Bedeutung hat der betreffende Inhalt bzw. die an diesem Thema zu gewinnende Erfahrung, Erkenntnis, Fähigkeit oder Fertigkeit bereits im geistigen Leben der Lernenden meiner Klasse, welche Bedeutung sollte er - vom pädagogischen Gesichtspunkt aus gesehen - darin haben?“

Was können die Jugendlichen schon? Was wissen die Jugendlichen zu dem Thema? Wo können sie ihr Wissen oder Können heute anwenden?

⁷Die Unterscheidung zwischen Inhalt und Gehalt eines Themengebietes ist in der Literatur nicht trennscharf. Im Rahmen von Klafki kann hier jedoch vereinfacht gesagt werden, dass ein Unterrichtsinhalt zu einem Gehalt wird, wenn er nach dem „Durchlaufen“ seiner fünf Grundfragen legitimiert ist - sprich, er einen facettenreichen Nutzen für die Schülerinnen und Schüler aufweist.

2.2.1.3. Frage 3: Zukunftsbedeutung

„Worin liegt die Bedeutung des Themas für die Zukunft der Kinder?“

Worin liegt die Bedeutung des Themas für die Zukunft? Man soll Verantwortung, Verhaltensweisen, Notwendigkeiten, Kulturtechniken aufzeigen für die zukünftige private und berufliche Lebensführung. Aus pragmatischer Sicht kann hier für die Schülerinnen und Schüler interpretiert werden: „für das Leben lernen“ (vgl. [KIR09, 86])

2.2.1.4. Frage 4: Thematische Strukturierung

„Welches ist die Struktur des (durch die Fragen I und II und III in die spezifische pädagogische Sicht gerückten) Inhaltes?“

Was ist vorausgegangen? Was folgt der Stunde / Thematik nach? Wird aus dieser Stunde / Reihe etwas aufgegriffen? Wie ist die Unterrichtseinheit strukturiert und warum so und nicht anders?

2.2.1.5. Frage 5: Zugänglichkeit

„Welches sind die besonderen Fälle, Phänomene, Situationen, Versuche, in oder an denen die Struktur des jeweiligen Inhaltes den Kindern dieser Bildungsstufe, dieser Klasse interessant, fragwürdig, zugänglich, begreiflich, „anschaulich“ werden kann?“

Wie weckt man eine Fragehaltung zu diesem Thema bei den Schülerinnen und Schülern? Wie bringt man die Sache in den Fragehorizont der Jugendlichen? Womit kann man sie erreichen? Wo stehen sie und wo hole ich sie ab?

2.3. Historisches Lernen

In der Physikdidaktik gibt es viele Beiträge zum historisch orientierten Physikunterricht. Als namhafte Stellvertreter dieser Unterrichtskonzeption wurden Martin Wagenschein, Walter Jung und Wilfried Kuhn ausgewählt. Zunächst sollen hier kurz ihre Ansichten im Rahmen dieser Methode dargestellt werden.

2.3.1. Martin Wagenschein

Die Lehre Wagenscheins bezieht sich zum Großteil auf das Unterrichten von jüngeren Kindern, aber seine Grundsätze lassen sich in allen Altersklassen gewinnbringend einsetzen. Alle Schülerinnen und Schüler sollten am Punkt ihres Vorwissen abgeholt werden, alle lernen gut an exemplarischen Inhalten und das sokratische Gespräch ist in höheren Alterstufen zumeist, aufgrund des besseren Formulierungsvermögens, sogar noch ein stärkeres Lerninstrument als es in jüngeren Klassen ist.

Das **genetische Lernen** kann man aufteilen in Wagenscheins Dreiheit (vgl. [WAG10, 75]): Das „genetische“, das „sokratische“ und das „exemplarische“ Prinzip. Um das genetische Lernen nun beschreiben zu können, bedarf es einer genaueren Betrachtung der eben genannten Prinzipien.

Das genetische Prinzip

„Genetisches Lehren bedeutet, den Schüler in eine Lage zu versetzen, in der das noch unverstandene Problem so vor ihm steht, wie es vor der Menschheit stand, als es noch nicht gelöst war.[WAG10]“

Das Sokratische Prinzip

„Die sokratische Methode gehört dazu, weil das Werden, das Erwachen geistiger Kräfte, sich am wirksamsten im Gespräch vollzieht.“[WAG10, 75].

Das exemplarische Prinzip

„Das exemplarische Betrachten ist das Gegenteil des Spezialistentums. Es will nicht vereinzeln; es sucht im Einzelnen das Ganze.“[WAG53]

Genetisch-Sokratisch-Exemplarisch = Genetisches Lernen

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das genetische Lernen folgendes fordert: Die Stoffauswahl soll exemplarisch sein, die vorgeschlagenen Inhalte sollen genetisch - entstehend - aufbereitet werden und von den Schülerinnen und Schülern eigenständig erarbeitet und im sokratischen Dialog verbalisiert und verstanden werden.

Im Rahmen der Unterrichtskonzepte entnimmt der Autor folgende Aspekte:

- Es soll konstruktiv Bezug auf die Vorerfahrungen, Vorkenntnisse und Präkonzepte der Schülerinnen und Schüler genommen werden. Sie sollen an ihrem jeweiligen Wissensstand abgeholt werden, den damaligen, historischen Verstehensweg der Naturwissenschaftler miterleben und somit ein vertieftes Verständnis entwickeln.
- Die Schülerinnen und Schüler sollen entstehende Kontroversen im Dialog beurteilen.

- Sie erhalten kognitive Entlastungen durch die Konzentration auf Beispielfalles.

2.3.2. Walter Jung

Bei der geschichtlichen Unterrichtsmethodik nach Walter Jung müssen folgende grundsätzliche Aspekte Beachtung finden (vgl. [JUN83, 101 ff.]).

Experimente und Erfahrungen führen zur Entwicklung von Begriffen und Theorien, wodurch Fragen der Lerner, „Weshalb dieses Experiment?“, „Wie ist man auf die Idee gekommen?“ oder „Gibt es Alternativen?“ induziert werden. Dadurch entsteht nach Jung unweigerlich immer eine historische Dimension des Physikunterrichts. Folgend ergibt sich bei der Beantwortung dieser Fragen ein weiterer Aspekt. Neu entwickelte physikalische Theorien müssen sich besser bewähren als die Alten, sonst fehlt ihnen jegliche Berechtigung. Diese kritische Prüfung einer neuen Theorie ermöglicht für die Lernenden ein vertieftes Verständnis. Nach Jung werden hierdurch überhaupt erst alternative Konzeptualisierungen kennengelernt und die Schülerinnen und Schüler glauben nicht mehr, dass die Natur die physikalische Theorie selbst gemacht hätte.

Des Weiteren ist nach Jung der Verweis auf Personen in der Geschichte nicht unbedingt wichtig, da geschichtliche Kontroversen auch „namenslos“ diskutabel seien. Wird aber von Physikern statt von Physik berichtet, wird der Inhalt menschlicher und somit für viele Schülerinnen und Schüler motivierender. Gefördert wird zudem der wichtige Aspekt, dass die Physik als menschlich entwickelte Kulturleistung verstanden wird und kein finalisiertes Konstrukt der Natur selbst ist.

2.3.3. Wilfried Kuhn

Wilfried Kuhn vertritt die Meinung, dass Einblick in die Physikgeschichte erst überhaupt die „Perspektive eröffnet, Physik nicht nur als Instrument der Naturbeherrschung“ [KUH01b, VI] oder für viele Lernende als von Oben indoktriniert, zu verstehen, sondern sie als bedeutsame historisch gewordene Wissenschaft zu erkennen. Insbesondere weist Kuhn der geschichtlichen Entwicklung ein großes didaktisches Potential zu. Er schreibt, dass im historischen Kontext „der Schüler gleichsam im Zeitraffertempo die vielen Lernschwierigkeiten des historischen Lernprozesses der Physikergenerationen nachvollziehen muß. Damit gewinnt der Physikunterricht auch mehr Farbe und innere Dynamik und Physik wird dann nicht bloß als Reduktion der Welt auf mathematische Formeln mißverstanden“ [KUH01b, VI]. Die Erwartung, dass die Denk- bzw. Verstehensschwierigkeiten der Schülerinnen und Schüler ähnlich zu denen der historischen Entwicklung sind und die Darstellung der historischen Wege mit der Analyse von historischen Irrtümern und Fehlvorstellungen den Lernenden

helfen, eigene Lernschwierigkeiten oder Misskonzepte zu überwinden, muss relativiert werden. Sie sind durch die Tatsache begrenzt, dass die Erfahrungshintergründe heutiger Schülerinnen und Schüler - Vorwissen aus Medien oder Sek-I-Unterricht, etc. - andere sind als die der Gelehrten in der Vergangenheit (vgl. [BLE91, 276]). Des Weiteren wird es Unterschiede in der kognitiven Leistungsfähigkeit geben, wodurch die Differenz der Erfahrungswelten auf allgemeine anthropologische Voraussetzungen erweitert werden müssen.

Auch Oliver Schwarz, der im Institut Wilfried Kuhns forschen konnte, schreibt:

„Für Abiturienten und Studierende der Physik sollte Wissen um die historischen Erkenntniswege nicht den Status eines im Grunde überflüssigen Sahnehäubchens besitzen, sondern wesentlich zur Bildung gehören. Wie sonst, wenn nicht an konkreten Beispielen, könnte man Achtung vor menschlicher Leistung erwerben, etwas über Mühsal der Forschung lernen oder die Wissenschaft als eine der größten Schöpfungen der Menschheit begreifen?“[KUH16, Vorwort]

2.3.4. Stellungen von Physikhistorikern

Der bekannte Physiker und Physikhistoriker *Max Jammer* vertrat pointiert die Meinung, erst im historischen Kontext erschließe sich ein volles Verständnis der Physik[KUH01b, VI]. Dieses vollständige Verständnis ist natürlich für Schülerinnen und Schüler nicht erreichbar, dafür fehlt ihnen viel an nötigem physikalischem Wissen, aber ein Ansatz dessen oder auch das Schaffen einer kleinen intrinsischen Motivation zu einer nachschulischen Weiterbildung im naturwissenschaftlichen Sektor, ist erstrebenswert.

Des Weiteren schreibt der Physikhistoriker *Bernhard Cohen*:

„In der Geschichte der Naturwissenschaften sehe ich eine Zusammenfassung aller schöpferischen Kräfte des Menschen und ein Mittel, mit dessen Hilfe die Wissenschaft ihre humanisierende Fähigkeiten wiedergewinnen kann, die sie so oft durch Abgleiten ins rein Formale verloren hat.“ [KUH03, 9]

Im historischen Ansatz wird also nicht nur die reine Physik bzw. unser Naturverständnis verbessert, sondern auch unser Verständnis über die Kultur und ihre gesellschaftlichen Faktoren. Diese Dimension des Physikunterrichts lässt sich bis heute in Formulierungen der KMK und jedweden Lehrplänen als integraler Bestandteil wiederfinden. In diesen Dokumenten wird die historisierende Methode sowohl gefördert als auch gefordert.

2.4. Erforschendes Lernen

Aufgrund der immer populärer werdenden Kompetenzorientierung liest man sehr oft, dass Sachverhalte von Schülerinnen und Schülern durch eigenständiges Forschen erlernt werden sollen. Ein Schlagwort hierbei ist der „forschend-entdeckende Unterricht“. Diese Methode gründet sich auf die Lernpsychologie Bruners (1970) und wurde weiter fundiert mit Hypothesen von Ausubel (1981) [AUS81]. Kleinere untergeordnete Inhalte oder Gesetzmäßigkeiten können mit Sicherheit seitens der Lernenden erfolgreich erforscht werden (Hebelgesetz, Transformatorgleichung, Bewegungsarten, etc.), unterstützen dabei *Prozessziele* (erlernen physikalische Denk- und Arbeitsweisen), *soziale Ziele* (Kommunikationsfähigkeit) und ermöglichen eine „unmittelbare Realitätserfahrung durch Schülerversuche“ [KIR09, 176]. Eine interessante Forschungsfrage, nachfolgend in 2.6, die man sich nun aber stellen kann, ist, ob Schülerinnen und Schüler auch die Möglichkeit haben, selbstständig physikalische Konzepte zu erforschen. Das würde bedeuten, dass eine ausführliche historische Genese des jeweiligen Konzeptes aufgeweicht wird und teilweise durch forschenden Unterricht ergänzt werden könnte.

2.5. Präkonzepte und Fehlvorstellungen

Gerade bei der Behandlung von grundlegenden Wechselwirkungskonzepten trifft man bei den Schülerinnen und Schülern auf Präkonzepte. Sie haben sich zu vielen Vorgängen und Phänomenen in ihrem Alltag schon versucht, eigenen Erklärungsmodelle zu entwickeln. Diese Erklärungsmodelle sind zumeist falsch, fehlerhaft oder entsprechen einfach nicht der gängigen physikalischen Sichtweise. Dieses Problem ist schon sehr lange in der Didaktik bekannt und ist in ihrer Existenz unumstritten. Zu dem Umgang mit diesen Präkonzepten gibt es aber natürlich unterschiedliche Ansichten und man kann eine große Anzahl an Büchern dazu finden. Einige Möglichkeiten mit dem Umgang sind bspw. die Erzeugung eines kognitiven Konflikts, die Entwicklung und der systematische Aufbau physikalischer Konzepte, die Behandlung unter Berücksichtigung der Vorstellungen usw. Eine ausführliche Diskussion führt an dieser Stelle zu weit und soll auch kein Teil dieser Arbeit sein. Essentiell ist nur, dass alle Herangehensweisen an einen Konzeptwechsel Behutsamkeit und Zeit beanspruchen.

Die später dargestellten Unterrichtsreihen folgen dem oben genannten historisch-genetischen Lernen. Aus diesem Grund bietet es sich an, die Präkonzepte mithilfe der „Entwicklung und dem systematischen Aufbau physikalischer Konzepte“ zu begegnen. Bei dieser Methode werden unter anderen nach Rowell und Dawson die physikalischen Konzepte erst in ihren Grundzügen eingeführt, bevor man die Präkonzepte den physikalischen Konzepten gegenüberstellt. Da die Schülerinnen und Schüler ihre Präkonzepte nicht einfach verwerfen, sobald Widersprüche auftreten (kognitiver Konflikt), sondern sie eher durch bessere ersetzen wollen, müssen aber

zunächst neue Konzepte zu Verfügung stehen (vgl. [MUE07, 28, f.]). Dabei ist aber darauf zu achten, dass man nicht „mit der Tür ins Haus fällt“ und die vorgestellten Konzepte direkt von den Lernenden abgelehnt werden, bspw. aufgrund hoher Komplexität. Diesem Umstand kann das historisch genetischen Lernen gut begegnen. Hier bekommen die Schülerinnen und Schülern zunächst eine Idee eines damaligen Wissenschaftlers vorgeschlagen, welche dann immer weiter ausgebaut und verbessert wird. In dieser historischen Entwicklung können die Lernenden ggf. ihr Präkonzept oder Teile davon wiederfinden und diese dann zu einem physikalischen Konzept weiterentwickeln.

Im Rahmen dieser Arbeit tritt der strikte Umgang mit Fehlvorstellungen aber etwas in den Hintergrund, da die später dargestellten Unterrichtseinheiten in der Oberstufe angesiedelt sind und die Lernenden gerade beim Kraftkonzept und Feldkonzept schon in der Sekundarstufe I physikalische Vorerfahrungen gewonnen haben. Die beiden anderen Konzepte - Geometrisierung und Austauschteilchen - sind dann schon wieder so speziell, dass hier fast keine gefestigten Fehlvorstellungen vorhanden sind.

2.6. Formulierung der zugrundeliegenden Forschungsfragen

Aus den eben dargestellten Grundlagen werden folgende Forschungsfragen für die Arbeit zugrunde gelegt.

- **Frage 1**

Ist der Wechselwirkungsgedanke als Konzept nach Klafki überhaupt unterrichtbar?

Wie unter 2.2 dargelegt, soll untersucht werden, ob die unterschiedlichen Wechselwirkungsprinzipien nach Klafkis didaktischer Analyse für den Unterricht gewinnbringend für die Schülerinnen und Schüler und damit legitim in ihrer Behandlung sind. Die ausführliche Erörterung ist in Kapitel 5 zu finden.

- **Frage 2**

Welche Bedeutung wird dem Wechselwirkungskonzept in den Physikbüchern für die gymnasiale Oberstufe zugeschrieben?

Bevor neue und sinnhafte Handhabungsvorschläge erstellt werden können, sollte die aktuelle unterrichtliche Herangehensweise eruiert werden. Dazu werden stellvertretend einige Schulbücher näher untersucht, um einen Überblick über den Umfang und die Tiefe der Behandlung der Wechselwirkungskonzepte im Unterricht zu erhalten. Diese Ergebnisse können später dabei helfen, Bücher zu bestimmen, die die dargelegten Unterrichtsreihen gut unterstützen.

- **Frage 3**

Kann man den Konzeptgedanken von Wechselwirkungen bei Schülerinnen und Schülern ansatzweise verankern? Können Sie die genetische Weiterentwicklung der unterschiedlichen Wechselwirkungskonzepte erfassen?

Die in dieser Arbeit entwickelten Unterrichtsreihen werden mithilfe von Fragebögen auf ihre Tauglichkeit evaluiert (vgl. 9). Das heißt, die Schülerinnen und Schüler beantworten zu Beginn und am Ende der Reihe einen kleinen Fragebogen, der die Fortschritte zum Wechselwirkungsgedanken erkennbar machen soll. Da es sehr schwierig ist, ein Konzept in relativ kurzer Zeit wirklich zu verstehen - es zu verinnerlichen - wird hierbei nur untersucht, ob die Schülerinnen und Schüler den Ansatz begreifen konnten. Man kann hier nicht erwarten, dass die Lernenden ein Konzept in einem Ausmaß verstehen, für das Gelehrte Jahrzehnte, gar Jahrhunderte der Entwicklung und Verfeinerung benötigten. Die Chance eines tiefergehenden Verständnisses ist nur durch die spiralförmige Wiederholung der Themengebiete über Jahrgangsstufen hinweg gegeben. So müsste schon in der Sekundarstufe I ein Grundstein gelegt werden, der in der Oberstufe weiter ausgebaut wird.

- **Frage 4**

Können die Schülerinnen und Schüler ein Wechselwirkungskonzept (selbst) erforschend lernen?

Wie unter 2.4 beschrieben, ist es aus didaktischer Sicht bei der Planung der Unterrichtsreihen sehr interessant zu wissen, ob Konzepte von den Schülerinnen und Schülern selbst erarbeitet werden können. So könnte diese Methode im Unterricht zur Erkenntnisgewinnung stärker eingebracht werden und die Lernenden damit aktiver am Geschehen teilnehmen.

3. Wechselwirkungskonzepte

Im folgenden Kapitel werden zunächst mehrere mögliche Definitionen eines Konzeptbegriffs aufgezeigt und eine für diese Arbeit passende Definition ausgearbeitet. Im Anschluss werden die vier ausgewählten Wechselwirkungskonzepte nacheinander vorgestellt. Diese Ausführungen gliedern sich in die drei Aspekte:

- Historische Entwicklung:
Eine kurze Darstellung des historischen Werdegangs des Konzeptes mit den wichtigsten zugehörigen wissenschaftlichen Vertretern.
- Fachwissenschaftliche Sicht:
Umrisshafte Erläuterung der aktuellen fachwissenschaftlichen Sicht des jeweiligen Konzeptes.
- Anmerkungen aus der Fachdidaktik:
Dieser Punkt gliedert sich in die Unterpunkte *Schulbücher*, *Begleitmaterial zu den Schulbüchern* und *exemplarische Veröffentlichungen seitens der Fachdidaktik*. Hier werden aktuelle fachdidaktische und praxisnahe Sichtweisen aus unterschiedlichen Blickwinkeln zusammengefasst und dargestellt. Dies wird natürlich nicht alle möglichen Ansichten präzise und lückenlos wiedergeben können, sondern soll lediglich einen groben Überblick liefern.

Die vier Wechselwirkungskonzepte werden chronologisch ihrer Entwicklungsgeschichte nach behandelt - beginnend beim Kraftkonzept über das Feldkonzept und Geometrisierungskonzept hin zum aktuellen Austauscheteilchenkonzept. Der Grund für diese Reihenfolge ergibt sich nicht nur aus historischen Erwägungen, sondern ist auch Ausdruck der inhaltlichen Verzahnung einzelner Konzepte. Bspw. wird eine der grundlegenden Größen des Feldes - die Feldstärke - mithilfe des Kraftbegriffs definiert, sodass eine präzise Darstellung des Feldkonzeptes ohne den möglichen Anschluss an das Kraftkonzept nicht hinreichend möglich ist.

3.1. Konzepte in der Physik

3.1.1. Allgemein

Bevor die verschiedenen Wechselwirkungskonzepte im Detail vorgestellt werden, soll an dieser Stelle zunächst der Begriff und seine Bedeutung erläutert werden. Dazu hier einige Definitionen zum Konzeptbegriff:

1. Konzept (von lateinisch concipere: „erfassen“) bezeichnet in der deutschen Alltagssprache einen vorläufigen, nicht bis ins Detail ausgeführten Plan. Im weiteren Sinn wird ein Konzept als Sammlung von Leitsätzen oder Prinzipien oder als Skizzierung eines Vorhabens verstanden.
2. Skizzenhafter, stichwortartiger Entwurf, Rohfassung eines Textes, einer Rede o. Ä.

oder

Idee, Ideal; aus der Wahrnehmung abstrahierte Vorstellung.
Duden

3. Bezeichnung für eine Konstellation von Wissen (Faktenwissen, Anwendungswissen, Handlungswissen, explizites Wissen und implizites Wissen), welches mit Einheitlichkeit und Konsistenz aktiviert werden kann; ermöglicht Dinge, Ereignisse oder Ideen im Gedächtnis zu Einheiten zusammenzufassen und in Verbindung stehend zu anderen Konzepten einzuordnen, d.h. zu kategorisieren und zu klassifizieren.

*teachsam*⁸

4. Als Konzept wird ein Planungsdokument bezeichnet, das aus den Grundlagen eines Vorhabens und seiner Ziele die Mittel und Wege definiert, mit denen diese Ziele erreicht werden können.

Ausgangspunkt ist in jedem Fall eine umfassende Analyse des Ist-Zustandes, der Bedingungen seiner Entwicklung und der dafür zur Verfügung stehenden Ressourcen. In der Gegenüberstellung mit den Zielen müssen diese unter Umständen verändert oder der Handlungsrahmen für die Realisierung des Vorhabens erweitert werden.

*definition-online.de*⁹

Eine klare Definition lässt sich hieraus nicht ohne Weiteres entnehmen. Man könnte die unterschiedlichen Definitionen passend bündeln und sagen, dass in der Physik ein Konzept einer Sammlung miteinander verbundener Regeln entspricht, die aus unserer alltäglichen Wahrnehmung abstrahiert wurden und mit deren Hilfe naturgegebene Sachverhalte beschrieben werden¹⁰. Schlussendlich wird dies einem physikalischen Konzept aber noch nicht gerecht, um eine präzise Bedeutung im Rahmen dieser Arbeit zu erfassen, müssen einige andere Begriffe thematisiert werden, die dazu in Beziehung stehen.

⁸http://www.teachsam.de/deutsch/glossar_deu_k.htm#Konzept

⁹<http://definition-online.de/konzept/>

¹⁰Natürlich gibt es in der Physik auch Konzepte, die einen vorläufigen Plan darstellen, bspw. eine neue, noch nicht falsifizierte Theorie.

- **Theorien:**

Theorien beziehen sich auf die Wirklichkeit, unsere Erfahrungswelt und die Natur. Dabei sind Theorien ein vereinfachendes, gedankliches Konstrukt, das zur Beschreibung der Wirklichkeit mehr oder weniger gut geeignet ist. Diese Theorien sind im Idealfall aufgebaut aus Axiomen, Gesetzen und Prinzipien, welche sich experimentell an der Wirklichkeit bewähren müssen. Die Beispiele zu den folgenden Begriffen wurden aus der Theorie der klassischen Mechanik entnommen (vgl. [PHY08, CD]).

- **Gesetze:**

Komplexe Zusammenhänge bzw. Phänomene in der Natur können mithilfe von mathematischen Gleichungen beschrieben werden. Diese Gleichungen können als Naturgesetze angesehen werden. Dabei verknüpfen sie verschiedene physikalische Größen und gelten unter Einhaltung ihrer Voraussetzungen in ihrem Gültigkeitsbereich.

Beispiel 1: *Gesetz des freien Falls*

Im Vakuum und bei gleichmäßiger Beschleunigung fallen alle Körper nach folgendem Gesetz. Hierbei beträgt die zurückgelegte Strecke:

$$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \quad (3.1)$$

Es verknüpft Zeit mit Strecke unter der Bedingung einer konstanten Beschleunigung. Es ist allgemeingültig, solange die Voraussetzungen erfüllt sind. Bei Luftreibung oder sich ändernder Beschleunigung (Fall aus sehr großer Höhe) gilt es somit nicht.

Beispiel 2: *Das Hebelgesetz*

An einer reibungsfrei drehbaren und starren Achse, an der Kräfte angreifen, herrscht Gleichgewicht, wenn die Summe aus linksdrehenden und rechtsdrehenden Momenten Null ist:

$$\sum_{i=0}^n \vec{r}_i \times \vec{F}_i = 0 \quad (3.2)$$

Es verknüpft den Abstand zum Drehpunkt mit der angreifenden Kraft und dem einbeschriebenen Winkel. Es ist allgemeingültig, solange die Voraussetzungen der starren und reibungsfrei gelagerten Achse erfüllt sind.

- **Axiom:**

Axiome sind die einfachsten Gesetze, aus denen sich eine Theorie aufbauen lässt. Sie sind nicht weiter in Teilaussagen zerlegbar und können nicht bewiesen werden. Sie machen allgemeine Aussagen und ihr Gültigkeitsbereich liegt in der kompletten Theorie.

Beispiel: *Erstes Newtonsche Axiom:*

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der geradlinigen gleichförmigen Bewegung, solange er nicht durch äußere Kräfte zur Änderung

seines Zustands gezwungen wird.

Es beschreibt, wie ein Gesetz, den Zusammenhang zwischen Größen (hier Kraft und Geschwindigkeitsänderung), ist aber nicht nur für einzelne oder eng begrenzte Gruppen von Phänomenen gültig. Es gilt in der gesamten Mechanik.

– **Prinzip:**

Ein Prinzip reicht weiter als Gesetze, es beschreibt keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen Größen, sondern trifft Aussagen über die Gesetze selbst.

Beispiel 1: *Superpositionsprinzip für Kräfte:*

Mehrere, am selben Körper angreifende Kräfte können durch eine einzige Kraft mittels Vektoraddition ersetzt werden.

Es ist eine allgemeine Regel zur Handhabung von Kräften. Es gilt auch bei Überlagerungen von Schwingungen oder Wellen. Somit gilt dieses Prinzip also in verschiedenen Bereichen der Mechanik.

Das Superpositionsprinzip lässt sich auch allgemeiner als die Möglichkeit zur Überlagerung gleicher vektorieller physikalischer Größen formulieren. Als Grundlage dient hierbei letztlich die Linearkombination von Vektoren aus der Mathematik. So können also neben den eben genannten Kräften bspw. auch Geschwindigkeiten addiert werden. Bei Betrachtung von Geschwindigkeiten ergibt sich aber auch eine Grenze der Gültigkeit dieses Prinzips. So gilt das Superpositionsprinzip für große Geschwindigkeiten in der relativistischen Mechanik nicht mehr, da vereinfacht gesagt die Lichtgeschwindigkeit bei der Addition nicht überschritten werden darf. Somit ist dieses Prinzip nicht universell anwendbar.

Beispiel 2: *Konstanzprinzip der Lichtgeschwindigkeit:*

In allen Inertialsystemen breitet sich das Licht im Vakuum isotrop und unabhängig von der momentanen Bewegung der Lichtquelle mit einer konstanten Geschwindigkeit von $c = 299792458 \text{ m/s}$ aus. Dieses Prinzip wurde hier noch aufgenommen, weil es als universell gilt und somit in allen Teilgebieten der Physik bei der Beschreibung von Phänomenen ohne Einschränkungen zu beachten ist.

Weiterhin gilt, dass Theorien einerseits quantitative Beschreibungen von Phänomenen in der Natur ermöglichen, indem sie Berechnungen darüber zulassen, welche Werte definierte physikalische Grundgrößen unter gewissen Bedingungen annehmen. Andererseits geben sie innerhalb des Theorierahmens Erklärungen der Naturvorgänge ab, indem sie das in der Natur Beobachtete auf teilweise unbeobachtbare ideelle physikalische Konzepte zurückführen. Das wohl bekannteste nicht unmittelbar zu beobachtende Konzept ist das physikalische Feld.

Es gibt nicht „Das Konzept“ zur Beschreibung bzw. Erklärung von Naturphänomenen; die Antwort auf physikalische Fragestellungen hängt immer von dem zugrundeliegenden Konzept ab. Als Beispiel betrachtet man einen freifallenden Stein:

Im Rahmen des Kraftkonzeptes, nach der Newtonschen Mechanik, wird das Fallen durch die Anwesenheit einer Schwerkraft erklärt, welche den Stein zum Erdmittelpunkt hin zieht. Dasselbe Phänomen wird im Geometrisierungskonzept der Allgemeinen Relativitätstheorie nach Einstein durch die Krümmung der Raumzeit verursacht, welche die natürliche Bewegung eines kräftefreien Körpers festlegt¹¹. Somit ist die Erklärung der Fallbewegung entweder eine Kraft oder die Geometrie der Raumzeit. Diese unterschiedlichen Konzepte kommen aber auf dasselbe Resultat. Diese mögliche Verknüpfung unterschiedlicher Konzepte ist im wissenschaftstheoretischem *Korrespondenzprinzip* zur Theorienhierarchie verankert¹² (vgl. 3.4.1). So können verschiedene Theorien dasselbe Phänomen mit unterschiedlichen Grundauffassungen erklären (vgl. [POP64, 84]).

3.1.2. Themata

Grundlegend haben alle Konzepte eins gemeinsam, *Gerald Holton* nennt es **Themata** (Sing.: **Thema**, aus dem Griechischen: das Niedergelegte, das Vorausgesetzte, das erste Wort).

Zur Erklärung: Das zweidimensionale Wissenschaftstheorie-Modell weist eine *empirische x-Achse* und eine *analytische y-Achse* auf, insgesamt wird sie *Dependenz-Ebene* genannt¹³. So kann beispielsweise der Begriff der Kraft in dieser Ebene eingeordnet werden. Er hat eine empirische *x*-Dimension, da Kräfte qualitativ aufweisbar und (durch die beobachtbare Ablenkung von Körpern) quantitativ messbar sind und auch eine analytische *y*-Dimension, da Kräfte den mathematischen Regeln der Vektorrechnung gehorchen (Addition von Kräften) [HOL84, 16].

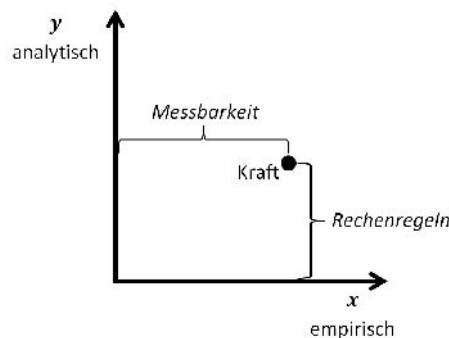


Abbildung 3.1.: Zweidimensionale wissenschaftstheoretische Dependenz-Ebene. Die *x*- und *y*-Komponenten haben hierbei keinen absoluten Charakter, sie versinnbildlichen nur die theoretische Anschauung.

¹¹vgl. Aufsatz von M.G. Bernhardt: *Wonach fragt die Physik*, Nov. 2005.

¹²Ursprünglich entstand der Begriff des Korrespondenzprinzips aus der Verbindung von klassischer Physik und Quantenmechanik und geht auf Nils Bohr zurück.

¹³Die Bedeutung von Begriffen und Aussagen sind sowohl empirisch als auch analytisch voneinander abhängig, sie sind dependent.

Die Begriffe, Aussagen, Gesetze etc. der Physik lassen sich, nach Meinung vieler Physiker, in dieser Ebene aber nicht eindeutig einordnen. Das Modell muss noch um eine weitere Achse zu einem dreidimensionalen Koordinatensystem ergänzt werden. Zur Begründung sind folgend einige namhafte Vertreter genannt:

Die fünfte Regel der *Regulae Philosophandi* von Newton:

„Was nicht aus den Dingen selbst entnommen werden kann, sei es durch die Sinne oder durch Denkprozesse, ist als Hypothese zu betrachten. [...] Was weder anhand der Erscheinung aufgewiesen noch aus ihnen durch induktive Argumente gewonnen werden kann, bezeichne ich als (notwendige) Hypothese.“ [HOL84, 12]

Kopernikus über Hypothesen:

Die Wahl wissenschaftlicher Hypothesen hängt nicht nur mit der Übereinstimmung von Beobachtungen zusammen, sondern „daß sie mit gewissen Vorurteilen, den Axiomen der Physik übereinstimmen muss.“¹⁴

Der Wissenschaftstheoretiker Karl R. Popper:

„Unsere Wissenschaft ist kein System von gesicherten Sätzen, auch kein System, das in stetem Fortschritt einem Zustand der Endgültigkeit zustrebt. [...] *Wir wissen nicht, sondern wir raten.* Und unser Raten ist geleitet vom unwissenschaftlichen, metaphysischen (aber biologisch erklärbaren) Glauben, daß es Gesetzmäßigkeiten gibt, die wir entschleiern, entdecken können“. [POP71, 223]

Auf Grundlage dessen hat *Holton* eine dritte Achse, die *thematische z*-Dimension eingeführt. Sie „stellt die grundsätzlichen Annahmen, Begriffe, methodische Urteile und Entscheidungen dar, die selbst nicht aus objektiv beobachtbaren Tatbeständen oder logisch mathematischen oder anderen Überlegungen ableitbar sind.“[HOL84, 19] Als bekanntes Beispiel sei hier das grundlegende *Themata* der Erhaltungssätze in der Physik genannt.

Alle Konzepte haben dies gemeinsam, sie weisen eine nicht beweisbare, dem Menscheng Geist entsprungene Grundidee, ein *Themata* auf. Einstein formulierte es in seiner Vorlesung „Zur Methode der theoretischen Physik“ in etwa so, dass die Herleitung der Prinzipien einer Theorie allein *aus der Erfahrung* durch *Abstraktion* (also auf einem logischen Weg) nicht möglich ist. Im logischen Sinne seinen *die zugrundeliegenden Begriffe, Grundgesetze bzw. axiomatischen Grundlagen freie Erfindungen des [Menschen]*. Sie unterliegen der *Willkür*, wie im Beispiel in den Erklärungen des freifallenden Steins aus Sicht Newtons oder Einsteins.

Begutachten wir so die Wechselwirkungskonzepte, ergeben sich folgende zugrundeliegenden *Themata*:

¹⁴Zitiert nach Edward Rosen, *Three Copernical Treatises*. New York: Dover Publications, 1959, S. 29.

1. **Das Kraftkonzept:**

Die Kraft ist nach Galilei und Newton durch ein Gedankenexperiment definiert als die Beschleunigung eines massebehafteten Objekts auf einer reibungsfreien horizontalen Ebene.

2. **Das Feldkonzept:**

Das Feld ist nach Faraday und Maxwell eine nicht fühlbare bzw. nicht substanzielle Änderung der Raumeigenschaften um einen bestimmten Körper und somit ein kausalitätserhaltender Träger einer lokalen Wechselwirkung (Nahwirkung).

3. **Das Geometrisierungskonzept:**

Die Geometrisierung beschreibt, nach Einstein auf Grundlage des Allgemeinen Relativitätsprinzips und des Äquivalenzprinzips, Bewegungen aufgrund der Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit.

4. **Das Austauschteilchenkonzept:**

Das Austauschteilchen nach Hideki Yukawa vermittelt die Wechselwirkung zwischen Nukleonen. Später verallgemeinerte Formulierung: Teilchen emittieren und absorbieren unablässig bestimmte Austauschteilchen und wechselwirken über diese mit anderen Teilchen.

3.1.3. Zusätzliche Legitimation

Eine konzeptuale Beschäftigung im Unterricht wird durch den Thematedanken sogar legitimiert, da vor Beginn einer neuen Entwicklung Themata zum Aufbau eines Konzeptes erdacht werden müssen.

„Gerade in der Jungphase jeder Wissenschaft [jedes Konzeptes] tritt die thematische Komponente am deutlichsten hervor, noch vor dem Aufbau der komplexen hierarchischen Hypothesenstruktur“[HOL84, 24].

Aus didaktischer Sicht befinden sich alle Schülerinnen und Schüler in der Jungphase der Wissenschaft. Für die Lernenden ist diese Disziplin (Physik) neu und sie müssen diese von Grund auf erlernen. Somit ist für sie die *thematische* Struktur zur erfolgreichen Erlernung von bedeutender Relevanz. Sie müssen verinnerlichen, dass es grundlegende Annahmen gibt, die sinnvoll gewählt sind, aber deren Richtigkeit nicht direkt bewiesen werden können.

3.1.4. Eine mögliche Definition

Insgesamt kann man zusammenfassen, dass jedes Konzept eines oder mehrere Themata aufweist, diese sind axiomatischer Natur und man könnte sie somit dem Begriff der Axiome unterordnen. Des Weiteren beinhaltet ein Konzept, wie eine Theorie,

weitere Unterbegriffe, besitzt aber nicht die Komplexität einer Theorie. Man könnte also meinen, dass es einen Bestandteil einer Theorie darstellt. Dem widerspricht aber, dass Konzepte, wie Prinzipien, theorieübergreifend ihren Gültigkeitsanspruch erheben. So gilt das *Prinzip der kleinsten Wirkung* in der klassischen Mechanik, in der Elektrodynamik (Maxwellgleichungen), in der Quantenmechanik, in den Einsteingleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie usw.; das Kraftkonzept lässt sich sowohl in der klassischen Mechanik als auch in der Elektrodynamik finden. Aus diesem Grund ist eine trennscharfe physikalische Definition nicht möglich. Aus den eben gemachten Ausführungen kann man den Rückschluss ziehen, dass ein Konzept definitionsgemäß einem Prinzip ähnelt, mit dem Unterschied, dass ein Prinzip von der Natur fest vorgegeben wird und der Mensch es nur entdecken muss, wohingegen ein Konzept, im Einklang mit Vorerfahrungen aus der Natur, vom Menschen selbst erdacht werden muss.

Somit wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff Konzept folgendermaßen definiert:

Ein physikalisches Konzept ist eine vom *Menschen erdachte*, sehr allgemeine Aussage, die es erlaubt, „nach einem einheitlichen Gesichtspunkt gleichartige Systeme zu behandeln, oder die als Ursache anderer Erscheinungen auftritt, die sich dann auf dieses [Konzept] zurückführen bzw. mit ihm erklären lassen.“[MEY73, 662] Ein Konzept ist mathematisch-analytisch nicht beweisbar (Themata-Anspruch), sondern nur mittelbar durch aus ihm gezogene Schlüsse. Gefolgerte Schlüsse können experimentell das zugrundeliegende Konzept bestätigen.

Konzepte stehen nicht nebeneinander, vielmehr ergänzen sie einander bzw. sind miteinander verwoben. Ein anschauliches Beispiel ist die Definition der Feldstärke als Grundlage des Feldkonzeptes, diese ist ohne den Kraftbegriff nicht möglich.

3.2. Das Konzept der Kraft

Wenn ich weiter als andere
gesehen habe, dann nur
deshalb, weil ich auf der
Schulter von Giganten stand.

(Newton)

3.2.1. Historische Entwicklung

Die Anfänge eines Kraftbegriffs finden sich in der griechischen Antike. Dort haben sich schon viele Gelehrte über Bewegungen und deren Ursprung Gedanken gemacht. Die Physik im heutigen Sinne gab es allerdings zu dieser Zeit noch nicht. So war es in der Antike eher eine Art Verschmelzung von Physik und Naturphilosophie. Das heißt, die ersten physikalischen Untersuchungen und Überlegungen wurden rein durch das Interesse an der Natur (physis <griech.> die Natur) geweckt und waren in ihren Formulierungen sehr philosophisch.

Aristoteles

Die ersten namhaften Vertreter dieser Naturphilosophie waren *Platon* (427 - 347 v.C.) und *Aristoteles* (384 - 322 v.C.) (vgl. [GRE86, 13 ff.] [KUH06, 6 ff.]). Von starkem Interesse waren zu dieser Zeit Bewegungen, wobei man für deren Beschreibung einen Ursprung, einen „Starter“, benötigte. Hierdurch bedingt entstanden erste Überlegungen zu einem Kraftbegriff, bei denen sich vor allem Aristoteles verdient gemacht hat. Eine direkte mathematische Beschreibung einer Bewegung lässt sich bei Aristoteles nicht finden, der sich eher auf qualitative Aspekte beschränkte. Dabei ist vor allem seine klare Trennung der Himmelsmechanik von der irdischen Mechanik auffällig. Seine Himmelsmechanik wird an dieser Stelle nicht betrachtet, sondern seine Idee der irdischen Mechanik soll näher erläutert werden, da diese Vorstellung uns an den früheren Kraftbegriff heranzuführt. So sagt Aristoteles, dass jede Bewegung einen „motor“ [KUH01b, 18] (Beweger) brauche. Dieser „motor“ müsse entweder direkt im Körper enthalten sein oder in unmittelbarem Kontakt zu diesem stehen. Hier wird das erste Mal die Vorstellung einer Kontaktkraft verbalisiert. Aber es tauchen auch unwiderrufliche axiomatische Probleme auf. So kann man sich sehr gut vorstellen, dass beispielsweise ein Tier einen „motor“ enthält. Aber wie verhält es sich bei einem den Berg herunter rollenden Stein? Diese Problematik löste Aristoteles durch die Separation von *Natürlichen Bewegungen* und *Erzwungenen Bewegungen*:

- *Natürliche Bewegungen*: Diese kommen dadurch zustande, dass Körper ihrem natürlichen Ort zustreben wollen. Beispielsweise ist ein Stein schwere Materie, das heißt seine natürliche Bewegungsrichtung ist nach unten, zur schweren

Erde. Ein Gas oder Dampf ist leichte Materie, sie will nach oben in den leichten Himmel steigen, da dies ihr „natürlicher Ort“ ist.

- *Erzwungene Bewegungen*: Hier wird ein außenstehender „motor“ benötigt, der direkt an dem Körper angreift, um eine Bewegung zu verursachen und diese aufrechtzuerhalten. Offensichtlich entstehen hierbei aber große Probleme, die Wurfbewegung zu deuten. Aristoteles hatte hierfür auch Erklärungsversuche, die an dieser Stelle aber zu viel Raum einnehmen würden. Eine Erklärung lässt sich zum Beispiel in [KUH01b, 19] finden.

Die *Erzwungene Bewegung* ist auch unter dem Begriff der „peripatetischen Dynamik“¹⁵ bekannt, die besagt, dass man für die Aufrechterhaltung einer Bewegung eine Ursache benötigt. Diese Ursache kann mit dem ersten Kraftbegriff identifiziert werden. Nach dem heutigen Wissen ist diese Annahme falsch, da manche Aspekte, beispielsweise die Reibung, bei der Formulierung dieser Lehre außer Acht gelassen wurden. Nach einer Weiterentwicklung seiner Überlegungen kam Aristoteles durch ein Gedankenexperiment, nach Übersetzung in die heutige Formelsprache¹⁶, auf folgende Relation (vgl. [HUN72, 33]):

$$K = W \cdot v \tag{3.3}$$

K : Kraft
 W : Widerstand
 v : Geschwindigkeit

Aristoteles führte seine Gedanken weiter aus und fand nach einiger Zeit ein Problem an seiner Definition. Wenn mehrere Männer einen vollbeladenen Karren in einer gewissen Zeit von A nach B ziehen, würde obige Formel sagen, dass ein einzelner Mann den Karren von A nach B in einer längeren Zeitspanne ziehen könnte. Aber aus alltäglichen Erfahrungen sieht man, dass ein einzelner Mann den Wagen gegebenenfalls gar nicht erst von der Stelle bekommt. Hier ist *Aristoteles* erstmals auf das Problem der Reibung gestoßen, welches er zu dieser Zeit noch nicht zu lösen vermochte. In späteren Aufzeichnungen unternahm *Aristoteles* dann nochmal den Versuch, die Bewegungsursache, die Kraft, quantitativ zu fassen. Wenn man seine Überlegungen in die heutige Formelsprache übersetzt, führt uns dies zu dem

¹⁵peripatetisch <griech.>, eigentlich bedeutet es *umherwandeln*, also beruht es auf dem Ort (Wandelhalle) und der Tätigkeit (Laufen) während des Lehrens. Heute wird der Begriff mit „auf der Lehre des Aristoteles beruhend“ verwendet[DUD96].

¹⁶Zur damaligen Zeit wurden Zusammenhänge mit Worten beschrieben, um einen Vergleich zu ermöglichen und dadurch den Werdegang besser darstellen zu können, werden die Formulierungen mit Formelzeichen und mathematischen Operatoren wiedergegeben.

„Grundgesetz der Aristotelischen Dynamik“ ([GRE86, 28]):

$$\begin{aligned} v &= f \cdot \frac{K}{W} \\ \iff K &= c \cdot v \cdot W \end{aligned} \tag{3.4}$$

mit der Nebenbedingung : $K > W$

v	:	Geschwindigkeit
K	:	Kraft
W	:	Widerstand
$f^{-1} = c$	:	Proportionalitätskonstante

Die Proportionalitätskonstante c kann man als die Menge des zu bewegendes Körpers, also aus heutiger Sicht als träge Masse m bezeichnen. Was man heute Gleichung 3.4 ansieht, ist aber schon eine Überinterpretation von Aristoteles. Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Widerstand und Kraft war bei ihm ein prinzipieller, denkschematischer - kein formelmäßig exakt gültiger.

Bradwardine

Dieses Wissen war nun für die folgenden annähernd 2000 Jahre maßgeblich. Dies lag wohl zum Großteil daran, dass Aristoteles eine gewisse Autorität darstellte, der man nicht unbedingt widersprach. Erst der Scholastiker *Thomas Bradwardine* (1295 - 1349) (vgl. [GRE86, 48]) beanstandete, dass, wenn sich Kraft und Widerstand gleichzeitig ändern würden, immer noch eine kleine Kraft relativ große Massen bewegen könnte. So kam er mit seiner Verbesserung von 3.4 zu folgendem Schema:

$$v = f \cdot \log \frac{K}{W} \tag{3.5}$$

, wiederum mit der Nebenbedingung $K > W$. Hier ist nun aber sichergestellt, dass wenn $\frac{K}{W} \rightarrow 1$ wird $v \rightarrow 0$ und somit können kleine Kräfte nichts Großes bewegen.

Impetus-Theorie

Das Problem der letztendlichen Wirkung war damit aber nicht behoben, auch die Streitfrage, warum der Stein nicht unmittelbar nach Abwurf nach unten fällt (vgl. Aristoteles Erzwungene Bewegung), stand noch offen. Im Mittelalter wurde Letzteres mittels der Impetus-Theorie zu erklären versucht. So ging *Avicenna* (980 - 1037) (vgl. [HEL70, 167]) davon aus, dass einem Geschoss mit dem Abschuss ein *Impetus*¹⁷ übertragen würde. Dieser Impetus sollte sich dann langsam verringern und das Geschoss senkrecht nach unten fallen, wenn der Impetus aufgebraucht ist.

¹⁷Wurde damals zunächst auch als „geborgte Kraft“ verstanden.

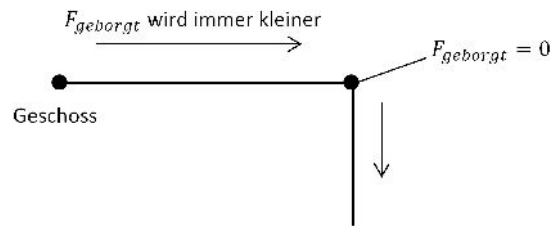


Abbildung 3.2.: Wurf nach Avicenna.

In den folgenden rund 400 Jahren wurde diese Theorie von vielen naturwissenschaftlichen Vertretern, darunter *Buridan* (um 1300 - 1358) und *Oresme* (um 1320 - 1382) (vgl. [HEL70, 167]), weiterentwickelt, da die Vorstellung des plötzlichen senkrechten Falls von Avicenna augenscheinlich nicht stimmen konnte. Somit bezogen sie die Masse des geschossenen Gegenstands stärker mit ein und waren der Meinung, dass die Menge an Masse bei geringer werdendem Impetus schon für eine Abwärtsbewegung Sorge. Damit wurde der unrealistische abrupte senkrechte Fall verworfen, sowie in diesem Zug auch einem anderen Problem begegnet: Man kann einem Stein aufgrund seiner höheren Masse mehr Impetus als einer Feder verleihen und ihn somit weiter werfen.

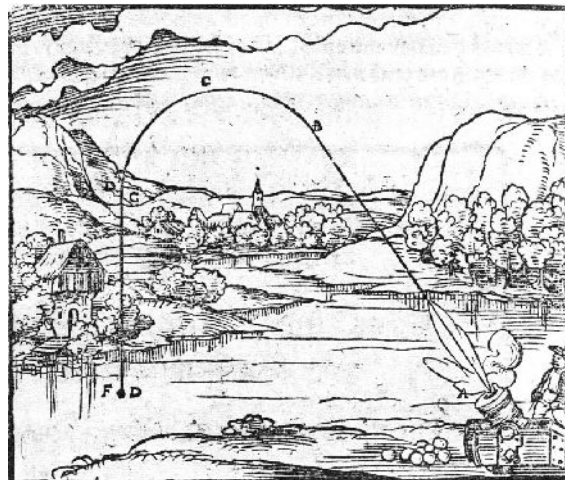


Abbildung 3.3.: Flugbahn eines Geschosses nach der erweiterten Impetus-Theorie von Buridan [RYF82].

Trotz alledem wurde die Bewegung aber immer noch als ein Prozess angesehen, bei dem ein Impetus, eine *vis impressa* (Kraft), wirkt und ihn aufrechterhält (vgl. [CRO77, 61]).

Den Impetus-Gedanken kann man sich wie folgt formal vorstellen (vgl. [HUN72,

84]):

$$v = \frac{F + I(m)}{R} \quad (3.6)$$

v	: Geschwindigkeit
F	: Kraft
$I(m)$	: Impetus in Abhängigkeit der Masse
R	: Widerstand

Ist der Impetus verbraucht ($I(m) = 0$), dann ist die Bewegung wieder rein aristotelisch.

Letztendlich hat die Impetustheorie den Kraftbegriff nicht viel weiter entwickelt, aber der Fortschritt gegenüber Aristoteles bestand im Fortfall des externen Bewegers. Durch die Übertragung der Kraft auf den sich bewegenden Körper wurde es möglich, das Medium als Widerstand gegen eine Bewegung zu betrachten. Der Widerstand wurde aber nicht als äußere Kraft konzeptualisiert, da die Kraft noch immer als die Ursache der Bewegung, nicht als Ursache ihrer Änderung verstanden wurde.(vgl. [UR15, 3])

Da Vinci

Eine Weiterentwicklung lieferte der Universalgelehrte *Leonardo da Vinci* (1451 - 1519). Zu seinen Lebzeiten war die Impetustheorie noch vorherrschend und so fasste er den Impetus zunächst als den aristotelischen „motor“ auf. Er versuchte sich aber von dem aristotelischen Kraftbegriff zu lösen und dieser sehr philosophischen Ansicht eine physikalische Note zu geben. So sagte er:

„Kraft (forza) ist ein geistiges Wirkvermögen (virtu spirituale), eine unsichtbare Macht (potentia invisible), die mittels einer äußeren Gewaltbarkeit durch die Bewegung hervorgerufen ist und den Körpern innewohnt [...] Sie gibt ihnen ein tätiges Leben [...], zwingt alle geschaffenen Dinge zur Veränderung der Form und der Lage, eilt mit Wut zu ihrem ersehnten Tod und wandelt sich je nach der Ursache. [...] Der Körper, in dem sie geboren wird, wächst nicht an Gewicht (in peso) noch in Form [...] Die Kraft wird durch die Bewegung verursacht und mit dem Gewicht verbunden.“[SCH30, 33]

Aber hier erkennt man die begrifflichen Probleme der Kraft (forza) oder besser gesagt, die allgemeinen begrifflichen Probleme in der damaligen Physik, welche auch später noch bei Descartes und Leibniz vorliegen. Ist die Kraft nun eine Prozessgröße oder liefert sie die *Möglichkeit* einer Aktion?

Dadurch, dass Aristoteles die Meinung vertrat, die *Natürlichen Bewegungen* existierten einfach so und man müsse dem keine Erklärung beimessen, haben viele Gelehrte davon Abstand genommen, diese näher zu untersuchen.

Galilei

Erst um 1600 widersprach *Galileo Galilei* (1564-1642) und stellte seine eigene Theorie diesbezüglich auf. Er war ein Unterstützer der deduktiven Herangehensweise, sodass er seine dem Geiste entsprungenen Deutungen durch Experimente bestätigt wissen wollte. So soll er gesagt haben:

Ich habe ein Experiment darüber angestellt, aber zuvor hatte die natürliche Vernunft mich ganz fest davon überzeugt, dass die Erscheinung so verlaufen musste, wie sie auch tatsächlich verlaufen ist [KOY88, 26].

Galileo war somit auch einer der Ersten, der seine Forschung in der Weise auf experimentelle Methoden stützte, dass er den Versuch als Modus auffasste, zuvor formulierte Hypothesen zu überprüfen. Damit wurde das Experimentieren zu einer zentralen Arbeitsweise der Physik. Durch seine Ideen zur Mathematisierung der Naturgesetze und deren experimentellen Bestätigung hat Galileo eine neue Bewegungslehre aufgestellt. Man kann sie in die vier nun folgenden Punkte gliedern (vgl. [KUH01b, 135 f.]):

- Eine Bewegung kann man nicht als Prozess des jeweiligen Körpers ansehen, wie Aristoteles es annahm. Es ist vielmehr ein Zustand. So kommt man auch zu der Erkenntnis, dass ein „Bewegungszustand“ nicht unbedingt von einem „Ruhezustand“ zu unterscheiden ist. Es kommt jeweils auf das Bezugssystem des Beobachters an; eine Bewegung an sich kann man nicht erfassen, man muss die Bewegung relativ zu einem anderen Körper betrachten.
- Das Trägheitsprinzip spielt eine wichtige Rolle, wenn man die Ursache der Bewegung von Körpern betrachtet.

Galileisches Trägheitsprinzip: Ein sich selbst überlassener Körper bewegt sich ohne äußere Einwirkung geradlinig gleichförmig oder bleibt in Ruhe. [MET98, 38]

- Das Trägheitsprinzip macht die Unterscheidung zwischen der Himmelsmechanik und der irdischen Mechanik bedeutungslos.
- Eine weitere wichtige Erkenntnis, die man aus dem Trägheitsprinzip gewonnen hat, war das klassische Relativitätsprinzip.

Das sogenannte Galileische Relativitätsprinzip der klassischen Mechanik besagt, dass *die Gesetze der Mechanik in gleichförmig gegeneinander bewegten Bezugssystemen (IS) gleich lauten*. [MEY73, 711]

Dies bedeutete natürlich auch in Teilen einen Umsturz des durch Aristoteles vorgeschlagenen Kraftbegriffs (die Ursache), wobei hier ganz klar zwischen Kraftbegriff als Ursache und Kraftdefinition (in Formeln) zu unterscheiden ist. Begrifflich gesehen widersprach Galileo Aristoteles, aber in der Definition ging Galileo immer noch davon aus, dass die Kraft proportional zur Geschwindigkeit ist.

Descartes und Leibniz

Die Suche nach einem Kraftmaß gelangte im 1700 Jahrhundert zu einem Höhepunkt. Es entstanden zwei Lager, die Cartesianer und die Leibnizianer (vgl. [SCH91, 63]). Die Cartesianer waren Unterstützer von *René Descartes* (1596 - 1650), der das Kraftmaß in $m \cdot v$ sah. Die Leibnizianer standen hinter dem Mathematiker *Gottfried Wilhelm Leibniz* (1646 - 1716), der die Kraft hinter $m \cdot v^2$ vermutete. Hierbei ist aber zu beachten, dass beide von einer Erhaltung der Kraft ausgingen. Descartes ging von Stoßexperimenten und Leibniz von Fallexperimenten aus, d.h. aus Sicht unserer heutigen Erkenntnisse sahen sie das Kraftmaß im Impulsbegriff bzw. im Energiebegriff.

Newton

Ein Ende dieses Streites war zunächst auch dann nicht in Sicht, als *Isaac Newton* (1643 - 1727) die erste vollständige Axiomatisierung der Kraft in den *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* lieferte, in denen zum ersten Mal der uns heute wohlbekannte Kraftbegriff formuliert ist. Wichtig hierbei ist aber zu wissen, dass Newton betont, dass er die Kräfte nicht physikalisch, sondern rein mathematisch betrachtet. Eine physikalische Betrachtung ist seiner Meinung nach zwar möglich, aber aus seinem Unwissen über die Ursache der Schwere verzichtet er auf eine solche Beschreibung [BER85, 49].

Die von ihm aufgestellten Axiome sind heute, vor allem in Schulbüchern, unter dem Namen „Newtonsche Gesetze¹⁸“ bekannt. Sie lauten (vgl. [DEM06a, 53 f.]):

1. *Newtonsches Axiom*: Trägheitsprinzip: Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder gleichförmigen geradlinigen Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.
2. *Newtonsches Axiom*: Die aufzuwendende Kraft, die man benötigt, um die Bewegung eines Körpers zu ändern, ob er nun ruht oder sich gleichförmig bewegt, ist proportional zu seiner Masse und proportional zu seiner Beschleunigung.

¹⁸Newton selbst hatte sich nicht klar geäußert, ob es ein Axiom, Gesetz oder eine Definition ist (vgl. [KUH01b, 219]).

Anders ausgedrückt ist die Kraft gleich der zeitlichen Impulsänderung¹⁹.

$$\mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \dot{\mathbf{p}} \quad (3.7)$$

3. *Newtonsches Axiom*: Bei zwei Körpern, die nur miteinander, aber nicht mit anderen Körpern wechselwirken, ist die Kraft $\mathbf{F}_1$ auf den einen Körper entgegengesetzt gleich der Kraft $\mathbf{F}_2$ auf den anderen Körper.

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (3.8)$$

Newton formulierte dieses Gesetz so:

$$actio = reactio \quad (3.9)$$

Newton akzeptierte den Erhaltungsgedanken der Kraft in Leibniz und in Descartes Kraftmaß nicht, versuchte sie aber auch nicht einwandfrei zu widerlegen, sodass man davon ausgehen kann, dass die drei unterschiedlichen Definitionen erst einmal nebeneinander standen. Was ist aber nun das richtige Kraftmaß? Eine solche Dichotomie in einer naturwissenschaftlichen Größe war einfach nicht hinzunehmen, da dies eine sehr wichtige Grundlage darstellte, um die Physik weiter auszubauen und um sich ein Stück von ihren metaphysischen Wurzeln zu lösen.

d'Alembert

Gelungen ist dies letztendlich dem bedeutendem Mathematiker und Physiker *Jean-Baptiste le Rond d'Alembert* (1717 - 1783) [SCH91, 67f]. Er löste das Problem des dreifachen Kraftbegriffs durch Führung eines „mathematischen Beweises“, besser gesagt durch Nutzung empirischer Daten und verzichtete dabei auf spirituelle Terminologie. Seine Erklärung sieht die unterschiedlichen Kraftmaße als eine unterschiedliche Wirkung derselben Ursache, und zwar der Kraft im Newtonschen Sinne. So lässt sich die Newtonsche Kraft in zweierlei Hinsicht definieren.

- Unter zeitlicher Betrachtung der Bewegungsgröße $m \cdot v$. (Zusammenführung von Newtons und Descartes Ideen.)

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (3.10)$$

- Unter räumlicher Betrachtung der Bewegungsgröße $\frac{m \cdot v^2}{2}$. (Zusammenführung von Newtons und Leibniz Ideen.)

$$F = \frac{d\frac{mv^2}{2}}{ds} \quad (3.11)$$

¹⁹Die Schreibweise mit der Beschleunigung a , also $F = m \cdot a$, wurde erst von Leonard Euler in dieser Form eingeführt.

andernfalls auch in integraler Sicht:

- $m \cdot v$ als Zeitintegral der Newtonschen Kraft F

$$c + mv = \int F \, dt \quad (3.12)$$

- $\frac{m \cdot v^2}{2}$ als Wegintegral der Newtonschen Kraft F

$$c + mv^2 = 2 \cdot \int F \, ds \quad (3.13)$$

Dadurch wird deutlich, dass die kinetische Energie und der Impuls kein Widerspruch, sondern zwei Aspekte derselben Kraftdefinition darstellen. Die Größe $m \cdot v^2$ erweist sich als Maß für die Entfernung (Wegintegral), die ein geradlinig bewegter Körper durch die hemmende Kraft (Widerstand) noch zurücklegen kann, also als dessen kinetische Energie²⁰. Von der Größe $m \cdot v$ dagegen (dem heutigen Impuls) ist die Zeit abhängig (Zeitintegral), bis der Körper zur Ruhe kommt (vgl. Werner Eisner [EIS10, 19]).

Der Vollständigkeit halber wird hier noch auf eine weitere bedeutende Leistung Newtons eingegangen. Diese besteht in der Verschmelzung der schon eben erwähnten Himmels- und der irdischen Mechanik. Aristoteles stellte diese Trennung auf, sie wurde dann unter anderem von Galileo aufgebrochen und fand unter Newton ihre mathematische Formalisierung im allgemeinen Gravitationsgesetz, welches lautet:

$$\mathbf{F}_G = \gamma \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{r^2} \quad (3.14)$$

mit $\gamma = 6,67428 \cdot 10^{-11} [\frac{m^3}{kg \cdot s^2}]$ [PDG10, 5]

Nach Newton war es möglich, die Kraft, die einen Stein zu Boden fallen lässt, als dieselbe Kraft aufzufassen, die den Mond auf seiner Bahn um die Erde hält. Dies war ein Meilenstein in der physikalischen Forschung und fasziniert auch heute noch. Damit waren nun die zwei großen naturphilosophischen Ideen von Aristoteles aufgehoben. Die reibungsfreie Kraft ist nicht proportional zur Geschwindigkeit und eine Teilung der Mechanik in „Größenordnungen“ des zu betrachtenden Systems hinfällig.

Aber die Frage, die immer noch im Raum stand und die bis dahin niemand zu lösen vermochte, war die Frage nach der Entstehung bzw. Übermittlung der Kraft. Bei Kräften zwischen Körpern, die in direktem Kontakt stehen, also Kontaktkräften, war die Vermittlung relativ klar zu sehen. Aber der fallende Stein oder Größenordnungen der Anziehung zwischen Planeten stellten sowohl in Entstehung sowie in Vermittlung der Kraft ein großes Problem dar.

Newton sah die Entstehung der Gravitationskraft in der Masse, die einem Körper

²⁰Leibniz dachte rein in Proportionen, deshalb fehlt hier der Faktor $\frac{1}{2}$.

innewohnt. Vor allem wegen konzeptionellen Schwierigkeiten aber verstand er die Vermittlung dieser Kraftwirkung als eine Art Fernwirkung zwischen räumlich entfernten Massenpunkten. Diese Erklärung stellte Newton selbst nicht zufrieden und so sagte er:

„Ich habe noch nicht dahin gelangen können, aus den Erscheinungen den Grund dieser Eigenschaften der Schwere abzuleiten, und Hypothesen (*Hypotheses non fingo*) erdenke ich nicht [...] Es genügt, daß die Schwere existiere, daß sie nach den von uns dargelegten Gesetzen wirke und daß sie alle Bewegungen der Himmelskörper und des Meeres zu erklären imstande sei. Es würde hier der Ort sein, etwas über eine gewisse höchst subtile geistige Substanz hinzuzufügen, welche alle festen Körper durchdringt und ihnen enthalten ist. Durch die Kraft und Trägheit dieser geistigen Substanz ziehen sich die Teilchen der Körper wechselseitig in den kleinsten Entfernungen an und haften aneinander.“[KUH01b, 39]

Somit lehnte Newton in gewisser Weise selbst die Fernwirkung ab und erwog einen „Gravitationsäther“ zur Vermittlung der Kraft, welcher nichts anderes als eine Nahwirkungsvorstellung darstellte. Interessanterweise bedienten sich später noch viele weitere Physiker der Fernwirkungsvorstellung nach Newton, um die elektrische und magnetische Kraft zu erklären, bis *Faraday* ein anderes Konzept vorschlug.

Ab diesem Zeitpunkt wurden nun viele Erscheinungen, die auf Kräfte zurückzuführen sind, mit Newtons „Kraft“ ausgedrückt, d.h. man hatte immer eine Proportionalität zur jeweiligen Beschleunigung²¹ und eine Proportionalitätskonstante, die allgemein gesprochen eine Ladung widerspiegelt, wobei man hier die Masse als eine Art Ladung des Schwerefeldes sehen kann, hierzu siehe das folgende Kapitel.

²¹ „Jeweilig“ soll in diesem Zusammenhang auf die Richtung hinweisen, also ob man beispielsweise eine lineare oder eine Kreisbeschleunigung betrachtet.

3.2.2. Fachwissenschaftliche Sicht

Kraft wird aus dem Zwang
geboren und stirbt an der
Freiheit

(Da Vinci)

In der heutigen Fachwissenschaft sind die Grundlagen des Kraftkonzeptes die schon genannten Newton'schen Axiome.

1. Axiom: Lex Prima

Es gibt Bezugssysteme, in denen ein kräftefreier Massepunkt im Zustand der Ruhe oder gleichförmigen Bewegung verharrt bzw. die kräftefreie Bewegung durch $\dot{\vec{r}}(t) = \vec{v} = \text{const.}$ beschrieben wird. Solche Systeme heißen Inertialsysteme.

Für dieselbe Beschleunigung verschiedener Körper gleichen Volumens braucht man unterschiedliche Anstrengungen. Ein Holzblock lässt sich leichter bewegen als ein gleich großer Eisenblock. Die zu erzielende Wirkung ist also von einer Materialeigenschaft des zu bewegenden Körpers abhängig. Diese setzt einer Bewegungsänderung einen Trägheitswiderstand entgegen, der nicht von der Stärke der Anstrengung abhängt (vgl. [NOL06a, 122]). Diese skalare Eigenschaft ist gegeben durch die *träge Masse* m_t .

Als weitere Definition braucht man das Produkt aus dieser trägen Masse und der Geschwindigkeit eines Massepunktes, den *Impuls* $\vec{p} = m_t \cdot \vec{v}$. Mit diesen Definitionen lässt sich das zweite Axiom formulieren:

2. Axiom: Lex Secunda

Die Änderung des Impulses ist der Einwirkung der bewegenden Kraft proportional und geschieht in Richtung der Kraft.

$$\vec{F} = \dot{\vec{p}} = \frac{d}{dt}(m_t \vec{v}) \quad (3.15)$$

Dieses Axiom ist in dieser Form ausschließlich für Inertialsysteme nach dem 1. Axiom definiert.

Jede Kraftwirkung auf einen Massepunkt ist auch immer mit einer Rückwirkung auf dieselbe Kraftquelle verbunden. Dieses Reaktionsprinzip ist im dritten Newton'schen Axiom formuliert.

3. Axiom: Lex Tertia

Der Kraft, mit der die Umgebung auf einen Massepunkt wirkt, entspricht stets eine gleich große, entgegengesetzte Kraft, mit der der Massepunkt auf seine Umgebung wirkt.

$$\vec{F}_{\text{actio}} = -\vec{F}_{\text{reaction}} \quad (3.16)$$

bzw. bei zwei Massepunkten 1 und 2.

$$\vec{F}_{1 \rightarrow 2} = -\vec{F}_{2 \rightarrow 1} \quad (3.17)$$

Beispiel des Wechselwirkungsprinzips:

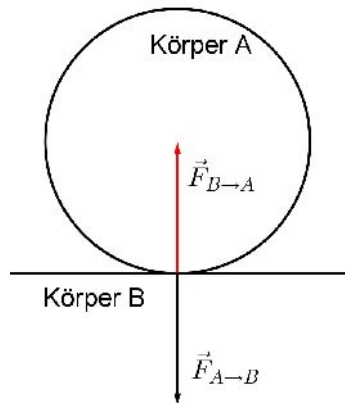


Abbildung 3.4.: Auflagedruck einer Kugel

In einem abgeschlossenen System ist das Wechselwirkungsgesetz äquivalent zur Impulserhaltung. Kräfte sind zeitliche Änderungen des Impulses. Entsprechend des 3. Axioms ergibt die Summe aller Kräfte in einem abgeschlossenen System Null, dies führt, bei Ersetzung der Kräfte durch die zeitliche Impulsänderung, zum Impulserhaltungssatz. Dieser Sachverhalt ergibt sich bei weiterer Verallgemeinerung durch das Noether-Theorem zur Homogenität des Raumes.

Physikalische Gesetze sind nicht von der Position im Raum abhängig.

Dieses Grundprinzip der Symmetrie wird auch oft als Translationsinvarianz bezeichnet.

4. Axiom: Lex Quarta²²

Wirken auf einen Massepunkt mehrere Kräfte $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, so addieren sich diese vektoriell zu einer resultierenden Kraft $\vec{F}_{Res}$ auf.

$$\vec{F}_{Res} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad (3.18)$$

Mit diesen Axiomen ist es nun möglich, Rückschlüsse auf Bewegungen bzw. Bewegungsänderungen zu ziehen. Bei bekannter Krafteinwirkung können mit dem 2. Axiom ($\vec{F} = \dot{\vec{p}} = m_t(t) \cdot \ddot{\vec{r}}(t)$) durch zweifache Integration Folgerungen hinsichtlich

²²In Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* wird dies als Superpositionsprinzip beschrieben. Erst später wurde es als viertes Newtonsche Gesetz (Lex Quarta) bezeichnet.

der Bahnkurve $\vec{r}$ gemacht werden. Bei hinreichend gegebenen Anfangsbedingungen können sogar die Integrationskonstanten bestimmt werden und die exakte Bahnkurve, also die komplette Bewegung, festgelegt werden.

In den Formulierungen sind die Axiome in dem Sinne stark eingeschränkt, als dass zuweilen nur von Massepunkten die Rede ist. Letztendlich ist der Begriff des Massepunktes aber nicht einschränkend, da bei einer Aufsummierung aller N Teilchen eines Körpers der Beitrag seiner inneren Kräfte herausfällt und sich somit der Schwerpunktsatz ergibt (vgl. [FLI09, 26]).

Der Schwerpunkt eines Systems bewegt sich so, als ob die Gesamtmasse in ihm vereinigt ist und als ob die Summe der äußeren Kräfte allein auf ihn wirken.

Bei ausgedehnten Körpern kann also die Gesamtbewegung aller N Teilchen als Bewegung eines Massepunktes, die des Schwerpunktes, ersetzt werden. Somit haben die Axiome bei Begutachtung von makroskopischen Phänomenen ihren vollen Geltungsbereich.

In der Newtonschen Mechanik sind Bewegungen also über folgende Bewegungsgleichung gegeben:

$$m_i \cdot \ddot{\vec{r}}_i = \vec{F}_i + \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij} \quad (3.19)$$

- F_i : auf Teilchen i wirkende äußere Kraft
- F_{ij} : die von Teilchen j auf Teilchen i ausgeübte innere Kraft

Bei Betrachtung von makroskopischen Systemen ist eine Lösung obiger Gleichung oft nur schwer bzw. gar nicht auffindbar. Aus diesem Grund werden solche Probleme mithilfe des Lagrange-Formalismus gelöst, der statt Kräften die Energien in einem System betrachtet. Dies stellt aber ein neues Konzept zur Untersuchung von Wechselwirkung dar und wird hier somit nicht weiter behandelt.

3.2.3. Anmerkungen aus der Fachdidaktik

In der Wissenschaft gleichen wir alle nur den Kindern, die am Rande des Wissens hier und da einen Kiesel aufheben, während sich der weite Ozean des Unbekannten vor unseren Augen erstreckt.

(Newton)

Vorab sei erwähnt, dass die fachdidaktische Sicht auf das Konzept der Kraft die Schwierigkeiten reflektieren muss, die aus der Tatsache entstehen, dass die Kraft ein im Alltag vielfältig genutzter Begriff ist, der in unterschiedlichen Kontexten ganz differierende Bedeutungen aufweist. Das bedingt bereits größere Probleme bei der Einführung des Begriffs in der Physik, von dem konzeptualen Gedanken ganz abgesehen. Oft wird er mit der Floskel „ich habe keine Kraft mehr“ oder Ähnlichem in Beziehung gesetzt²³. Schülerinnen und Schüler betrachten Kräfte also nicht als Wechselwirkungsgrößen, sondern als körperlich verdinglichte Eigenschaften im Sinne einer Fähigkeit, etwas zu bewirken. Hier findet also eine Verwechslung mit dem Begriff der Energie statt. Treffend beschreibt dies der Physikdidaktiker *T. Wilhelm*: „'Kraft' ist dabei nur ein sprachliches Zeichen für den Clusterbegriff Energie/Kraft/Schwung/Wucht/Stärke/Gewalt usw.: es sind verschiedene Namen, die den gleichen Clusterbegriff beschreiben. [...] Es ist nicht so, dass der Schüler das eine Wort „Kraft“ für verschiedene Begriffe verwendet, die er inhaltlich trennen kann, oder dass er nur die Begriffe wie Vokabeln verwechselt; vielmehr sieht er keinen Unterschied zwischen diesen Begriffen“ [WIL05, 17 f.]. Die hier dargelegten begrifflichen Probleme der Schülerinnen und Schüler sind bei Betrachtung der Historie (vgl. 3.2.1) auch nicht weiter verwunderlich. Bspw. nutzten Descartes und Leibniz zwei verschiedene Kraftdefinitionen, die später von Newton sogar noch um eine Dritte - unsere heutige Definition - ergänzt wurden. Die begriffliche Aufstellung und die inhaltliche Abgrenzung der drei Grundgrößen Impuls (mv), Bewegungsenergie (mv^2) und Kraft (ma) hat ein gutes Jahrhundert gedauert, sodass auch heute unsere Schülerinnen und Schülern eine gewisse Zeit und eine häufige Wiederholung der Begriffe im Unterricht eingeräumt werden muss.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vor allem mit der Sekundarstufe II, d.h. obig beschriebene Fehlvorstellungen der Schülerinnen und Schülern müssten eigentlich schon in der Sekundarstufe I thematisiert worden sein. Jedoch gilt grundsätzlich,

²³Die Nutzung des Kraftbegriffes im Sinne einer physischen Ausdauer ist übrigens die häufigste Art eines anschaulichen Konzeptes in diesem Zusammenhang. Die Liste von alltäglichen Kraftbegriffen umfasst bspw. aber auch „die Willenskraft, die Geisteskraft, kraft seines Amtes etc.“. Letztere können die Schülerinnen und Schüler aber meist selbst aus logischen Gründen „ausmustern“.

dass diese Schülervorstellungen sehr beständig sind und sie in jedem Fall nochmals in der Oberstufe thematisiert werden müssen (vgl. [KIR09, 615 f.]). Explizit findet man den Umgang mit diesen Fehlvorstellungen aber nicht mehr in den Lehrplaninhalten der Oberstufe aufgelistet - er muss aber stets beachtet werden.

Die fachdidaktische Reflektion des Konzeptes sollen aus drei Blickwinkeln erfolgen. Diese sind das Vorgehen in unterschiedlichen Schulbüchern, die Umsetzungsvorschläge aus externen Unterrichtsmaterialien für Lehrerinnen und Lehrer und Vorschläge seitens der Hochschulen in Form von Veröffentlichungen.

Schulbücher

Es werden hier die unter 6.3.1 vorgestellten Bücher betrachtet.

Gemeinsam haben alle Bücher, dass sie zum einen erst die Trägheit behandeln und sie zum anderen bei der Verdeutlichung des Kraftkonzeptes immer auf Experimente verweisen. Die vorgestellten Experimente werden von Buch zu Buch in unterschiedlicher Alltagsnähe ausgewählt. Insgesamt fällt aber auf, dass die Thematik - auf Schulniveau - sehr fachnah behandelt wird, das heißt, dass schnell klare Definitionen und Sätze dargestellt und erklärt werden. Auf eigen-erkenntnisgestützte Annäherung wie im SI-Bereich wird fast völlig verzichtet²⁴.

Unterschiede in der Herangehensweise lassen sich aber daran erkennen, ob der Impuls vor der Kraft oder danach behandelt wird. So wird die Grundgleichung der Mechanik bei einer vorangegangenen Einführung des Impulses aus diesem abgeleitet. Dieses Vorgehen ist zwar mathematisch präzise, neigt aber, durch Betrachtung von Spezialfällen, auch zur Schaffung von unnötigen Problemen bei den Lernenden²⁵. Des Weiteren lassen sich große Unterschiede bei der Verwendung von geschichtlichen Kontexten finden, was aber wahrscheinlich mit der Verwendung des Impulsbegriffes korreliert, da die Kraft historisch über den Impuls definiert wurde. Die Gemeinsamkeiten, sowie die Unterschiede sind nun knapp in folgender Tabelle zusammengefasst, eine wesentlich ausführlichere Betrachtung der Zusammenhänge wird bei der Schulbuchanalyse durchgeführt (vgl. 6).

Buch	Impuls- behandlung	Historische Einblicke	Schülerorientierte Versuche/Beispiele
Metzler	Vorher	Viele	Wenige
Cornelsen	Nachher	Viele	Wenige
Duden	Nachher	Wenige	Viele
Impulse	Nachher	Nur in einem Exkurs	Wenige
Kuhn	Nachher	Wenige	Viele

Tabelle 3.1.: Behandlung des Kraftkonzeptes aus fachdidaktischer Sicht in Büchern

²⁴In den jeweiligen Begleitheften der Bücher wird aber auch immer darauf verwiesen, dass die Grundlagen aus der Mittelstufe von den Schülerinnen und Schülern zu beherrschen sind.

²⁵Diese entstehen vor allem aus dem noch nicht gefestigten oder vorhandenem Ableitungsbegriff.

Der Impuls wird in fast allen Büchern erst in den auf die Kraft folgenden Kapiteln eingeführt, weil dort der Konzeptgedanke der Erhaltung eine wichtige Rolle spielt. So geht die Behandlung des Impulses fast immer mit der Impuls- und Energieerhaltung einher.

Exemplarische Zusatz- und Begleitmaterialien

Eine Begutachtung der Begleitmaterialien der Schulbücher könnte sehr interessant sein, da hier den Lehrerinnen und Lehrern fachdidaktische Hinweise gegeben werden, die explizite und schülernahe Empfehlungen für den Alltagsunterricht darstellen sollten. Neben diesen gibt es auch Zusatzmaterialien wie z.B. die RAAbits-Ordner. Diese sind in der Hinsicht interessant, dass sie sich nicht direkt auf ein Schulbuch beziehen und somit oft andere Ansätze verfolgen als die klassischen Bücher.

Entgegen eben genannter Vermutung sind die meisten Begleithefter mehr oder minder ein Arbeitsblatt/Folien-Pool mit sehr kleinen didaktischen Hinweisen zu Beginn der Kapitel. Diese Hinweise sind zumeist auch nur eine Erläuterung des thematischen Gangs und helfen dem Lehrer oder der Lehrerin eher wenig ein vertieftes Verständnis bei den Schülerinnen und Schülern aufzubauen.

Etwas positivere Beispiele gibt es aber auch. So wird im Werk „Impulse“ stark auf auftretende Wirkungsgefüge zwischen Bewegungsanalyse und Kraft verwiesen. Dies wird zusätzlich mit einem Modellbildungsprogramm unterstützt und sorgt bei richtiger Einsetzung insgesamt zu einer Verankerung des Kraftbegriffs als Wechselwirkungskonzept.

Die begutachteten Zusatzmaterialien - gerade von RAAbits [RAB11, II/A 14]- legen sehr viel Wert auf den Alltagsbezug. Neben diesen werden viele kleine, einfache Freihandversuche vorgeschlagen, die den Zusammenhang zwischen Kraft, Masse, Geschwindigkeit, Impuls und Beschleunigung für die Schülerinnen und Schüler erfahrbar machen. Wie in den meisten Fällen soll die Bearbeitung an Stationen erfolgen. Eine Übersetzung der am Phänomenen erworbenen Einsichten zu mathematischen Modellen soll eigenständig erfolgen und den Lernerfolg sichern.

Ein anderes Werk [LAD02, 3/2 und 3/5] geht ähnlich vor (Impuls wird hier später eingeführt), verweist für die Lehrkraft aber zusätzlich auf wichtige historische Begebenheiten. Die dargestellten geschichtlichen Bezüge sind zudem fachdidaktisch kommentiert und machen die Leserin bzw. den Leser darauf aufmerksam, welche kognitiven Fähigkeiten die Lernenden für welche historische Tiefe benötigen.

Insgesamt gehen die Zusatzmaterialien, wie erwartet, sehr modern - schülernah - vor. Viele kleine Schülerexperimente, die etwas angeleitet, aber zum Großteil eigenständig bearbeitet und gedeutet werden sollen, schaffen einen anwendungsbezogenen Deutungsraum für die Theorie. Aber der eigentliche Wechselwirkungsgedanke im Rahmen des Kraftkonzeptes wird dabei nicht im direktem Sinne unterstützt.

Sichtweisen der universitären Fachdidaktik

In der Fachdidaktik wird Wert auf eine klare Sprache gelegt, die in ihren Formulierungen den Wechselwirkungscharakter des Kraftkonzeptes zum Ausdruck bringt. „Interessiert man sich nur für die Wirkung der wechselseitigen Beeinflussung auf einen Körper K , so sagt man auch, auf K wirke (bzw. K erfahre) die Kraft F “ [BAC79, 1]. Hier ist das Wechselwirkungsprinzip eher ein konstitutiver Bestandteil des Kraftbegriffs (vgl. [BAC79, 1]). Hingegen kann die Formulierung *Kräfte sind Ursache von Verformung und Bewegungsänderung* dies nicht unterstützen.

Kontrovers sind die Meinungen zur letztendlichen Einführung des Kraftkonzeptes. Wenig sinnvoll erscheint der statische Einstieg in das Thema, da hier von einem Grenzfall der Dynamik - der Statik - Rückschlüsse auf den allgemeinen Fall gezogen werden müssten. Dies wird aber unweigerlich Probleme hervorrufen, sowohl in Hinsicht auf den Wechselwirkungscharakter der Kraft als auch in Bezug auf die Bewegungsänderungen durch Krafteinwirkung, allerdings ist die statische Einführung der Kraft über Verformungen (Federkraftmesser) wohl die einzige Möglichkeit, den Kraftbegriff in den niedrigeren Klassenstufen einzuführen.

Bei einer dynamischen Einführung kann das Hauptaugenmerk auf das Trägheitsprinzip oder auf den Einstieg mittels des Impulses gelegt werden. Aber auch hier gilt es Abwägungen zu treffen. Die jeweiligen Nachteile seien hier anhand von Fehlvorstellungen der Schülerinnen und Schüler, die durch die eine oder andere Herangehensweise eventuell begünstigt werden können, (vgl. [KRA05, 4. ff]) kurz dargestellt. Die entsprechenden Äußerungen der Schülerinnen und Schüler wurden im Unterricht des Autors erhoben und klassifiziert.

Nachteile bei der Einführung über die **Trägheit**: Folgende Fehlvorstellungen können unterstützt werden:

- Körper besitzen Kräfte als eine ihnen innewohnende Eigenschaft.
- Trägheit wird häufig als *Trägheitsgegenkraft* gedacht, die ein Körper z.B. beim Bremsen entgegenbringt.
- Eine größere Masse bedingt automatisch eine größere Kraft.
- Die Kraft geht allein von einem Körper aus. Sie wird nicht als Wechselwirkung zwischen mindestens zwei Körpern verstanden.

Gerade auf die letztgenannte Fehlvorstellung muss im Rahmen der Behandlung des dritten Newtonschen Axioms besonders geachtet werden.

Nachteile über die Einführung mittels des **Impulses**: Folgende Fehlvorstellungen können unterstützt werden:

- Die Kraft ist proportional zur Geschwindigkeit. Immer, wenn eine Bewegung vorliegt, muss auch eine Kraft wirken.
- Im Ruhezustand wirken keine Kräfte.

- Die Begriffe *Kraft* und *Energie* werden von Schülern häufig synonym gebraucht.

Zudem muss hierbei zur Aufhebung mancher Fehlvorstellungen auch die Impulserhaltung besprochen werden. Dadurch wird der vorbereitende Unterrichtsgang hin zum Kraftbegriff deutlich länger.

Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch den relativ schwer zu verstehenden Begriff der lokalen Änderung, der unweigerlich mit diesem Ansatz einhergeht (vgl. Analysis im Mathematikunterricht). Die folgende Mathematisierbarkeit zu $F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$ erschwert sich, da der analytische Gedanke des Differentials wahrscheinlich in der Physik noch nicht zur Verfügung steht. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass der Impuls sehr elegant und schülerfreundlich mithilfe des Kraftstoßes eingeführt werden kann und somit die zeitliche Wirkung einer Kraft explizit unter Bezugnahme auf eine weitere physikalische Größe erörtert werden kann. Dadurch kann ggf. der Begriff der „zeitlichen Änderung“ nahegelegt und damit der Ableitungsbegriff für den Mathematikunterricht anschaulich vorbereitet werden.

3.3. Das Konzept des Feldes

Ich weiß nicht, für was das
einmal gut sein wird. Aber ich
weiß, dass Sie Steuern darauf
nehmen werden.

(Faraday)

Das Feldkonzept bildet den Übergang von der Fernwirkungsvorstellung Newtons hin zur Nahwirkungsvorstellung, deren wesentlicher Protagonist Faraday ist. Dieser Konzeptwechsel stellt eine bedeutende Entwicklung in der Physik dar, denn der Unterschied zwischen einer instantanen Wirkung und einer Wirkung, die einer Zeitspanne für ihre Ausbreitung bedarf, ist gewaltig - führt er doch zur Vorhersage experimentell zugänglicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

3.3.1. Historische Entwicklung

Die Entwicklung des Feldbegriffes ist eng verbunden mit der Untersuchung von elektrischen und magnetischen Phänomenen, da gerade diese über Entfernungen wirken und schwierig mechanisch über direkte Berührung (Kontaktkräfte) mittels Stoßen oder Ziehen zu erklären sind.

Thales von Milet

Schon *Thales von Milet* (ca. 624 - 546 v.C.) (vgl. [NAC90, 135 ff.]) bemerkte elektrische Kräfte bei geriebenem Bernstein, der Federn anziehen vermochte²⁶.

William Gilbert

Gute 2000 Jahre später interessierte sich auch der englische Physiker *William Gilbert* (1540-1603) für die Wirkung von Bernstein. Er war der Erste, der eine systematische Analyse von elektrischen und magnetischen Kräften unternahm. Er war der Meinung, dass den Bernstein ein unsichtbares „Effluvium“²⁷ umgeben würde. Dieses flösse beim Reiben des Bernsteins aus und zwingt somit beispielsweise Papierschnipsel, sich in Richtung des Steines zu bewegen. Zudem führte er schon den Begriff der Kraftlinien, später Feldlinien, ein (vgl. [NAC90, 9]).

²⁶Bernstein heißt im Altgriechischen <ēlektron> [GEM06]

²⁷lateinisch für <Ausfluß> [STO94]

René Descartes

René Descartes sah die elektrische Kraft in Wirbeln des „Effluvium“, so schrieb er:

„In der Umgebung eines elektrifizierten Körpers wird ein Wirbel aus sich ausbreitendem feinen Material im Zustand der Bewegung erzeugt, der leichte Körper, die in seinem Aktivitätsbereich liegen, zu diesem elektrifizierten Körper zwingt. Die Existenz des Wirbels ist mehr als eine bloße Vermutung, wenn nämlich ein elektrifizierter Körper direkt vor das Gesicht gebracht wird, hat man die Empfindung, als ob man von einem Spinnennetz berührt wird.“[NAC90, 10]

Einen genaueren Einblick in die Wirbeltheorie lässt sich in Kapitel 4 finden.

Charles du Fay

Der französische Naturforscher *Charles du Fay* (1698 - 1739) war, durch Experimente zur heute genannten Reibungselektrizität, sogar der Meinung, dass es zwei unterschiedliche unsichtbare Fluide gebe, die die Elektrizität hervorrufen. Eines war für die Anziehung, das Andere für die Abstoßung verantwortlich. Wegen der unterschiedlich benutzten Materialien, die er in seinen *Quatrième mémoire sur l'électricité* auf einer Liste klassifizierte, nannte er das eine „gläsern“ (Material: Glas) und das andere „harzig“ (Material: Junger Bernstein). Beide Elektrizitäten konnten durch Reiben getrennt werden und würden sich bei einer Vereinigung wieder neutralisieren.

Benjamin Franklin

Dem widersprach der nordamerikanische Naturwissenschaftler *Benjamin Franklin* (1706 - 1790), der entgegen du Fay's Interpretation nur ein Fluidum forderte. Er ging davon aus, dass jeder Körper einen stabilen Vorrat an Elektrizität besitzt. Durch Reiben kann man diese Elektrizität auf einen anderen Körper übertragen, sodass ein Zuviel positiver und ein Zuwenig negativer Elektrizität entspricht. Hierin steckt schon der uns heute wohlbekannte Erhaltungsgedanke, denn Franklin forderte mit seiner Darstellung nichts anderes, als dass man elektrische Ladung weder erzeugen, noch vernichten kann (vgl. [NAC90, 136]).

Durch die Einführung des „Effluvium“-Gedankens durch Gilbert und die Weiterentwicklung bis hin zu dem Fluidum von Franklin sieht man sehr gut die Geringschätzung mancher Personen gegenüber der Fernwirkungstheorie. Da aber die Gravitationstheorie von Newton mit ihrer Fernwirkungsvorstellung so gut funktionierte, gab es für viele andere Forscher keinen Grund, an dieser zu zweifeln.

Georg Christoph Lichtenberg

Der deutsche Mathematiker und Physiker Georg Christoph Lichtenberg (1742 - 1799) entdeckte 1777 die nach ihm benannten Lichtenbergschen Figuren. Diese entstehen bei Funksprüngen durch Dielektrika, die mit Staub bedeckt sind. Hierbei konnte er zwei unterschiedliche Arten von Figuren klassifizieren, die erste entsteht beim Übergang von positiver, die andere beim Übergang von negativer Elektrizität. Um die Elektrizitätslehre näher an die Mathematik zu bringen, benutzte er die mathematische Zeichengebung von (+) und (-), die bis heute in der Physik gebräuchlich ist (vgl. [HER87, 206]).

Michael Faraday

Der eigentliche Werdegang des Feldbegriffs wurde 1831 durch die tiefergehende Untersuchung der Elektrizität von *Michael Faraday* (1791 - 1867) (vgl. [KUH01b, 326 ff.]) begonnen. Er war der Erste, der sich für den Vermittlungsprozess bei der Übertragung von Kräften genauer interessierte. Die Physiker vor ihm haben die von Newton postulierte Fernwirkungstheorie für ihre elektrodynamischen Theorien übernommen und haben sich somit nicht mit dem eigentlichen Übertragungsmechanismus beschäftigt. Wegbereiter für Faradays Idee waren unter anderem *André-Marie Ampère* (1775 - 1836) und *Franz Ernst Neumann* (1788 - 1855). So sprach Ampère von einer Kraftwirkung zwischen kleinen Stromelementen und Neumann baute dies aus, indem er die ausgeübte Kraft zwischen zwei Elementen mit Hilfe von Potentialfunktionen beschrieb. Diese hatten die Gestalt $n \cdot i$, wobei i für die Stromstärke und n für die Anzahl der Kraftlinien um den Leiter steht.

Die Physiker vor Faraday hatten das Problem, dass sie versuchten, die Wirkung mittels eines mechanischen Äthers oder eines Kraftfeldes zu erklären. Das erste war aber kein reales Feld - zudem mit Widersprüchen gespickt - und das zweite besaß kein reales Medium.

Angeregt durch *Hans Christian Oersted's* (1777 - 1851) philosophische Gedanken über die Einheit aller Naturkräfte - vor allem der elektrischen und magnetischen - kam Faraday dem Feldbegriff, mittels Versuchen über die Erregung elektrischer Ströme durch Magnetismus in einer Leiterschleife, auf die Spur. Neun Jahre arbeitete er daran und erkannte, dass die induzierte Spannung von der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes (Fluss Φ) abhängt (vgl. [KUZ70, 225]). In der heutigen Formelsprache:

$$U_{ind} = -\dot{\Phi} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B \cdot A)}{dt} \quad (3.20)$$

mit:

- U_{ind} : angeregte Spannung zwischen den Enden der Leiterschleife
- $\frac{d\Phi}{dt}$: zeitliche Änderung des magnetischen Flusses Φ
- B : magnetische Flussdichte
- A : die von der Drahtschleife umfasste Fläche

Daraus leitete er ab, dass der Raum als physikalisches Medium, der den Magneten umgibt, eine Veränderung erfährt, sich aber zurückwandelt, wenn der Magnet verschwindet. Diese Veränderung soll eine elektromotorische Kraft hervorrufen, die Faraday als elektrotonischen Zustand beschrieb. Als Ergebnis seiner Arbeiten baute er den Begriff der Kraftlinien weiter aus. Er stellte sich diese Linien als gespannte elastische Schläuche vor, die eine *Intensität* und *Quantität* aufweisen. Sie haben einen Anfang in Ladungen und enden auch in Ladungen. Er beschrieb die von ihm entdeckte Induktion so:

„In das Gesetz, daß die Induktion elektrischer Ströme in Körpern, die sich relativ zu Magneten bewegen, geht die Zahl der vom Metall geschnittenen magnetischen Linien ein“ [FARAD].

Dies stellte eine erste Feldvorstellung dar. Das heißt, Faraday erkannte, dass nicht der Körper an sich eine Wirkung auf einen anderen Körper ausübt, sondern vielmehr das Feld (die Kraftlinien), welches ihn umgibt. Im Umkehrschluss bedeutet dies aber, dass „mit dem Vorhandensein des Körpers die entsprechende Kraft immer schon in allen Abständen zugleich²⁸ vorhanden ist - darin besteht gerade das Vorhandensein des Körpers, auch wenn kein zweiter Körper dort ist“ [GRE86, 91]. Das heißt, es ist eine Kraft vorhanden, obwohl kein zweiter Körper zugegen ist, so dass diese Kraft noch nicht ihr Potential entfalten kann, Einfluss auf diesen Körper zu nehmen. Prinzipiell wurde zwar letztendlich das Problem der Fernwirkungsvorstellung behoben, aber ein anderes Problem stand nun an seiner Stelle.

Durch das fehlende Vorhandensein eines zweiten Körpers findet man also keine bewegende Kraft. So musste man sich zu einer neuen Definition durchringen - der der Feldstärke. Diese entspricht der Beschleunigung bei Newton. Hier lässt sich auch eine direkte Überschneidung zwischen zwei Wechselwirkungskonzepten finden. Die grundlegende physikalische Größe des Feldkonzeptes - die Feldstärke - wird unmittelbar mithilfe des Kraftbegriffs definiert. So ist die Feldstärke nichts anderes als der Quotient aus wirkender Kraft auf einen Probekörper und einer dem Probekörper innewohnenden wirksamen Eigenschaft²⁹.

Allgemein:

$$\text{Feldstärke} = \frac{\vec{F}}{\text{Eigenschaft}} \quad (3.21)$$

Die wirksame Eigenschaft des Probekörpers wird als Ladung bezeichnet und ist im elektischen Feld die elektrische Ladung bzw. im Gravitationsfeld die Gravitationsladung, besser bekannt als Masse. Des Weiteren verwendet man im Gravitationsfeld

²⁸Die Wortwahl „zugleich“ ist hier etwas irreführend, da der Feldaufbau in seiner Ausbreitung natürlich der Lichtgeschwindigkeit unterliegt.

²⁹Mit dem Begriff „Probe“ soll ausgedrückt werden, dass zur genauen Messung der Feldstärke ein verschwindend kleiner Körper verwendet wird, um das auszumessende Feld durch den Probekörper nicht zu verändern und damit das Ergebnis zu verfälschen.

den Begriff Feldstärke eher weniger, sondern nennt es anschaulicher Erdbeschleunigung bzw. Gravitationsbeschleunigung.

Im elektrischen Feld:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q} \quad \text{mit} \quad Q \rightarrow 0 \quad (3.22)$$

Im Schwerefeld:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{mit} \quad m \rightarrow 0 \quad (3.23)$$

Für Faraday war der Begriff der Kraft derselbe wie der der Kraftlinie. Für ihn war es nicht nur ein Denkwerkzeug, vielmehr war es etwas Substanzielles. Die Kraftlinie war somit eine völlig reale physikalische Erscheinung, was dazu führte, dass dem Kraftfeld Materie gleichkommt, also nicht als Ergebnis einer mechanischen Verschiebung, sondern als materielle Substanz.

Dieser Gedankengang der Untrennbarkeit von Kraftfeld und Materie war seinerzeit revolutionär und „verkörpert einen radikalen Übergang vom mechanischen Weltbild zu einer umfassenderen und genaueren Vorstellung über die Natur“ [KUZ70, 229]. Maxwell beschrieb die Anschauung Faraday's in seinem „Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus“ folgendermaßen:

„So sah [...] Faraday in seinem geistigen Auge überall da Kraftlinien den Raum durchdringen, wo die Mathematiker in der Ferne wirkende Kraftzentren supponierten, und wo diese nichts als die Abstände zwischen den Kraftzentren bemerkten, war für Jenen ein Zwischenmedium vorhanden. Faraday suchte die Ursache der Erscheinungen in Aktionen, die im Zwischenmedium vor sich gehen sollten, die Mathematiker dagegen gaben sich damit zufrieden, daß sie sie in einer Fernwirkung auf die elektrischen Fluida entdeckten.“ [MAX83, 7]

Faradays Ideen gingen noch ein Stück weiter, so war er davon überzeugt, dass man die Kraftlinien, als elastische Schläuche vorgestellt, in Schwingung versetzen könnte und sich diese entlang der Kraftlinien ausbreiten würden.

Diese Schwingungen und die noch nicht geklärte endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit konnten erst von *James Clerk Maxwell* (1831-1879) (vgl. [KUH01b, 332 ff.]) gezeigt werden, indem er Faradays Ideen in mathematische Formeln übersetzte. Zur Aufstellung dieser Formeln stellte er sich die Kraftlinien als Strömungslinien einer hypothetischen inkompressiblen Flüssigkeit vor.

„Wenn wir diese Kurven nicht als bloße Linien, sondern als Röhren von veränderlichem Querschnitt betrachten, in denen eine unzusammendrückbare Flüssigkeit fließt.“ [MAX95, 8]

Und weiter zur Vorstellbarkeit dieser Flüssigkeit:

„Der Substanz, um welche es sich hier handelt, soll keine von den Eigenschaften der gewöhnlichen Flüssigkeiten zugeschrieben werden, mit Ausnahme der Fähigkeit der Bewegung und des Widerstandes gegen Zusammendrückung. Diese Substanz ist nicht einmal eine hypothetische Flüssigkeit in dem Sinne, wie solche von älteren Theorien zur Erklärung der Erscheinungen angenommen wurden. Sie ist lediglich ein Inbegriff imaginärer Eigenschaften, welcher den Zweck hat, gewisse Theoreme der reinen Mathematik in einer anschaulicheren und auf physikalische Probleme leicht anwendbaren Form darzustellen, als es durch Anwendung rein algebraischer Symbole geschehen kann.“[MAX95, 9]

Mit dieser Vorstellung konnte er sich die verwendeten mathematischen Operatoren viel besser vergegenwärtigen und hatte die Aussicht, seine Theorie mit Hilfe der Potentialtheorie zu beschreiben:

- *Rotation: $\text{rot} \Leftrightarrow \nabla \times$*
Es handelt sich um Wirbel, in Analogie zum abfließenden Wasser im Abfluss.
- *Divergenz: $\text{div} \Leftrightarrow \nabla \cdot$*
Ein Maß für das Auseinanderlaufen der Strömungslinien, in Analogie zur Ergiebigkeit der Quellen.
- *Gradient: $\text{grad} \Leftrightarrow \nabla$*
Änderung einer Größe in unterschiedlichen Fortschrittingsrichtungen, in Analogie zum Flüssigkeitsdruck, der ein Maß für die Kraft darstellt.
- *Proportionalitätskonstanten:*
Diese können als Strömungswiderstand aufgefasst werden.

Hiermit ergeben sich die berühmten Maxwell-Gleichungen (vgl. [DEM06b], 136):

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.24)$$

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.25)$$

$$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.26)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (3.27)$$

Wenn man nun die ersten beiden Gleichungen ineinander einsetzt - beziehungsweise sie koppelt - und einige mathematische Umformungen vornimmt, erhält man folgende Wellengleichungen:

$$\Delta \mathbf{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{B} \quad (3.28)$$

Oder analog:

$$\Delta \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} \quad (3.29)$$

Zum Vergleich kann die schon bekannte Wellengleichung aus der Mechanik betrachtet werden:

$$\Delta \psi = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \psi \quad (3.30)$$

mit v als Ausbreitungsgeschwindigkeit. Und tatsächlich fand Maxwell heraus, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen im Vakuum folgende Gestalt hat:

$$v = c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (3.31)$$

Faradays Idee einer Schwingung von Kraftlinien fand nun Bestätigung in den Welleneigenschaften des Elektromagnetismus und die experimentell nachweisbare endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit half bei der Vorstellung einer Nahwirkung.

Hier muss aber gesagt werden, dass Maxwell zwar die Mathematisierung hervorragend gelang, er aber erkenntnistheoretisch gegenüber Faraday zurück lag [HER87, 106].

Das heutige Feldkonzept geht fest davon aus, dass ein Körper mit seinen charakteristischen Eigenschaften (Ladung oder Masse) ein Feld um sich erzeugt. Dieses Feld verursacht eine Änderung im Raum um diesen Körper herum. Wenn nun in dieses Einflussgebiet ein zweiter Körper mit denselben charakteristischen Eigenschaften gerät, erfährt er eine Wechselwirkung nicht direkt durch den anderen Körper, sondern vielmehr durch das ihn umgebende Feld (vgl. [SCH07, 6]). Außerdem geschieht diese Wechselwirkung nicht instantan, sondern ist abhängig von der Geschwindigkeit des Lichts. Ein weiterer, sehr wichtiger Aspekt des Feldkonzeptes ist mit der mathematischen Interpretation der Gleichungen gelungen. Die Maxwell-Gleichungen 3.24 und 3.25 zeigen die innere Verbundenheit von elektrischem und magnetischem Feld, wie es schon Hans Christian Oersted in seiner Vorstellung über die Naturkräfte 1821 prophezeite. Dies stellt die erste Vereinheitlichung zwischen Wechselwirkungen dar und wurde erst mittels des Feldkonzeptes möglich. Eine weitere Zusammenfassung von Kräften ermöglichte das Wechselwirkungskonzept der Austauschteilchen.

3.3.2. Fachwissenschaftliche Sicht

...war es ein Gott, der diese
Zeilen schrieb?

(Boltzmann über Maxwell)

Der Begriff des Feldes wird aus fachwissenschaftlicher Sicht zunächst über elektrostatische Phänomene eingeführt.

Um die Wechselwirkung zwischen zwei geladenen Körpern zu verstehen, wird auf experimentelle Erfahrungen zurückgegriffen (vgl. [NOL07, 55]). Die unausweichlichen Influenzphänomene führen allerdings dazu, dass die Realisierung von Experimenten extrem aufwendig und im Schulunterricht schlichtweg unmöglich ist.

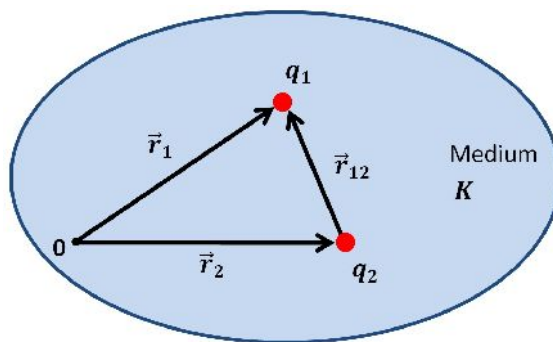


Abbildung 3.5.: Coulomb-Gesetz

Die Ladungen q_1 und q_2 haben den Abstand: $r_{12} = |\vec{r}_{12}| = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$. Damit gilt für die Kraftwirkung zwischen ihnen das Coulombsche Gesetz:

$$\vec{F}_{12} = k \cdot q_1 \cdot q_2 \cdot \frac{\vec{r}_1 - \vec{r}_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3} = -\vec{F}_{21} \quad (3.32)$$

Experimentell ist dies eine falsifizierte Tatsache. Die Konstante k ist abhängig vom betrachteten Medium. Im SI-System hat sie den Wert $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ mit der Dielektrizitätskonstante des Vakuums $\epsilon_0 = 8,8543 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$.

Wenn mehrere Ladungen betrachtet werden, folgt die Berechnung der auf die Ladung q wirkenden Kraft über 3.18 zu:

$$\vec{F}(\vec{r}) = k \cdot q \cdot \sum_{i=1}^n q_i \cdot \frac{\vec{r} - \vec{r}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|^3} = q \cdot \vec{E}(\vec{r}) \quad (3.33)$$

$\vec{F}(\vec{r})$ ist ein allgemeines vektorielles Feld. Der Quotient $\frac{\vec{F}(\vec{r})}{q}$ wird definiert als das elektrische Feld $\vec{E}(\vec{r})$.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q} \quad (3.34)$$

$\vec{E}(\vec{r})$ wird auch als elektrische Feldstärke bezeichnet, zumeist sagt man aber einfach elektrisches Feld. Der Limes soll dafür sorgen, dass die Probeladung sehr klein ist und somit das Feld selbst nicht ändert. Die eigentliche Messgröße ist immer noch eine Kraft, trotz dessen ist die Einführung des Feld-Konzeptes sehr sinnvoll.

Durch das Feld-Konzept wird der durch 3.32 beschriebene Wechselwirkungsprozess in zwei Schritte zerlegt. Zunächst erzeugt eine Ladung ein den ganzen Raum ausfüllendes elektrisches Feld. Dieses existiert unabhängig von der Punktladung q , die dann im zweiten Schritt auf das bereits vorhandene Feld gemäß $\vec{F}(\vec{r}) = q \cdot \vec{E}(\vec{r})$ lokal reagiert (vgl. [NOL07, 57]). Die Reaktion bzw. die Bewegung einer Punktladung in einem elektrischen Feld wird nach *Faraday* mit Hilfe von Feldlinien qualitativ verdeutlicht (vgl. 3.3.1). Das elektrische Feld $\vec{E}(\vec{r})$ liegt somit tangential an diesen Feldlinien an.

Äquivalent zum elektrischen Feld $\vec{E}$, das durch die messbare Kraft $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ auf eine Probeladung definiert wird, kann ein Magnetfeld definiert werden. Bei Anwesenheit einer bewegten Punktladung in einem Magnetfeld kann eine Kraft auf diese Punktladung gemessen werden. Experimentell gilt hierfür $F \sim q$ sowie $F \perp \vec{v}_q$, wodurch die wirkende Kraft folgendermaßen geschrieben werden kann:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (3.35)$$

Hierdurch wird das magnetische Feld $\vec{B}(\vec{r})$ definiert. Es wird magnetische Induktion oder auch magnetische Flussdichte genannt. In direkter Analogie müsste es eigentlich als magnetische Feldstärke bezeichnet werden, aber aus der historischen Entwicklung hat sich dieser Begriff etabliert (vgl. [FLI08, 121]). Im allgemeinen Sprachgebrauch wird $\vec{B}$ aber entsprechend zu $\vec{E}$ als magnetisches Feld bezeichnet.

Zur mathematischen Beschreibung von Feldern muss man sich der Tensoranalysis bedienen. Dafür werden folgende Differenzialoperationen für skalare Φ bzw. vektorielle Felder $\vec{V}$ benötigt (Im Folgenden greife ich auf [FLI08, 3 ff.] zurück):

1. Der *Gradient* eines skalaren Feldes Φ wird mit $\text{grad}(\Phi)$ bezeichnet. Die Komponenten des Vektorfeldes $\text{grad}(\Phi)$ in Richtung eines beliebigen Einheitsvektors $\vec{n}$ werden durch

$$\vec{n} \cdot \text{grad}(\Phi(\vec{r})) = \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{\Phi(\vec{r} + \vec{n}\Delta r) - \Phi(\vec{r})}{\Delta r} \quad (3.36)$$

definiert. Die Größe $\vec{n} \cdot \text{grad}(\Phi)$ ist die Ableitung von Φ in dieser Richtung. Geometrische Bedeutung:

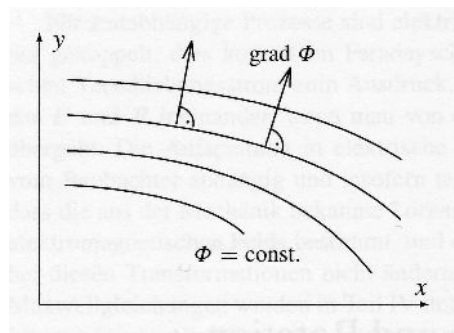


Abbildung 3.6.: Die Abbildung zeigt einige Höhenlinien $\Phi(x, y) = \text{const.}$. Im Dreidimensionalen werden diese Höhenlinien zu den Flächen $\Phi(\vec{r}) = \text{const.}$. Der Gradient von Φ steht senkrecht auf diesen Flächen. Er zeigt in die Richtung des stärksten Anstiegs von Φ ; sein Betrag ist proportional zu diesem Betrag [FLI08, 4].

- Die *Divergenz* eines Vektorfeldes $\vec{V}$ wird mit $\text{div}(\vec{V})$ bezeichnet. Das skalare Feld $\text{div}(\vec{V})$ wird durch

$$\text{div}(\vec{V}(\vec{r})) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \oint_{\Delta A} d\vec{A} \cdot \vec{V} \quad (3.37)$$

definiert. Hierfür wird ein Volumenelement ΔV bei $\vec{r}$ betrachtet; über seine Oberfläche ΔA wird das Skalarprodukt $\vec{V} \cdot d\vec{A}$ aufsummiert.

Geometrische Bedeutung:

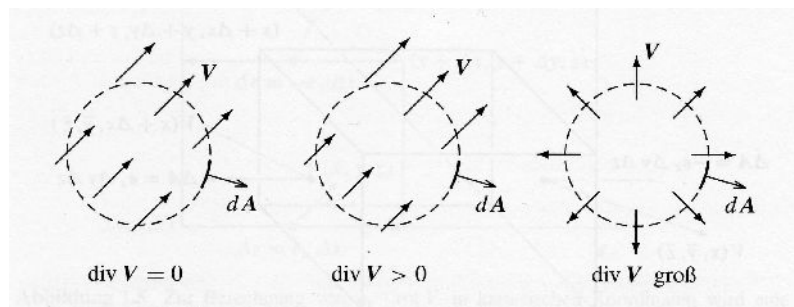


Abbildung 3.7.: Zur Berechnung der Divergenz wird ein kleines Volumen ΔV betrachtet (hier speziell kugelförmig). Wenn das Vektorfeld $\vec{V}$ im Bereich des Volumens konstant ist (links), verschwindet die Divergenz. Nimmt $\vec{V}$ dagegen in Feldrichtung zu (Mitte), so ist $\text{div}(\vec{V})$ positiv. Die Divergenz wird maximal, wenn das Vektorfeld durchweg parallel zum Flächenvektor $d\vec{A}$ der Oberfläche von ΔV ist (rechts). Das Vektorfeld hat hier eine Quelle; allgemein ist $\text{div}(\vec{V})$ ein Maß für die Quellstärke des Feldes [FLI08, 5].

- Die *Rotation* eines Vektorfeldes $\vec{V}$ wird mit $\text{rot}(\vec{V})$ bezeichnet. Die Komponenten des Vektorfeldes $\text{rot}(\vec{V})$ in Richtung eines beliebigen Einheitsvektors $\vec{n}$

wird durch

$$\operatorname{rot}(\vec{V}(\vec{r})) = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta A} \oint_{\Delta C} d\vec{r} \cdot \vec{V}, \quad \vec{n} = \frac{\Delta \vec{A}}{\Delta A} \quad (3.38)$$

definiert. Hierfür wird ein Flächenelement $\Delta \vec{A} \parallel \vec{n}$ bei $\vec{r}$ betrachtet; über seinen Rand ΔC wird das Skalarprodukt $\vec{V} \cdot d\vec{r}$ aufsummiert.

Geometrische Bedeutung:

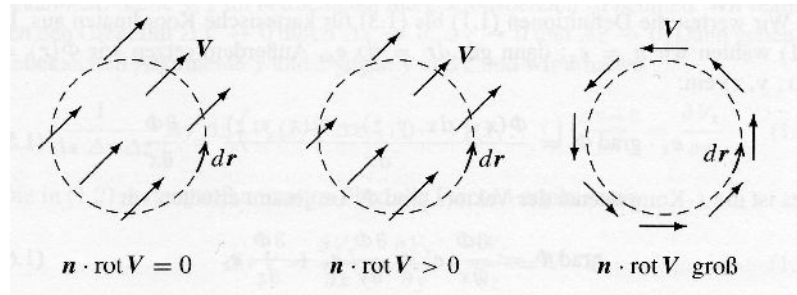


Abbildung 3.8.: Zur Berechnung der Rotation wird eine kleine Fläche ΔA (hier speziell kreisförmig) mit dem Normalenvektor $\vec{n}$ (senkrecht zur Bildebene) betrachtet. Wenn das Vektorfeld $\vec{V}$ im Bereich der Fläche konstant ist (links), verschwindet die Rotation. Nimmt $\vec{V}$ dagegen quer zur Feldrichtung zu (Mitte), so ist $\vec{n} \cdot \operatorname{rot} \vec{V}$ ungleich null. Die Rotation wird maximal, wenn das Vektorfeld durchweg parallel zum Wegelement $d\vec{r}$ des Randes von ΔA ist (rechts). Das Vektorfeld hat hier einen Wirbel; allgemein ist $|\operatorname{rot} \vec{V}|$ ein Maß für die Wirbelstärke des Feldes. [FLI08, 5].

Hiermit können nun die Feldgleichungen der Elektrostatik sowie der Magnetostatik formuliert werden:

Elektrostatik	Magnetostatik
$\operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}) = 4\pi \varrho(\vec{r})$	$\operatorname{rot} \vec{B}(\vec{r}) = 4\pi \frac{\vec{j}(\vec{r})}{c}$
$\operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}) = 0$	$\operatorname{div} \vec{B}(\vec{r}) = 0$

Tabelle 3.2.: Statische Maxwellgleichungen im cgs-System

Hiermit können aber nur statische Felder beschrieben werden. Bei Betrachtung von 3.33 und 3.35 sieht man schon Zusammenhänge zwischen elektrischen und magnetischen Feldern. Diese Verbindungen werden bei dynamischen Vorgängen sichtbar.

Einerseits ist dies die durch Faraday experimentell entdeckte Induktion und andererseits der durch Maxwell über die Kontinuitätsgleichung theoretisch bestimmte Verschiebungsstrom. So ergeben sich die verallgemeinerten zeitabhängigen Feldgleichungen zu:

$\operatorname{div} \vec{E}(\vec{r}, t) = 4\pi \varrho(\vec{r}, t)$	$\operatorname{rot} \vec{B}(\vec{r}) - \underbrace{\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}(\vec{r}, t)}{\partial t}}_{\text{Verschiebungsstrom}} = 4\pi \frac{\vec{j}(\vec{r}, t)}{c}$
$\operatorname{rot} \vec{E}(\vec{r}, t) + \underbrace{\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t}}_{\text{Induktion}} = 0$	$\operatorname{div} \vec{B}(\vec{r}, t) = 0$

Tabelle 3.3.: Dynamische Maxwellgleichungen im cgs-System

Auch die Gravitation kann mit diesem Feldkonzept dargestellt werden. Ähnlich zum elektrischen Feld einer Punktladung erzeugt ein Massepunkt m_1 ein Gravitationsfeld um sich herum. Kommt ein anderer Massepunkt m_2 nun in dieses Feld, erfährt er eine Kraftwirkung in Richtung von m_1 . Anders als beim elektrischen Feld gibt es nur eine Art von Ladung - die Masse - und die Wechselwirkung ist immer anziehender Natur. Getreu zu 3.33 ergibt sich die wirkende Kraft zu:

$$\vec{F}(\vec{r}) = m \cdot \vec{g}(\vec{r}) \quad (3.39)$$

Den Quotienten $\frac{\vec{F}(\vec{r})}{m}$ kann man als das Gravitationsfeld definieren:

$$\vec{g}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{m} \quad (3.40)$$

Die zugehörige Feldgleichung ähnelt somit auch der des elektrischen Feldes. Die Ladungsdichte wird hier zur Massendichte und die dielektrische Feldkonstante ε_0 zur Gravitationskonstanten $G = 6,67384 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$. So ergibt sich für die Gravitation:

$$\boxed{\operatorname{div} \vec{g}(\vec{r}) = -4\pi \cdot G \cdot \varrho(\vec{r})} \quad (3.41)$$

3.3.3. Anmerkungen aus der Fachdidaktik

Ein wirkliches Feld ist eine mathematische Funktion, die wir verwenden, um die Vorstellung der Fernwirkung zu vermeiden. [...] Ein wirkliches Feld ist dann ein System von Zahlen, die wir so festlegen, dass das, was an einem Punkt geschieht, nur von den Zahlen an diesem Punkte abhängt. Wir brauchen nichts darüber zu wissen, was anderswo vor sich geht.

(Feynman)

Das Konzept des Feldes wurde aufgrund der problematischen Fernwirkungsvorstellung zwischen Körpern entwickelt und versucht, die Wechselwirkung zwischen diesen durch eine Nahwirkung zu ersetzen. Dies funktioniert aus mathematischer Sicht wunderbar. Aber Felder sind trotzdem nicht fühlbar und nur über ihre Wirkungen - kontaktlos - wahrzunehmen. Dieser Umstand lässt sie für Schülerinnen und Schüler oft mysteriös erscheinen. So sind die anschaulichen Feldlinienbilder eine sehr gute Hilfe, sie warten aber auch mit Tücken auf.

Ähnlich zum Kraftkonzept sollen nachfolgend die fachdidaktischen Ansichten des Konzeptes aus drei Blickwinkeln betrachtet werden. Diese sind das Vorgehen in unterschiedlichen Schulbüchern, die Umsetzungsvorschläge aus externen Unterrichtsmaterialien für Lehrer und Vorschläge seitens der Hochschuldidaktik.

Schulbücher

Es wurden hier die unter 6.3.1 vorgestellten Bücher betrachtet.

Die Handhabung des Feldkonzeptes der Schulbücher unterscheidet sich in mehreren Dingen. Ein großer Unterschied liegt darin, ob das Feld im Rahmen der Gravitation oder Elektrizitätslehre eingeführt wird. Die Einführung im Rahmen der Behandlung der Gravitation ist vorherrschend, differiert aber nochmals darin, ob die klassische Newtonsche Theorie, ohne Feldbegriff, vorher thematisiert wird.

Zudem gibt es Unterschiede in der fachwissenschaftlichen Herangehensweise. Der *Metzler* setzt sofort auf klare fachwissenschaftliche Definitionen (Feld, Feldstärke, Abstandgesetz,...) und spart auch nicht an Vektorpfeilen. Hingegen geht das Buch von *Kuhn* sehr behutsam vor und verzichtet auf den ersten beiden Seiten der Feld-

introduction völlig auf Formeln³⁰.

Im Rahmen dieser Arbeit besteht der wichtigste Unterschied aber bei der Herstellung eines neuen konzeptuellen Denkansatzes. Wie stark wird auf die Notwendigkeit eines neuen Wechselwirkungskonzeptes eingegangen?

Manche Bücher verweisen ausführlich auf die Dichotomie zwischen Fern- und Nahwirkungstheorie und somit auf den Bedarf eines anderen Konzeptes. Für andere Werke ist diese Hinführung irrelevant, das Feld ist einfach eine von vielen Definitionen, die es zu lernen gilt, wodurch der konzeptuelle Gedanke weit in den Hintergrund gerät. Die Gemeinsamkeiten, sowie die Unterschiede sind nun knapp in folgender Tabelle zusammengefasst, eine ausführliche Darstellung ist unter 6.3 zu finden.

Buch	Einführung in Thema	Historie Fern/Nahwirkung	Fachwissen- schaftlich
Metzler	Gravitation	ausführlich	sehr ausgeprägt
Cornelsen	Gravitation erst Newton	ausführlich	ausgeprägt
Duden	Gravitation erst Newton	nur auf Begleit-CD	wenig
Impulse	Gravitation erst Newton	kurz ohne geschichtlichen Verweis	wenig
Kuhn	E-Feld	vorhanden	sehr wenig

Tabelle 3.4.: Behandlung des Feldkonzeptes aus fachdidaktischer Sicht in Schulbüchern

Exemplarische Zusatz- und Begleitmaterialien

Die Begleitmaterialien der betrachteten Schulbücher liefern, wie schon beim Kraftkonzept, nichts Nennenswertes zur Unterstützung des Feldbegriffs als Wechselwirkungskonzept.

Die Zusatzmaterialien liefern Unterschiede in der Herangehensweise.

Der Raabits-Ordner [RAB11], der beim Kraftkonzept noch klare Stärken gezeigt hat, bietet keine Materialien zum vertieften Verständnis. Es gibt nur Unterrichtsreihen im Rahmen der Anwendungen des Feldbegriffs. Grund hierfür mag sein, dass dieser Ordner in seinen Vorschlägen zur Herangehensweise immer sehr schüleraktivierend vorgeht und das Wechselwirkungskonzept des Feldes als Konzept gesehen diesbezüglich schwer zu behandeln ist.

Im Ordner „Unterrichtsbausteine“ [LAD02] gibt es hingegen klare Vorschläge zur

³⁰Hierbei sei aber gesagt, dass der *Metzler* sich an Leistungskurse und der *Kuhn* eher an Grundkurse richtet.

Einführung des neuen Konzeptes, wobei hier auch Praxiserfahrungen genannt werden, auf die man als Lehrer direkt achten kann. Eingeführt wird der Feldbegriff im Rahmen der Magnetostatik und wird dann weiter in anderen Themengebieten ausgebaut. Gründend auf historischen Kontexten werden immer wieder mögliche Probleme der Schülerinnen und Schüler genannt, auf die verstärkt zu achten ist, sodass einerseits keine Misskonzepte entstehen und andererseits der Wechselwirkungscharakter vertieft wird. Das Vorgehen ist modern, problemorientiert und achtet auf eine Vielzahl von Experimenten.

Die Unterrichtsmaterialien des Stark-Verlags [STA09] stellen eher einen Pool von komplexeren kontextorientierten Aufgaben dar. Diese Aufgaben sind aber zum Teil darauf ausgelegt, den Konzeptgedanken zu stärken. So gibt es bspw. Aufgaben zur Auffindung von Analogien zwischen elektrischen und magnetischen Feldern, wodurch die Schülerinnen und Schüler anschließend selbstständig eine mögliche Definition einer mag. Feldstärke finden. Dadurch müssen sie sich auf kreative Weise mit der recht großen Anzahl an Analogien auseinandersetzen, um adäquate Ergebnisse zu liefern. Dieser Lösungsprozess unterstützt, fördert und fordert ein ausgebautes Verständnis des Feldes als Wechselwirkungsgröße.

Sichtweisen der universitären Fachdidaktik

Damit eine vertieftes Verständnis für Felder bei den Schülerinnen und Schülern initiiert werden kann, schlägt der Physikdidaktiker *Girwidz* unter anderem durch Berufung auf *Pocovi* [POC07] vor, eine historische Betrachtung und Diskussion in den Unterricht einzubringen. Zudem wird auf die Wichtigkeit des Feldkonstrukts als Wechselwirkungsgröße hingewiesen, die über Diskussionen von Nah- und Fernwirkungen unter Einbeziehungen der Frage „nach einem Übertragungsmedium, ein reizvoller Ansatzpunkt im Unterricht“[GIR13a, 4] sein kann.

Anders als in den Schulbüchern vorgeschlagen, wird in der Fachdidaktik - neben der historischen Beachtung - der Grundlageneinstieg in den Feldbegriff über den Elektromagnetismus als der am besten für Schülerinnen und Schüler zugängliche Weg dargestellt (vgl. [GIR13a, 5]).

Bresser und *Rode* gehen noch einen Schritt weiter. Die Feldvorstellung unter Einbeziehung der ortsabhängigen Größen, die durch Richtung und Betrag gekennzeichnet sind, sind für viele Schülerinnen und Schüler neu, „so dass sie einer möglichst handlungsorientierten Einführung bedarf“[BRE13, 18]. Diese Handlungsorientierung funktioniert am besten anhand der Untersuchung von Magnetfeldern. Die Lernenden können erste Erforschungen der Richtungsabhängigkeit mit dem Kompass auf dem Schulhof nachempfinden und diese später bei detaillierteren Erkundungen von Permanentmagneten mithilfe von Feldsonden ausbauen und um numerische Größen erweitern. Hierdurch kann das Feldlinienbild nochmals von den Lernenden, hier aber propädeutisch und eigenständig, entwickelt werden.³¹

³¹Das „nochmals“ bezieht sich darauf, dass die Oberstufenschülerinnen bzw. Schüler das Feldlinienbild schon aus der Mittelstufe kennen.

Zum Ausbau und zur Vertiefung des Feldverständnisses ist eine graphische Darstellungen von besonderer Bedeutung. Neben den klassischen Mitteln, bspw. des Kompassbrettes oder Grieskörnern in Öl, kann ein Computerprogramm mehrere Anschauungen ermöglichen. „Gerade das Erfassen unterschiedlicher Aspekte mit ihren Bedeutungszusammenhängen ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis.“[GIR13b, 28] Diese verschiedenen Aspekte können tragfähig gemacht werden, indem unterschiedliche Darstellungen (Potentiallinien, Feldlinien, Potentialgebirge, etc) überlagert werden und die Lernenden also direkte Zusammenhänge, bspw. zwischen den Größen Potential und Feldstärke, sehen können.

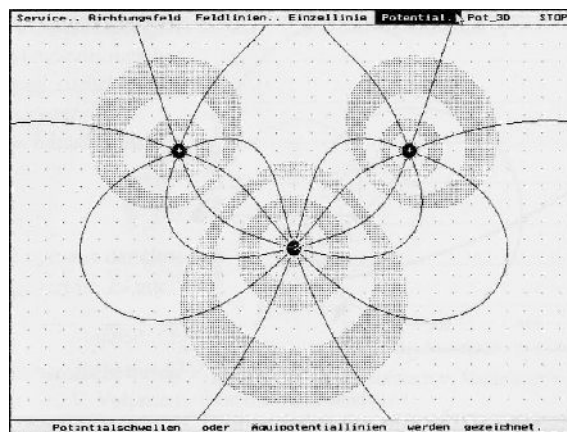


Abbildung 3.9.: Äquipotential- und Feldlinien. Markiert sind Bereiche, zwischen deren Rändern sich das Potential verdoppelt, bzw. halbiert. Dies zeigt auch, wo die Abweichung von der „ $1/r$ -Abhängigkeit“ (bedingt durch die weiteren Ladungen) am deutlichsten sind. Die Anordnung entspricht etwa einem H_2O -Molekül [GIR13b, 39]

Zudem können Änderungen in der Konfiguration (zusätzliche Ladung oder größere Ladungen) mit den zugehörigen Auswirkungen schnell und bequem verdeutlicht werden. Weitere Möglichkeiten und einen Link zum Programm siehe [GIR13b, 38-40].

Skalare Felder werden meist mithilfe von Temperaturfeldern oder kontextorientierter mithilfe von Luftdruckkarten veranschaulicht. Darstellungen von Vektorfeldern sind meist relativ innerfachlich durch Eisenspanbilder oder Magnetnadelbilder gegeben. Das Fachdidaktikzentrum Vorarlberg schlägt im Rahmen eines Projekts ein anderes Beispiel zur Unterstützung des physikalischen Verständnisses vor. Grundlage ist das Bild eines Theatersitzplanes.

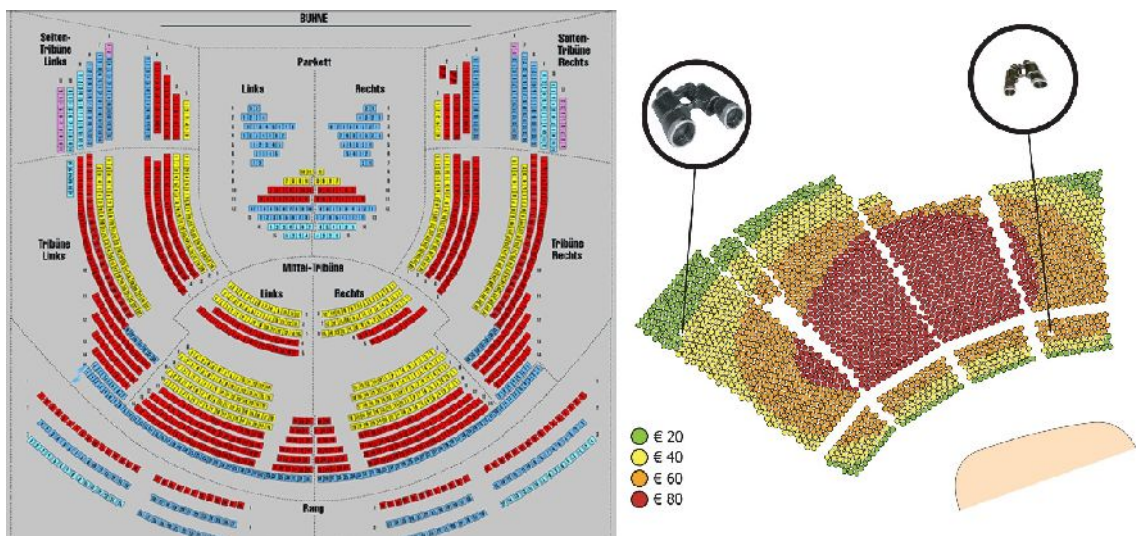


Abbildung 3.10.: Theatersitzplan [HAI06, 9, 39]

Das Bild stellt die unterschiedlichen Preiskategorien mithilfe von Farben dar. Die Sitzplätze sind somit der Raum und der Kartenpreis die Eigenschaft des Feldes. Folgende Eigenschaften bzw. Begrifflichkeiten des Feldes können mithilfe des Bildes veranschaulicht werden:

Begebenheit	Eigenschaft / Begriffe
Theaterbesuch	Ort mit bestimmten Eigenschaften
Preiskategorie	Feldlinien; Visualisierung eines Feldes, Flächen gleicher Stärke
Änderung der Kategorie	Feldlinienendichte; Feld und Energie; Wechselwirkungen; (in)homogen
Reihenerhöhung	Äquipotentialflächen

Tabelle 3.5.: Alltagsbegebenheiten gegenüber gestellt mit den Eigenschaften/Begriffen des Feldes

Die Richtungsabhängigkeit soll mithilfe von zwei Ferngläsern dargestellt werden. Je weiter man sich von der Bühne entfernt, desto stärker muss die Vergrößerung sein, um etwas gut sehen zu können. Dieses verkehrte Größenverhältnis (zu den eigentlich wirkenden Kräften) könnte aber von den Schülerinnen und Schülern missgedeutet werden.

Diese Veranschaulichung ist ein interessanter Zugang, aber durch die Schwächen der

Darstellung von vektoriellen Feldern eher für die Sekundarstufe I geeignet. In der Sekundarstufe II könnte man sich dieses Bild zu Beginn der Reihe zur Wiederholung heranziehen, um das Vorwissen der Schülerinnen und Schüler festzustellen.

Insgesamt ist diese Veranschaulichung aber ein Beispiel für eine überfrachtete und die Analogie fast schon als Karikatur überzeichnende Modellbildung - eher geeignet, Verwirrung als Erhellung zu stiften.

3.4. Das Konzept der Geometrisierung

Früher hat man geglaubt,
wenn alle Dinge aus der Welt
verschwinden, so bleiben noch
Raum und Zeit übrig; nach der
Relativitätstheorie
verschwinden aber Zeit und
Raum mit den Dingen

(Einstein)

Die Geometrie an sich ist ein wichtiger Bestandteil der Naturwissenschaften und besonders aus der Physik nicht wegzudenken. Bevor man an die Lösung eines Problems in der Physik geht, wird oft als erstes die Geometrie des Problems betrachtet. Hieran lassen sich, beispielsweise aus Symmetriegründen, schon viele zu beachtende oder gerade nicht beachtende Faktoren ein- oder ausschließen. Die Formeln, mit denen man umgeht, haben in den meisten Fällen eine Abhängigkeit von Raumpunkten und deren räumlicher oder zeitlicher Änderung. So ist es nicht verwunderlich, dass sich ein Konzept der Wechselwirkung über die Geometrisierung entwickelt hat.

3.4.1. Historische Entwicklung

Wer die Geometrie begreift,
vermag in dieser Welt alles zu
verstehen.

(Galileo)

Der Ursprung des Konzeptes der Geometrisierung lässt sich bei *Albert Einstein* (1879-1955) finden (vgl.[SCH07, 6]). Er war von der Richtigkeit der Maxwellschen Gleichungen überzeugt und fand im Michelson-Experiment auch die Bestätigung einer Nicht-Existenz des Äthers. Aber diese Annahmen sind mit konzeptionellen Schwierigkeiten des Feldbegriffes verbunden. Im letzten Kapitel hieß es, dass ein Körper durch seine charakteristischen Eigenschaften ein Feld erzeugt und damit seine Umgebung verändert. Wenn es aber keinen Äther gibt, was soll der Körper dann in seiner Umgebung verändern? Wenn nichts da ist, kann auch nichts verändert werden. Einstein hatte die kühne Idee, da der Raum an sich noch da ist, dass der Raum, oder vielmehr seine Eigenschaften, eine Änderung in der Umgebung eines Körpers erfahren. Beschreibt man den Raum durch seine Geometrie, kann eine postulierte Änderung durch eine Änderung der zugrundeliegenden Geometrie beschrieben werden. Für diese Geometrisierung bedurfte es aber noch einiger historisch bedeutender Entwicklungen.

Bernhard Riemann

Der deutsche Mathematiker *Bernhard Riemann* (1826 - 1866), der sich unter anderem für die physikalische Mathematik interessierte, sprach 1854 in seiner Habilitationsvorlesung zu Göttingen von einer möglichen Raumkrümmung (vgl. [WHE68, 7]). Er sah damals schon eine denkbare Verkettung von Physik und Raumkrümmung. So sagte er:

„... es kann dann in jedem Punkte das Krümmungsmaß in drei Raumrichtungen einen beliebigen Wert haben, wenn nur die ganze Krümmung jedes meßbaren Raumteils nicht merklich von Null verschieden ist.“ [WEB53]

William Kingdon Clifford

Der britische Philosoph und Mathematiker *W.K. Clifford* (1845 - 1879) war von Riemann's Vorlesung inspiriert worden. Er hatte die geometrische Vorstellung, dass ...

„... in der Physik nichts anderes stattfindet, als die Veränderung der Krümmung des Raumes.“[TUC82]

Dieses sollte sogar in mikroskopischen Maßstäben geschehen. Teilchen sollte man sich als Gebiete vorstellen, in denen der Raum stärker gekrümmt sei; vorstellbar als kleine Berge; eine Bewegung dieser Berge im Raum ist dann vergleichbar mit einer Teilchenbewegung (vgl. [WHE68, 7]).

Diese Ansichten waren revolutionär, es fehlte ihnen aber neben der mathematischen Darstellung noch die relative Anschauung und Nebeneinanderstellung von Raum und Zeit, denn Riemann und Clifford waren noch in Newtons Vorstellung von einem absoluten Raum und einer absoluten Zeit gefangen.

Hendrik Antoon Lorentz

Der niederländische Mathematiker und Physiker *H. A. Lorentz* (1853 - 1928) verband die Feldtheorie Maxwells mit der atomistischen Vorstellung von *Wilhelm Weber* (1804 - 1891) zu der klassischen Elektronentheorie. Diese Theorie fand viele Bestätigungen und wurde 1902 auch mit dem Nobelpreis belohnt. Grundlage dessen war aber, dass die elektromagnetischen Grundgleichung in allen Inertialsystemen, die sich zueinander geradlinig und gleichförmig bewegen, dieselbe Form aufweisen müssen. Dazu bedurfte es aber neuartigen Transformationsgleichungen, die von den bis dahin üblichen Galilei-Transformationen abwichen. Somit wurden die Transformationsgleichungen, die die Koordinaten eines Systems $\Sigma(x, y, z, t)$ in ein dazu relativ mit

konstanter Geschwindigkeit in x-Richtung geradlinig bewegtes System $\Sigma'(x', y', z', t')$ umwandeln von:

$$\begin{aligned} x' &= x - vt & y' &= y \\ z' &= z & t' &= t \end{aligned} \quad (3.42)$$

zu

$$\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} & y' &= y \\ z' &= z & t' &= \frac{x - \frac{vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \end{aligned} \quad (3.43)$$

[OLO99, 1]. Für kleine Werte von v geht $\frac{v}{c}$ gegen Null und man erhält wiederum die Galilei-Transformationsgleichungen. Interessant zu wissen ist hierbei, dass schon der deutsche Physiker W. Voigt in seiner Arbeit „Über das Dopplersche Prinzip“ von 1887 gezwungen war, die Transformation der Zeit ($t' = t - \frac{v}{c^2}x$) vorzunehmen (vgl. [KUH01b, 368]).

Formeltechnisch hatte Lorentz hier nun die Relativität der Zeit gefunden und auch eine Längenkontraktion um den Faktor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (3.44)$$

fand er gleichzeitig mit Fitzgerald. Seine Ansichten waren aber immer noch klassischer Natur. So interpretierte er die Längenkontraktion als eine Art „Stauchung“, verursacht durch die „Reibung“ mit dem stationären Äther. Die absolute Zeit wollte er auch nicht aufgeben, so war die transformierte Zeitkoordinate stets nur eine Rechengröße, die lokal Bestand hatte, aber nicht den physikalischen Prozess widerspiegeln sollte. Aus physikalisch - historischer Sicht war Lorentz weit hinter Einsteins gefundener Zeitdilatation und Längenkontraktion.

Henri Poincaré

Der französische Mathematiker und theoretische Physiker *Henri Poincaré* (1854 - 1912) vollendete die mathematischen Überlegungen in den Transformationsgleichungen von Lorentz. Er fand heraus, dass die Gleichungen eine Gruppe bilden und dass alle Naturgesetze gegenüber diesen Transformationen invariant sein müssen³². Die Invarianzgröße ist $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$, wenn man eine Drehgruppe im vierdimensionalen Raum mit der Basis $\{x, y, z, ict\}$ zu Grunde legt [WHI53, 440]. Die Ideen von Poincaré wurden später von *Hermann Minkowski* (1864-1909) weiter systematisch

³²Dieses Relativitätsprinzip formulierte er 1904 schon vor Einstein.

ausgebaut.

Albert Einstein

Auf dem historischen Weg zu Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie mit dem innewohnenden Geometrisierungskonzept soll hier der Vollständigkeit halber die Spezielle Relativitätstheorie kurz erwähnt werden, da diese Einstein erst ermutigt hat, eine allgemeine Relativität in Betracht zu ziehen, welche uns an das Konzept der Geometrisierung heranführt.

Wie oben schon erwähnt, hatte *Poincaré* die wesentlichen mathematischen Strukturen der Speziellen Relativitätstheorie aufgezeigt. Dies schmälert aber in keinsten Weise Einsteins Leistung, da dieser Poincarés Arbeiten gar nicht und nur Lorentz Arbeiten von 1895 kannte:

Was mich betrifft, so kannte ich nur Lorentz bedeutendes Werk von 1895 [...] - aber nicht Lorentz spätere Arbeiten und auch nicht die daran anschließende Untersuchung von Poincaré. In diesem Sinne war meine Arbeit von 1905 selbstständig. [BOR83, 189]

Es muss betont werden, dass Lorentz die relativistischen Effekte, zum Beispiel die der Kontraktion, für physikalisch in dem Sinne als real annahm, dass er diese auf Wechselwirkungen mit dem Äther zurückführte. Ein Maßstab etwa sollte sich nach dieser Auffassung tatsächlich verkürzen. Bei Einstein sind die relativistischen Effekte Transformationseigenschaften der Raumzeit-Geometrie, die mit Kraftwirkungen nichts zu tun haben. Hier liegt der interessante Fall vor, dass zwei grundverschiedene Theorien eine völlig identische mathematische Struktur besitzen, die allerdings in gänzlich anderer Weise zu interpretieren ist.

Bis Einsteins Spezieller Relativitätstheorie ging man im physikalischen Sinne von Newtons Annahme eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit aus (S. 77). Auch das Galileische Relativitätsprinzip hatte Bestand, wonach ein Lichtstrahl, der bspw. von einem mit $15 \frac{km}{h}$ in entgegengesetzter Richtung fahrendem Schiff ausgesandt wird, eine Geschwindigkeit von $(c - 15 \frac{km}{h})$ hat. Dies musste zwingend so sein, wenn man, wie damals üblich, von einem ruhenden Äther ausging³³. Einstein „räumte damit auf“ und baute seine SRT mit den zwei folgenden Postulaten auf (vgl. [EIN69, 28ff.]):

1. Postulat: (Einsteinsches Relativitätsprinzip³⁴) Experimente laufen in allen Inertialsystemen gleich ab. Sie sind äquivalent.

³³Selbst nach dem *Michelson* 1881, und noch einmal genauer mit *Morley* zusammen 1887, durch ein Experiment mit einem Interferometer die Nicht-Existenz des Äthers bestätigt hatte, glaubten trotzdem viele Physiker, darunter Lorentz, noch lange Zeit an den Äther.

³⁴Dieses geht letztendlich auf das klassische Relativitätsprinzip von Galileo, bzw. in vollendeter Form auf Christaan Huygens, zurück. Es ist das Prinzip des Unvermögens, zwischen Ruhe und gleichförmiger Geschwindigkeit zu unterscheiden.

Beispiel: Die Gesetze der Elektrodynamik sind in allen Inertialsystemen identisch.

Unmittelbare Folgerung aus dem Relativitätsprinzip ist, dass alle Inertialsysteme gleichberechtigt sind und es deshalb auch kein besonders ausgezeichnetes Inertialsystem gibt. Raumfahrer können eine Relativgeschwindigkeit beispielsweise bezüglich der Erde feststellen, aber nicht ihre absolute Geschwindigkeit! Zu welchem Bezugspunkt sollten sie dies auch können?

2. Postulat: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Beispiel: Wenn zwei Beobachter in unterschiedlichen Inertialsystemen unterschiedliche Werte für die Lichtgeschwindigkeit messen würden, dann hätten sie die Möglichkeit, aus dieser Differenz Rückschlüsse auf ihren eigenen Bewegungszustand zu machen!

Aus diesen beiden Postulaten folgt nun umfassend die komplette Spezielle Relativitätstheorie. Sie setzt der Absolutheit von Raum und Zeit ein Ende. Damit ergaben sich aber einige paradox erscheinende Phänomene, die vielen Physikern erst einmal Unbehagen bereiteten³⁵.

- Ein geeichter Meterstab hat für schnell bewegte Beobachter keine feste Transformationslänge. Der Stab wirkt für ihn verkürzt.
↪ Längenkontraktion
- Für die Zusammensetzung von Geschwindigkeiten reicht nicht mehr die gewöhnliche Vektoraddition, es wird ein erweitertes Additionstheorem benötigt, da eine beliebige Geschwindigkeit addiert auf c wieder c ergeben muss.
↪ Geschwindigkeitsadditionstheorem
- Der bisheriger Energieerhaltungssatz entpuppt sich als Grenzfall für kleine Geschwindigkeiten. An seine Stelle rückt der verallgemeinerte Erhaltungssatz der Energie, in welchem die Ruhemasse ein Energieäquivalent darstellt und zur Energie hinzugerechnet werden muss.
↪ $E_{\text{Gesamt}} = E_{\text{Ruhe}} + E_{\text{kin}}$ mit $E_{\text{Ruhe}} = m_0 \cdot c^2$ (m_0 = Ruhemasse)
- Schnell bewegte Körper gewinnen an träger Masse.
↪ Relativistische Massenzunahme
- Schnell bewegte Uhren scheinen vom Ruhesystem aus betrachtet langsamer zu gehen.
↪ Zeitdilatation.

³⁵Geradezu als Klassiker gelten die relativistischen Paradoxien, z.B. das Zwillingsparadoxon. Es sei darauf hingewiesen, dass man unter einem Paradoxon einen Scheinwiderspruch versteht, der sich mithilfe der Theorie klären lässt, keinesfalls handelt es sich um einen realen Widerspruch.

Wie oben schon geschrieben, hatten viele Physiker erst einmal Probleme mit diesen theoretischen Ansichten. Aber alle Experimente, die zur Widerlegung gedacht waren, liefen ins Leere und bestätigten somit indirekt die SRT. Ein Hauptverfechter von Einsteins Theorie war der damals schon sehr geschätzte Professor in Theoretischer Physik *Max Planck*. Mit seiner Hilfe wurden Widersacher, wie beispielsweise *Walter Kaufmann*, zurückgedrängt³⁶ (vgl. [MIL81, 334-352]), sodass sich die SRT in den entscheidenden Kreisen durchsetzen konnte. Den völligen Durchbruch schaffte Einsteins Theorie dank der nun folgenden Person.

Herman Minkowski

Der deutsche Physiker *Herman Minkowski* (1864-1909) kannte sowohl die Arbeit von *H. A. Lorentz* von 1904, deren Vollendung durch *Poincaré* (s.S. 77), über die Transformationsgleichungen in der Elektrodynamik, die auch eine Transformation der Zeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufwies, als auch die Arbeit Einsteins von 1905 über die Spezielle Relativitätstheorie.

Minkowski stellte fest, dass man die Relativitätstheorie geometrisch mit einem nicht-euklidischen Raum erklären kann. So sagte er auf einer Versammlung der deutschen Naturforscher und Ärzte:

„Meine Herren! Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich Ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund an sollen Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Art Union der beiden soll Selbstständigkeit bewahren.“
[MIN58]

Über seine Vermutung, dass man Raum und Zeit nicht mehr nebeneinander stehen lassen und sie zu einem vierdimensionalen Raumzeit-Kontinuum verbinden kann, schrieb er eine Abhandlung der vierdimensionalen Elektrodynamik. Mathematisch bedeutet dies, dass aus der Raumkoordinate

$$(x, y, z)$$

eine Raumzeitkoordinate

$$(x, y, z, t)$$

wird³⁷. So wird nach dem pythagoreischen Lehrsatz der Abstand zwischen zwei benachbarten Raumzeitpunkten $P(x, y, z, t)$ und $P(x + dx, y + dy, z + dz, t + dt)$, bei Beachtung der Lorentzinvarianz, zu:

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2}$$

³⁶Es sei hier an Walter Kaufmanns Experimente zur longitudinalen und transversalen Masse erinnert.

³⁷In der Regel wird statt t die Größe ict verwendet um gleiche Einheiten im Vektor zu haben. Die Koordinate (x, y, z, ct) bezeichnet man als *Galilei-Koordinate*.

Dies stellt auch die zugrunde liegende Metrik in vierdimensionalen *Minkowski-Räumen* dar.

Albert Einstein

Albert Einstein hatte in seiner Speziellen Relativitätstheorie gezeigt, dass der Übergang zwischen Inertialsystemen durch Lorentztransformation erfolgt. Daraufhin stellte sich die Frage, wie es sich mit beschleunigten Bezugssystemen verhält. Einstein (vgl. [KUH01b], 386 ff.) kam auf die Idee, dass beschleunigte Systeme lokal nicht von solchen zu unterscheiden sind, die der Gravitation unterliegen. Er bezeichnete diesen Ansatz später als seinen „glücklichsten Gedanken“:

„Ich saß auf meinem Sessel im Berner Patentamt, als mir plötzlich folgender Gedanke kam: ‚Wenn sich eine Person im freien Fall befindet, dann spürt sie ihr eigenes Gewicht nicht‘. Ich war verblüfft. Dieser einfache Gedanke machte auf mich einen tiefen Eindruck. Er trieb mich in Richtung einer Theorie der Gravitation.“[ISH77]

Über seinen weiteren Antrieb sagte er:

„Es war für mich außerordentlich unbefriedigend, daß im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie die Beziehung zwischen Trägheit und Energie so schön hergeleitet werden kann, während es doch keine Relation zwischen Trägheit und Gewicht gibt. Ich vermutete, daß eine solche Beziehung im Rahmen der speziellen Relativitätstheorie nicht erklärt werden könne.“[ISH77]

Er wollte nun eine Allgemeinere Relativitätstheorie erschaffen, die eine Wechselbeziehung zwischen Gravitation, Raum, Zeit, Licht und Materie lieferte.

Aber auch diese Theorie bedurfte zugrundeliegender Postulate. Einerseits das *erweiterte Relativitätsprinzip*, nachdem die Gesetze der Physik in allen Koordinatensystemen³⁸ die gleiche Form haben - auch allgemeine Koordinaten-Kovarianz genannt - andererseits das *Machsche Prinzip*, dass dem absoluten Raum widersprach. Neben diesen war aber die Äquivalenz von träger und schwerer Masse, „die man nur widerstrebend als ein Zufall der Natur akzeptieren kann“([WAL89], 66), der wichtigste Grundpfeiler Einsteins Theorie. Also eine Gleichheit von derjenigen Masse, die im Schwerfeld eine Gewichtskraft auf die Unterlage ausübt und einer Masse, zu deren Beschleunigung eine Kraft erforderlich ist. Den Ursprung dieser naheliegenden Gleichsetzung findet man schon seit Stevins und Galileos Fallversuchen, die zeigten, dass alle Körper unabhängig von Masse, Form, Größe und Zusammensetzung im Schwerfeld der Erde dieselbe Fallbeschleunigung erfahren.

Neben diesem Postulat, welches auch *schwaches Äquivalenzprinzip* genannt wird, ging Einstein noch einen Schritt weiter. Bis hierhin hätte gegebenenfalls auch Newton noch der Theorie zugestimmt, aber Einstein schloss aus dieser Äquivalenz weiter,

³⁸Im Galileischen Relativitätsprinzip ist nur von Inertialsystemen die Rede.

dass somit auch die Auslöser beider Effekte äquivalent sind. Vor allem durch Gedankenexperimente legte er dar, dass jedwede Experimente³⁹ überall gleich ablaufen müssten, da er eine Gleichwertigkeit von Gravitationsfeld und beliebigen Beschleunigungsfeldern postulierte. Sie sollten nur verschiedene Erscheinungsformen derselben Feldart darstellen. Man könne also nicht mehr unterscheiden, ob ein Körper eine gravitative Beschleunigung erfährt oder ob er durch eine andere Ursache beschleunigt wird. Dieses „zweite“ Postulat wird auch *starkes Äquivalenzprinzip* genannt. Diese Gedankengänge mündeten schließlich in der *Allgemeinen Relativitätstheorie*, an der er über zehn Jahre arbeitete⁴⁰. Im Folgenden sind die geschichtliche Eckdaten der Entwicklung chronologisch aufgeführt.

- 1905: Nach Beendigung seiner Arbeit über die Spezielle Relativitätstheorie denkt Einstein über eine mögliche allgemeinere Form der Relativität nach.
- 1907: Er entdeckt eine einfache Version des Äquivalenzprinzips und bemerkt, dass dadurch Licht von Massen abgelenkt werden müsse und es eine geringe Rotverschiebung des Sonnenlichtes geben müsse. Weiterhin suchte er eine Erklärung für die Präzession der Merkurlaufbahn.
- 1911: Erste Berechnung der Lichtablenkung durch die Sonne. Das Ergebnis ist falsch, da er noch von einer flachen Raumzeit ausging.
- 1912: Er kommt zur Erkenntnis, dass der Raum nicht flach ist und ihm somit keine euklidische Geometrie zugrunde liegen kann. Somit ist die Geometrie der Raumzeit riemanschen. Nach dieser Erkenntnis muss Einstein sich mit schwieriger Differentialgeometrie auseinandersetzen, um Gleichungen zur mathematischen Beschreibung aufzustellen, dabei war ihm der Mathematiker und alter Studienkollege *Marcel Grossmann* sehr behilflich.
- 1915: Anfang des Jahres glaubt er die Probleme der Gravitationsfeldtheorie behoben zu haben, findet aber noch Fehler. Nach intensiver Arbeit kann er Ende des Jahres seine endgültige Arbeit über die Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlichen.
- 1919: Die Lichtablenkung durch die Sonne wird bei einer totalen Sonnenfinsternis bestätigt und der Ablenkungswinkel stimmt sehr gut mit dem vorher von Einstein berechneten Wert überein. Nachdem nun ein vorhergesagtes Phänomen der ART bestätigt war⁴¹, wurde Albert Einstein weltbekannt. (vgl. [PAI86])

³⁹Dies bedeutete nichts anderes als den Ausbau seiner Theorie auf alle Gebiete der Physik.

⁴⁰Wobei man bedenken muss, dass er erst noch im Berner Patentamt arbeitete, später mehrere Stellenwechsel zwischen Universitäten durchlief und dreieinhalb Jahre „pausierte“, um sich zwischen Dezember 1907 und Juni 1911 unter anderem mit der Krise in der Quantenphysik zu beschäftigen.

⁴¹Weitere Experimente folgten und alle bestätigten die Allgemeine Relativitätstheorie, bis heute steht noch kein Experiment im Widerspruch zur Allgemeinen Relativitätstheorie, weshalb die meisten Physiker von der Richtigkeit dieser Formulierung ausgehen.

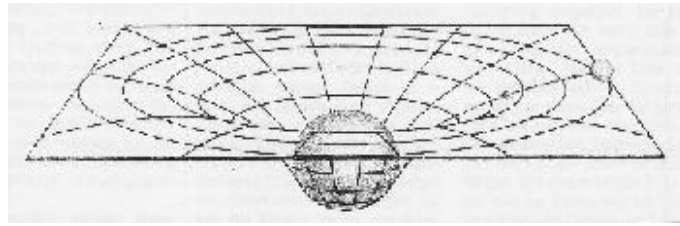


Abbildung 3.11.: Raumzeit-Krümmung nach Einstein [WIN07, 17]

In der Allgemeinen Relativitätstheorie tritt die Gravitation als eine Krümmung der Raumzeit auf, was sich nur illustrieren lässt, wenn man auf eine Raumdimension verzichtet (siehe Abbildung 3.11). Diese Raumkrümmung lässt sich mathematisch nur sehr schwer beschreiben. Wie oben schon erwähnt, erhielt Einstein dafür Hilfe von Marcel Grossmann, der ihn in die von C. F. Gauß, B. Riemann, E. Christoffel, G. Ricci-Curbastro und T. Levi-Civita entwickelte Differentialgeometrie einführte. Dadurch hatte Einstein die Chance, Krümmungen auf vierdimensionale Minkowski-Räume zu beschreiben. Die aus der Allgemeinen Relativitätstheorie resultierenden Einsteinschen Feldgleichungen vermögen einen Zusammenhang zwischen Krümmungseigenschaften der Raumzeit und dem Energie-Impuls-Tensor herzustellen, der die lokale Energiedichte über $E = mc^2$ enthält und damit die wesentlichen Eigenschaften der Materie kennzeichnet. Dies mündet in der Grundgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie [FLI04, 120].

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (3.45)$$

mit:

- G : Gravitationskonstante
- $T_{\mu\nu}$: Energie-Impuls-Tensor
- R : Krümmungsskalar
- $g_{\mu\nu}$: metrischer Koeffizient
- $R_{\mu\nu}$: Ricci-Tensor
- Λ : Kosmologische Konstante

Einstein fand auch für das Problem der Präzession der Merkurbahn eine Lösung. Die Raumzeitkrümmung ist selbst eine Energieform und verstärkt sich somit über $E = mc^2$ selbst, welches zu einer Periheldrehung führt. Dieser Effekt ist sehr schwach und ist somit nur bei starker Krümmung zu bemerken, was einhergeht mit einer Nähe zu großen Massenansammlungen wie der Sonne. Dadurch sind nur innere Planeten betroffen, wie beispielsweise der Merkur.

Dieser Präzessionseffekt ist mit Newtons Theorie nicht erklärbar, aber durch seine Schwäche war Newtons „unvollkommene“ Gravitationstheorie trotzdem so erfolgreich. Auch andere Theorien stehen nicht im Widerspruch zu dieser neuen Theorie

und behalten ihre Gültigkeit, sie stellen Grenzfälle der Allgemeinen Relativität dar.

$$ART \xrightarrow[\text{kleine Flächen}]{\text{Grenzfall}} SRT \xrightarrow[\text{kleine Geschw.}]{\text{Grenzfall}} Newton$$

Kleine Flächen bedeutet hierbei, dass die Spezielle Relativitätstheorie auf einer flachen Raumzeit gilt. Man kann aber gekrümmte Flächen, wenn sie entweder schwache Krümmungen aufweisen oder man in der Nähe massereicher Objekte das Flächensegment klein genug wählt, als eben ansehen. Somit kann man die Aussagen über Inertialsysteme beibehalten, wenn man sich diese hinreichend klein und linear aneinandergefügt vorstellt.

Dadurch, dass die Gravitation in der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht mehr als Kraft, sondern als Krümmung der Raumzeit auftritt, kann man sich die gravitativen Effekte sehr gut geometrisch veranschaulichen⁴². Auf die möglichen Veranschaulichungen, Deutungen und experimentellen Bestätigungen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, da diese bei der Unterrichtseinheit ausführlich besprochen werden.

Das durch diese Theorie entstandene Geometrisierungskonzept endet nicht mit der Allgemeinen Relativitätstheorie, auch später versuchte Einstein eine Verbindung von Wechselwirkungen, und zwar zwischen der Gravitation und der elektromagnetischen, geometrisch im fünfdimensionalen Raum, zu finden. Leider erfolglos.

Aber mit Einstein endet die Entwicklung des Geometrisierungskonzeptes mitnichten. Aktuelle Forschungen zur Vereinheitlichung von Wechselwirkungen benutzen „als wesentlichen Bezugspunkt und als Leitmotiv die Struktur von Geometrie und Symmetrie“ ([SCH95, 44]). Es werden immer höherdimensionierte Räume vorgeschlagen, um eine Verbindung mathematisch zu erlangen. Die bekanntesten unter diesen Theorien sind die Stringtheorie und ihr stärkster Konkurrent, die Schleifenquantengravitation.

⁴²Natürlich geht dies nur gut, wenn man auf eine Raumdimension verzichtet (vgl. 3.11)

3.4.2. Fachwissenschaftliche Sicht

Man sollte alles so einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher

(Einstein)

Die Feldgleichungen von Einstein, die die Raumzeitkrümmung beschreiben, lassen sich nicht direkt herleiten. „Sie sind nicht aus tiefliegenden Annahmen beweisbar, sondern auf Grund plausibel erscheinender Argumente angesetzt“ [GOE96, 268]. Folgende Argumente müssten für die Gleichung zutreffen:

- Sie müssen kovariant gegenüber Koordinatentransformationen sein.
- Sie müssen den Newtonschen Grenzfall $\Delta\Phi(\vec{r}) = 4\pi G\rho(\vec{r})$ (vgl. 3.41) enthalten.

Im Folgenden beziehe ich mich auf [FLI04, 21 ff.] und [GOE96, 268 ff.].

Die erweiterte Gravitationstheorie sollte mathematisch in Ansatz von dem Energie-Impuls-Tensor $T_{\mu\nu}$ abhängen, der die relativistische Energiedichte über $E = mc^2$ einbringt und somit die Eigenschaften der Materie. Dies geschieht in Anlehnung an die Newtonsche Gravitationstheorie, die die reine Masse als Quelle des Gravitationsfeldes beinhaltet.

Wenn $T_{\mu\nu}$ als Quelle in Frage kommt, muss auf der anderen Seite der Gleichung auch ein Tensor stehen. Dieser Tensor sollte die geometrischen Eigenschaften der vierdimensionalen Raumzeit vertreten. Somit kann man folgenden Ansatz wählen:

$$G_{\mu\nu} \approx T_{\mu\nu} \quad \text{bzw.} \quad G_{\mu\nu} = \kappa \cdot T_{\mu\nu} \quad (3.46)$$

Hierbei wird $G_{\mu\nu}$ als *Einsteinentensor* bezeichnet und die Proportionalitätskonstante κ „Einsteinsche Gravitationskonstante“ genannt. Diese beiden unbekannten Faktoren sind über Forderungen an die letztendliche Gleichung zu bestimmen.

- Der Einsteinentensor $G_{\mu\nu}$ sollte einen Riemanschen Krümmungstensor beinhalten, um Krümmungen exakt mathematisch fassbar zu machen. Des Weiteren muss er den metrischen Tensor $g_{\mu\nu}$ beinhalten, um auf den „Riemanschen Mannigfaltigkeiten“ ein Maß für Abstände und Winkel zu haben.
- Da $T_{\mu\nu}$ ein symmetrischer Tensor zweiter Stufe ist, muss auch $G_{\mu\nu}$ dies erfüllen. Also $G_{\mu\nu} \stackrel{!}{=} G_{\nu\mu}$
- $G_{\mu\nu}$ muss Null sein können, damit eine flache Raumzeit möglich ist. (Newtonsche Gesetze müssen gelten können.)
- Wegen der Energie- sowie Impulserhaltung muss für den Energie-Impuls-Tensor gelten: $\nabla^\mu \cdot T_{\mu\nu} = 0$
- Aus letzterem Punkt und 3.46 folgt dann auch: $\nabla^\mu \cdot G_{\mu\nu} = 0$

Aus diesen Forderungen und der Bianchi-Identität ergibt sich der Einsteintensor zu:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \cdot R \cdot g_{\mu\nu} \quad (3.47)$$

Hierbei ist $R_{\mu\nu}$ der Ricci-Tensor, der einen verjüngten Riemanschen Krümmungstensor $R^\rho_{\mu\lambda\nu}$ darstellt. Er kann unter Verwendung des Christoffel-Symbols folgendermaßen geschrieben werden:

$$R_{\mu\nu} = R^\lambda_{\mu\lambda\nu} = \frac{\partial}{\partial x^\nu} \Gamma^\lambda_{\mu\lambda} - \frac{\partial}{\partial x^\lambda} \Gamma^\lambda_{\mu\nu} + \Gamma^\sigma_{\mu\lambda} \Gamma^\lambda_{\sigma\nu} - \Gamma^\sigma_{\mu\nu} \Gamma^\lambda_{\sigma\lambda} \quad (3.48)$$

R stellt den zugehörigen Krümmungsskalar dar:

$$R = g^{\mu\nu} \cdot R_{\mu\nu} = R^\mu_\mu \quad (3.49)$$

Damit bleibt zur Aufstellung einer Gleichung noch die Einsteinsche Gravitationskonstante, diese berechnet sich, mit der bekannten Gravitationskonstanten G , zu:

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^4} \quad (3.50)$$

Somit ergibt sich die Einsteinsche Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie:

$$\boxed{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \cdot R \cdot g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}} \quad (3.51)$$

Später wurde diese Gleichung von Einstein durch einen Zusatzterm verallgemeinert. Dieser Zusatzterm beinhaltet die *kosmologische Konstante* Λ . Ohne diesen Term könnte 3.51 nicht statischer Natur sein, sondern müsste aufgrund der gravitativen Anziehung kollabieren. Im Moment wird sie als sehr klein und positiv angenommen, sie wirkt der Anziehung entgegen und sorgt für eine expandierende Kraft. Mit ihr ergibt sich 3.51 zu:

$$\boxed{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}} \quad (3.52)$$

Schwarzschild-Metrik

Die erste exakte Lösung der Einsteinschen Feldgleichung fand 1916 der Physiker *Karl Schwarzschild*. Sie beschreibt die Raumkrümmung um eine kugelförmige Masseverteilung. Zur exakten Berechnung darf diese Masseverteilung nicht rotieren, muss elektrisch ungeladen sein und müsste in einem hypothetischen massefreien Raum liegen. Die Formel der Metrik ergibt sich in Kugelkoordinaten zu:

$$ds^2 = \frac{1}{1 - \frac{r_S}{r}} dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2(\theta)d\phi^2) - (1 - \frac{r_S}{r})c^2 dt^2 \quad (3.53)$$

Hier ist r_S der Schwarzschildradius. Er lässt sich aus der Fluchtgeschwindigkeit eines Schwarzen Lochs bestimmen.

$$r_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (3.54)$$

Diese Metrik hat trotz der vielen Einschränkungen einen hohen Stellenwert, da sie auch bei nicht völlig kugelsymmetrischen Körpern, die nur sehr langsam rotieren, sehr gute rechnerische Näherungen liefert. So können mit ihr bspw. auch Berechnungen zu unserem Heimatstern - der Sonne - durchgeführt werden.

Des Weiteren können die drei klassischen Effekte - gravitative Rotverschiebung, Merkurperiheldrehung und gravitative Lichtablenkung - zur Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie in den ersten Näherungen auch mit der Schwarzschild-Metrik bestimmt werden.

Später wurde die Metrik von Martin Kruskal und George Szekeres unabhängig voneinander in den 50er bzw. 60er Jahren weiterentwickelt. Obige Metrik weist an den Stellen $r = 0$ sowie $r = r_S$ Singularitäten auf, wobei eine Definitionslücke am Rand des Körpers sehr unrealistisch scheint. So wird durch eine geeignete Koordinatentransformation die Schwarzschildmetrik zur Kruskal-Szekeres-Metrik und hat nur noch eine Singularität bei $r = 0$.

Neben dieser Erweiterung kamen in den folgenden Jahrzehnten noch weitere Metriken, die nicht so starke Einschränkungen wie die Schwarzschild-Metrik aufwiesen, hinzu.(vgl. hierzu [GOE96])

	statisch	rotierend
ungeladen	Schwarzschild-Metrik (1916)	Kerr-Metrik (1963)
geladen	Reissner-Nordström-Metrik	Kerr-Newmann-Metrik (1965)

Tabelle 3.6.: Tabelle der Metriken im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie

Das Geometrisierungskonzept ist aber nicht nur in astronomischen Größenordnungen zu finden. Im Rahmen moderner Eichfeldtheorien werden die drei weiteren physikalischen Wechselwirkungen (elektromagnetische, schwache und starke) durch ein Eichfeld A_λ mit dem Feldtensor $F_{\mu\nu}$ beschrieben. Diese Feldtensoren entsprechen

den aus der Mathematik bekannten Krümmungstensoren von Mannigfaltigkeiten. So kann aus moderner physikalischer Sicht jedwede Kraft als eine Krümmung von Mannigfaltigkeiten angesehen werden (vgl. [GRO03, 571 ff.]). Dies stellt die Geometrisierung der modernen Physik dar.

3.4.3. Anmerkungen aus der Fachdidaktik

Naja, $G_{\alpha\beta} = -\kappa \cdot T_{\alpha\beta}$ sieht ja
jetzt nicht wirklich schwerer
aus als das Newtonsche
Gravitationsgesetz

(Ein Schüler)

Wichtig bei der Untersuchung ist die Definition der Geometrisierung als Wechselwirkungskonzept. So werde ich mich bei der Analyse auf Potentiale und auf die Raumzeit-Krümmung im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie beschränken, da hier die Geometrie, explizit die Krümmung, ein Maß für die Stärke der Wechselwirkung zwischen Körpern darstellt.

Das Geometrisierungskonzept ist aus fachwissenschaftlicher Sicht in der Schule rechnerisch nicht behandelbar. Um den Nutzen einer Geometrisierung zu erkennen, spricht eine geometrische Beschreibung der fundamentalen Wechselwirkungen der Physik zu erlangen, ist zum einen - rechnerisch gesehen - ein großer mathematischer Apparat und zum anderen ein vertieftes physikalisches Verständnis notwendig (vgl. 3.4.2). Beides fehlt den Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe. Somit ist die Geometrisierung der Physik nur eher phänomenologisch bzw. ikonisch adäquat in der SII ansprechbar.

Ähnlich wie bei den vorangegangenen Konzepten will ich die fachdidaktischen Ansichten des Konzeptes aus drei Blickwinkeln betrachten. Diese sind das Vorgehen in unterschiedlichen Schulbüchern, die Umsetzungsvorschläge aus externen Unterrichtsmaterialien für Lehrer und Vorschläge seitens der Hochschulen in Form von Veröffentlichungen.

Schulbücher

Es wurden hier die unter 6.3.1 vorgestellten Bücher betrachtet.

Die Schulbücher gehen, bis auf eine Ausnahme, auf das Geometrisierungskonzept relativ ähnlich ein. Die Krümmung als ein Maß der wirkenden Kraft wird im Bereich der Behandlung von Potentialen besprochen. Unterschiede gibt es dann in der Ausführlichkeit, einerseits von Beschreibungen und andererseits bei der Anzahl von Grafiken und deren veranschaulichter Dimensionalität. In den Büchern wird jeweils erst das Potential im Gravitationsfeld und dann im elektrischen Feld behandelt. Der große Nutzen einer derartigen Veranschaulichung bzw. Verweise auf die Geometrie als Konzept werden leider nicht explizit angesprochen.

Des Weiteren behandelt jedes Buch die Minkowski-Diagramme zur geometrischen Veranschaulichung der Raumzeit und bietet einen Exkurs zur Allgemeinen Relativitätstheorie an. Diese Exkurse unterscheiden sich nur in ihrer Präzision der Diskussion, bspw. ob lediglich nur eine Erwähnung oder eine rechnerische Bestimmung der gravitativen Zeitdilatation stattfindet. Der Metzler und das Buch von Cornelsen

weisen hier wiederum eine größere Ausführlichkeit auf als die Übrigen.
Die Gemeinsamkeiten, sowie die Unterschiede, sind nun knapp zusammengefasst:

1. Metzler:

- Potential im Gravitationsfeld (3D- und 2D-Darstellung)
- Potential im E-Feld (Darstellung mehrerer Potentialkonfigurationen)
- Exkursion ART (Gauß -> Riemann -> Einstein) Äquivalenzprinzip, Experimentelle Test (Lichtablenkung, Uhreneffekt(auch mathematisch), Periheldrehung)

2. Cornelsen:

- Potential im Gravitationsfeld (2D (Erde ; Erde-Mond)-Potentiale)
- Potential im E-Feld (Feldlinien und Flächenladungsdichte von Kugel dargestellt), sonst keine Potentialkonfigurationen
- Exkursion ART (ähnlich wie im Metzler, zudem wird noch der Begriff der Geodäte eingeführt)

3. Impulse:

- Potential im Gravitationsfeld (Sehr wenig, nur ein Bild + eine Aufgabe)
- Potential im E-Feld (nur die Definition, keine Bilder oder ähnliches)
- Exkursion ART (1 Seite Text, ohne geometrische Veranschaulichung der Raumzeit)

4. Duden:

- Potential im Gravitationsfeld (Wenig, nur 2D-Darstellung der Erde)
- Potential im E-Feld (Eingang auf Feldstärke und Potentialverlauf, in einer Aufgaben wird auf ein Programm zur Feldlinien / Potential-Darstellung verwiesen)
- Exkursion ART (2 Seiten Text, ohne geometrische Veranschaulichung der Raumzeit)

5. Kuhn:

- Kein Potential im Gravitationsfeld
- Potential im E-Feld nur in Textform, ohne graphische Veranschaulichung
- Exkursion ART (2 Seiten Text, eine geometrische Veranschaulichung der Raumzeit (ähnlich zu Metzler und Cornelsen, nur viel knapper))

Exemplarische Zusatz- und Begleitmaterialien

Die Begleitmaterialien der betrachteten Schulbücher liefern, wie schon bei den vorangegangenen Konzepten, relativ wenig zur Unterstützung der Geometrisierung als Wechselwirkungskonzept.

Zwei Werke liefern Übungsmaterialien zu Potentialen. Hier wird bspw. der Lagrange-Punkt im Erde-Mond-System untersucht, wobei die waagerechte Tangente am Potentialverlauf zur geometrischen Auffindung der Gleichgewichtslage erwähnt wird. Des Weiteren gibt es Materialien zum Lesen und Erstellen von Minkowski-Diagrammen, wobei ein Werk darauf verweist, dass es aus didaktischen Gründen die Zeit, anders als die Fachwissenschaft, auf der Abszissenachse darstellt.

Das wohl einzig für die Geometrisierung Interessante liefert das Werk von Cornelissen, das viele Zusatzmaterialien zur Raumzeit-Krümmung und deren experimentellen Belegen liefert. Neben Herleitungen und historischen Texten wird mithilfe von Animationen und Videos die Lichtablenkung in der gekrümmten Raumzeit veranschaulicht.

Die Zusatzmaterialien [RAB11], [LAD02], [STA09] liefern zur Geometrisierung nichts.

Sichtweisen der universitären Fachdidaktik

Hauptaugenmerk werde ich auf die Aspekte der Visualisierung und der Mathematisierbarkeit legen. Die didaktischen Vorschläge der Physikdidaktik der Universität Hildesheim unter der Leitung von Ute Kraus und Corvin Zahn legen viel Wert auf die Anschauung. Das Projekt „Tempolimit Lichtgeschwindigkeit“ wird seit vielen Jahren immer weiter ausgebaut und stützt sich überwiegend auf Visualisierungen der Relativitätstheorie (SRT und ART). Der Grund: „Der bekannte Physiker und Lehrbuchautor Roman Sexl analysiert in seiner Arbeit *Relativitätstheorie als didaktische Herausforderung*, wie die ursprünglich als kaum verständlich betrachtete Theorie zunehmend lehrbar und einem breiten Verständnis zugänglich gemacht wurde. Sein Fazit im Jahr 1980 ist, dass nun geeignete audiovisuelle Medien entwickelt werden sollten, um weitere Fortschritte bei der Vermittlung der Relativitätstheorie zu machen“ [TEM05]. Zahlreiche Visualisierungen und Vorgehensvorschläge sind unter

<http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/>

zu finden. So können die Schülerinnen und Schüler simulativ bspw. in die Nähe eines Schwarzen Lochs fliegen und dort Vermessungen durchzuführen, um die Geometrie der Raumzeit zu analysieren.

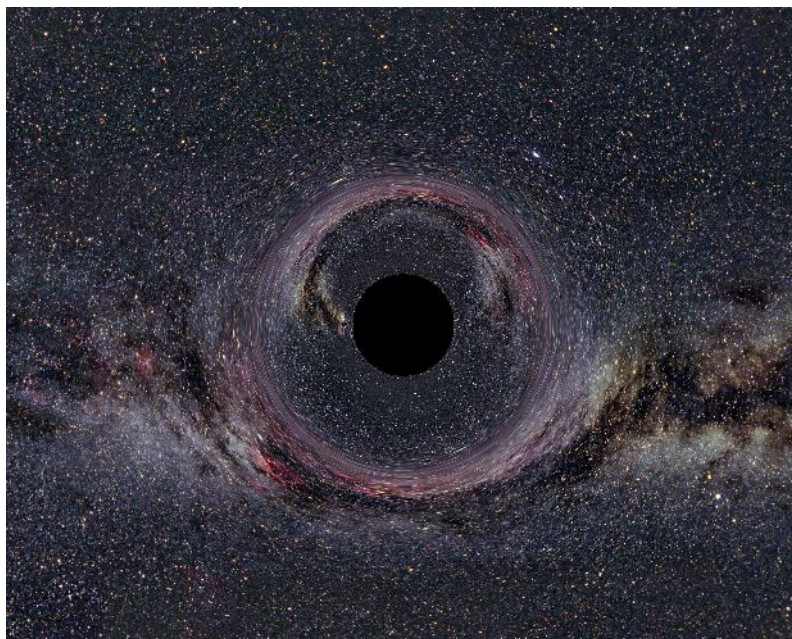


Abbildung 3.12.: Blick auf ein Schwarzes Loch von zehn Sonnenmassen aus einem Abstand von 3000 Kilometern. Das Bild entsteht, während das virtuelle Raumschiff einen konstanten Abstand zum Schwarzen Loch hält.[TEM05, (c)]

Neben der Erweiterung der Vorstellungskraft der Schülerinnen und Schülern wird hier dem doch sehr theoretischem Gebiet eine experimentelle Note verliehen. So können zusätzlich zu den sonst vorherrschenden Gedankenexperimenten, die historisch bedingt einen hohen Stellenwert haben und haben müssen - aber meist nur von den Leistungsträgern verstanden werden - relativistische Phänomene virtuell erlebt werden. Eine Förderung der etwas weniger Interessierten gelingt einerseits durch ikonische Darstellungsformen und andererseits mithilfe der Behandlung populärwissenschaftlicher Themengebiete, wie bspw. dem der Schwarzen Löcher. Des Weiteren sei an dieser Stelle auch auf das Internet verwiesen, wo viele kleine kostenlose Computerprogramme zur Verfügung stehen.⁴³ Diese bieten verschiedene adaptive Animationen zur Bewegung in der Raumzeit (Lichtablenkung, Periheldrehung, etc.).

Es gibt aber auch Veröffentlichungen, die eine mathematische Herangehensweise ausgesuchter Elemente der Allgemeinen Relativitätstheorie vorschlagen (vgl. [SCH02]). Hierunter zählen die Gravitations-Rotverschiebung, Gravitations-Zeitdilatation, die Lichtablenkung im Schwerefeld und das Verhalten von Maßstäben im Gravitationsfeld. Alle Elemente sind mit der Schulmathematik relativ problemlos zu bearbeiten. Das „relativ“ bezieht sich hierbei auf die nötige Zeit einer solchen Bearbeitung, aber bei Beschränkung auf ein bis zwei Aspekte ist es im Unterricht leistbar. Insgesamt gesehen werden von der aktuellen Fachdidaktik recht viele aufbereitete

⁴³bspw. www.mabo-physik.de gestaltet durch Matthias Borchardt

Materialien zur Verfügung gestellt, um den Schülerinnen und Schülern eine gute Einführung in die Allgemeinen Relativitätstheorie zu bieten.

3.5. Das Konzept der Austauschteilchen

Es ist alles möglich in diesem
Universum. Hauptsache es ist
genügend unvernünftig.

(Bohr)

Das Konzept der Austauschteilchen beschreibt die Wechselwirkung zwischen Körpern über den Austausch von Teilchen. Die Vermittlung der Kraftübertragung übernehmen in diesem Konzept Teilchen, die von Körpern ständig emittiert und absorbiert werden. Es steht im Einklang zum Feldkonzept, da man sich dadurch die Zustandsänderung des Raumes um einen Körper mit Hilfe von Feldteilchen vorstellen kann.

An dieser Stelle werden kurz einige grundlegenden Eigenschaften des Konzeptes vorstellen. Hierbei beschränke ich mich zunächst auf die bekannte elektromagnetische Wechselwirkung und werde auf die anderen Kräfte im historischen Kontext eingehen.

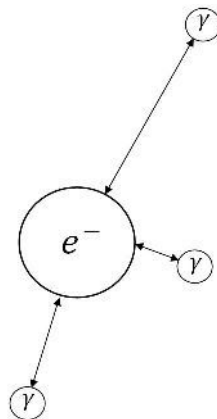


Abbildung 3.13.: Austauschteilchen in der QED. Energieärmere Photonen können sich weiter vom emittierenden Elektron entfernen (vgl. [SCH07, 8]).

Man kann sich vorstellen, dass ein Elektron im Rahmen der Quantenelektrodynamik ständig Photonen aussendet und absorbiert. Der hierbei augenscheinlich nicht erhaltene Energiesatz kann mit Hilfe der Heisenbergsche Unschärferelation zwischen Energie und Zeit aber im zeitlichen Mittel gesichert werden:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \quad (3.55)$$

Je nachdem wie viel Energie das Photon hat, hat es Δt Zeit, um vom Elektron weg- und wieder zurückzufliegen, ohne dass der Energiesatz verletzt wäre. Aus diesem Grund werden die Austauschteilchen auch virtuelle Teilchen genannt.

Emission und Absorption unterliegen in der Quantenmechanik einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Diese Wahrscheinlichkeit ist im Falle der elektromagnetischen Wechselwirkung:

$$\alpha = \frac{e^2}{2c\varepsilon_0 h} \approx \frac{1}{137} \approx 0,0073 \quad (3.56)$$

Wenn man in einem Gedankenexperiment Kurzaufnahmen von einer Elementarladung machen würde, wäre auf jedem 137. Bild ein Photon zu sehen (vgl. [MET98, 532]).

Diese ausgesendeten Photonen müssen nicht immer zwangsläufig zum Elektron zurückkehren. Wenn ein anderes geladenes Teilchen in die Nähe dieses Elektrons kommt und die Reichweite der ausgesendeten Photonen groß genug ist, kann das Photon auch von diesem Teilchen absorbiert werden. Somit findet eine elektromagnetische Wechselwirkung statt.

Die eben erwähnte Wahrscheinlichkeit α wird auch Kopplungskonstante genannt, sie ist somit ein Maß für die Stärke einer Kraft. Schlussfolgernd lässt sich somit sagen, dass man bei anderen Kräften auch andere Konstanten hat.

Der erfolgreiche Werdegang dieses Konzeptes lässt sich damit erklären, dass man viele Faktoren einer Wechselwirkung mit einem einheitlichen mathematischen Modell in Beziehung setzen kann, um die wirkende Kraft möglichst genau zu beschreiben. Ein paar Beispiele, die in Beziehung zu der Kopplungsstärke α stehen.

- Die Masse des Austauschteilchen ($m_T \leftrightarrow \alpha$)
- Die Lebensdauer eines Zustandes ($\tau \leftrightarrow \alpha$)
- Die Reichweite einer Wechselwirkung ($R \leftrightarrow \alpha$)

Dadurch, dass alle in Beziehung zu der Kopplungsstärke stehen, stehen sie auch untereinander in Beziehung. Somit kann man mittels dieses Wechselwirkungskonzeptes viele Parameter gegenseitig überprüfen und erklären.

3.5.1. Historische Entwicklung

Die Anfänge dieses Konzeptes lassen sich, wie schon beim Kraftkonzept, in der griechischen Antike finden. Zwar wird hier nicht direkt von Feldteilchen gesprochen, aber zu dieser Zeit wurden die ersten Ideen zum Aufbau und Zusammenhalt der Materie formuliert.

Demokrit und Leukipp

Der bedeutende Naturphilosoph und Atomist *Demokrit* (ca. 460-400 v. Chr.) (vgl. [STU79, 13 ff.] und [HOE84, 53]) wurde durch Gedankenexperimente dahin geleitet, kleinste Teilchen als Grundbausteine der Materie zu postulieren.

Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome und leeren Raum. [CAP35, 135]

Diesen auch schon bei Demokrits Lehrer *Leukipp* (Anf. 5. Jahrh. v. Chr.) gefunden Gedanken baute Demokrit weiter aus. Die Teilchen oder Atome⁴⁴ sollten massiv sein und unterschiedliche geometrische Formen haben, wodurch sich die verschiedenen Verhaltensweisen der Materie ergeben würden. Die Atome sollten durch Haken und Ösen Verbindungen miteinander eingehen können.

Diese Objekte kann man in sehr grober Näherung als erste Vorstellung von Teilchen verstehen, die für den Zusammenhalt der Materie sorgen. Dieser Gedanke scheint heute etwas absurd zu sein und auch damals wurde dieses Konzept verworfen, da eine Überprüfung nicht möglich war.

Es verging sehr viel Zeit, bis dieses Konzept wieder aufgegriffen wurde.

Nicolas Fatio de Duillier, Georges-Louis Le Sage

Nachdem Newton sein berühmtes Gravitationsgesetz veröffentlicht hatte, waren viele Gelehrte im 17. und 18. Jahrhundert der darin inbegriffenen Fernwirkungstheorie sehr abgeneigt. So wurde zuerst von *Nicolas Fatio de Duillier* (1664 - 1753) versucht, ein mechanistisches Erklärungsmodell zu entwickeln, welches die Grundannahmen über die Gravitation von Newton erfüllt (Die Proportionalitäten zu den Massen und zum reziproken Abstandsquadrat). Später wurde diese Theorie auch von weiteren namhaften Vertretern, bspw. *Georges-Louis Le Sage* (1724 - 1803) und *Lord Kelvin* (1824 - 1907) weiterentwickelt.

Die Theorie ist bekannt unter der „Stoßtheorie der Gravitation“ oder auch „Le-Sage-Gravitation“. Sie geht im Grunde davon aus, dass der Raum ausgefüllt ist mit unsichtbaren Teilchen, die sich sehr schnell in jegliche Richtung geradlinig bewegen. Wenn diese Teilchen auf einen Körper im Raum treffen, übertragen sie einen Impuls auf ihn. Da er von allen Seiten gleichmäßig „beschossen“ wird, befindet er

⁴⁴aus dem griechischen *átomos* = unzerscheidbar

sich in einem Gleichgewicht und ruht (vgl. 3.14 a). Wenn sich aber ein zweiter Körper im Raum befindet, würde dieser einen Teil der Teilchen abschirmen und somit erfährt der erste Körper aus der Richtung des zweiten einen geringeren Impuls. Durch das aufgebrochene Gleichgewicht würde sich nun der erste in Richtung des zweiten Körpers bewegen. Die Abschirmung erfolgt natürlich auch umgekehrt vom ersten Körper in Richtung des Zweiten. Es entsteht folglich eine anziehende Kraft zwischen beiden Körpern (vgl. 3.14 b). Da diese Wechselwirkung aufgrund von Teilchen geschieht, ist sie die erste Theorie, die das Konzept von Austauschteilchen zur Erklärung heranzieht.

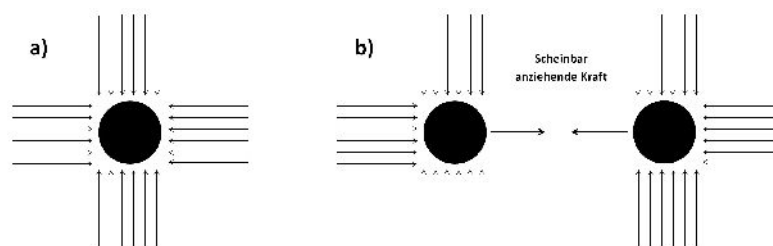


Abbildung 3.14.: Mechanische Gravitationstheorie: **a** Ausgleich der Impulse der auftreffenden Teilchen, der Körper bleibt somit in Ruhe. **b** Körper schirmen sich gegenseitig einen Teil der Teilchen ab, es entsteht eine scheinbar anziehende Kraft zwischen ihnen.

Auch zu damaligen Zeiten gab es Kritiker dieser Ansicht, darunter *J.C. Maxwell*. Heute gilt diese Theorie als überholt. Zur Beschreibung der Gravitation wird die Allgemeine Relativitätstheorie eingesetzt, die die vonstattengehenden Wechselwirkungen mithilfe des Geometrisierungskonzeptes beschreibt.

Nachdem der Atomaufbau grob verstanden war, kam Ende der zwanziger Jahre des 20. Jahrhunderts die Frage nach dem Zusammenhalt der positiv geladenen Protonen und der neutralen Neutronen im Atomkern auf. Eigentlich müssten sich die Protonen mittels Coulombkraft abstoßen, bzw. die Neutronen elektrostatisch kraftlos sein. Da dies im Atomkern nicht der Fall ist, heißt dies, dass es eine kurzreichweitige Kernkraft geben muss, die stärker als die elektrische Coulombabstoßung ist und auch elektrisch neutrale Neutronen aneinander bindet.

Hideki Yukawa

Dem theoretischen Physiker *Hideki Yukawa* (1907-1981) war bekannt, dass zwischen elektrisch neutralen Atomen eigentlich keine Kräfte wirken sollten, sie sich aber bei sehr kleinen Abständen zu Molekülen bilden können, wobei die Bindung über Elektronen der äußersten Schale geschieht. Somit fungiert das Elektron als Bindeteilchen. Diese Idee nahm Yukawa auf und postulierte Teilchen, die jedes Nukleon umgeben und über deren Austausch die Kernkräfte entstehen (vgl.[HOE84, 224 ff.]). Durch

mathematische Überlegungen⁴⁵ konnte Yukawa diesem Bindeteilchen eine Masse zuordnen, die dreihundertmal größer als die des Elektrons ist. Die Bindung geschieht durch den elektrischen Ladungsaustausch von Protonen und Neutronen. Je nachdem, ob ein Proton in ein Neutron, ein Neutron in ein Proton oder auch Protonen in Protonen, Neutronen in Neutronen übergehen, sollte dieses Teilchen aufgrund der Ladungserhaltung in einer negativen, positiven oder neutralen Ladungskonfiguration auftreten. Dieses Teilchen wurde *Yukawa*-Teilchen genannt und ist heute bekannt als Pion (π).

Da die Nukleonen beliebig viele *Yukawa*-Teilchen aussenden und einfangen können, musste diesem ein ganzzahliger Spin zugeordnet werden, da man das *Pauli-Prinzip* nicht verwerfen wollte (vgl. [HOE84, 228]).

Donald H. Perkins

Ende 1947 wurde das postulierte *Yukawa*-Teilchen in der Höhenstrahlung von dem britischer Experimentalphysiker *Donald H. Perkins* (1925 - heute) nachgewiesen. Durch diese experimentelle Bestätigung wurde die Idee der Bindeteilchen weiter gestärkt.

Dyson, Feymann, Schwinger und Tomonaga

Aber auch schon vor dem direkten Nachweis wurde dieses Wechselwirkungskonzept weiter ausgebaut. So wurde in der hervorragend funktionierenden Quantenelektrodynamik (kurz *QED*), die die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt, das Photon als Feldteilchen herangezogen. Das Photon koppelt hierbei an die elektrische Ladung der beteiligten Teilchen, wobei die Stärke dieser Kopplung gleich der schon seit 1916 bekannten Sommerfeldschen Feinstrukturkonstante⁴⁶ α ist. Die *QED* wurde 1944 von *Freeman Dyson* (1923 - heute), *Richard P. Feymann* (1918 - 1988), *Julian Schwinger* (1918 - 1994) und *Shin'ichirō Tomonaga* (1906 - 1979) entwickelt und zählt zu den experimentell bestnachgewiesenen Theorien der Physik⁴⁷. Hiermit war es nun möglich, alle Erscheinungen, die im Zusammenhang mit geladenen Teilchen, beispielsweise Elektronen und Positronen entstehen, mithilfe von Photonen exakt zu beschreiben. Vorher konnte man noch nicht in befriedigender Weise die Entstehung und Auslöschung (Annihilation) von Teilchen erklären. Neben der guten

⁴⁵Ausgehend von der Energieunschärfe $E \cdot t \approx \hbar$ und der Reichweite $R \leq c \cdot t$, bei Annahme, dass das Teilchen sich nicht schneller als Licht bewegt und die Reichweite ungefähr dem Radius des Protons entspricht ($R \approx 1,3 \text{ fm}$), kommt man durch kleine Umformungen auf $\frac{\hbar}{R \cdot c} \leq m_{Yuk} \approx 2,7 \cdot 10^{-28} \text{ Kg} \approx 150 \frac{\text{MeV}}{c^2}$.

⁴⁶*Arnold Sommerfeld* führte sie zur Beschreibung der Aufspaltung der Wasserstoffspektrallinien ein, sie gibt das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit des Elektrons in der kleinsten Bahn und der Vakuumlichtgeschwindigkeit an. Zahlenmäßig ist sie: $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = 7,297353 \cdot 10^{-3} \approx \frac{1}{137}$ (vgl. [GRA88, 213]).

⁴⁷Feymann, Schwinger und Tomonaga erhielten 1965 den Nobelpreis in Physik für ihre Arbeiten an der QED

Beschreibung, beispielsweise durch Feynmann-Diagramme, konnten auch sehr genaue Berechnungen gemacht werden. So ist eines der besten Ergebnisse der Landé-Faktor des Elektrons ($g_{e^-, theo} = 2,0023193048(8)$) [PDG10], der auf 10 Nachkommastellen mit dem experimentellen Wert übereinstimmt.

Wie schon bei der Speziellen Relativitätstheorie und Allgemeinen Relativitätstheorie im Geometrisierungskonzept gilt auch hier der klassische Fall als Näherung weiterhin. Das heißt, die Elektrodynamik nach Maxwell ist bei Betrachtung von starken elektromagnetischen Feldern, sprich im makroskopischen Bereich, ein Grenzfall der QED und liefert passende kontinuierliche Werte.

$$QED \xrightarrow[\text{starke Felder}]{\text{Grenzfall}} Maxwell$$

Enrico Fermi

Der Kernphysiker *Enrico Fermi* (1901 - 1954) entwickelte 1933 eine „Theorie der β -Strahlen“. In seiner neuen Quantentheorie versuchte er die radioaktiven Betazerfälle mittels einer schwachen Kraft bzw. schwachen Wechselwirkung zu erklären (vgl. [BRA11, 75]). Sie wurde schwach genannt, da sie nur über sehr kleine Abstände hinweg wirkt. Da diese Theorie in der Anfangsphase der Etablierung des Austauschteilchenkonzeptes aufgestellt wurde, hatte Fermi noch keine Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung vorhergesehen.

Einige Jahre später wollte der Begründer des Konzeptes *Hideki Yukawa* auch für diese neue Kraft Feldteilchen finden. Er nahm an, dass die schwache Kraft eine Reichweite von ca. $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$ habe. So konnte er wieder mittels der Heisenbergschen Unschärferelation eine Masse von $m \geq 80 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ und eine relative Stärke von $\alpha_w \approx 10^{-6}$ abschätzen⁴⁸. Das war erstaunlich, da die Masse des Austauschteilchens wesentlich größer als die Nukleonenmasse ist (vgl. [DEM10, 203]).

Weitere Untersuchungen blieben erst einmal aus. Erst eine Vereinheitlichung von Wechselwirkungen führte zu einem Wiederaufleben der Erforschung der schwachen Feldteilchen.

Sheldon Glashow, Abdus Salam und Steven Weinberg

Durch den großen Erfolg der QED, die als Grundlage das Konzept der Austauschteilchen hatte, wurde mithilfe dieses Konzeptes versucht, die Vereinheitlichung von Wechselwirkungen weiter voranzutreiben. Gelungen ist dies 1967 den theoretischen Physikern *Sheldon Glashow* (1932 - heute), *Abdus Salam* (1926 - 1996) und *Steven Weinberg* (1933 - heute). Mit ihrer Vereinheitlichung der elektromagnetischen Wechselwirkung und *Fermis* Theorie der schwachen Wechselwirkung zur elektroschwachen Theorie oder auch GWS-Theorie^{49 50} genannt, wurden aber vier Austauschteilchen

⁴⁸ w bei α_w für weak = schwach

⁴⁹GWS, nach den Begründern dieser Theorie (Glashow, Weinberg und Salam)

⁵⁰Eben genannte erhielten für ihre Leistungen an der GWS-Theorie 1979 den Nobelpreis für Physik

benötigt. Eins davon ist das bekannte Photon aus der QED, die anderen drei Teilchen - W^+ , W^- und Z^0 - sind die vorausgesagten Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung. Auch bei dieser Theorie war es möglich, sehr genaue theoretische Werte zu ermitteln, aber eine direkte experimentelle Bestätigung dieser Teilchen dauerte noch zwei Jahrzehnte, da die vorausgesagten Massen der Teilchen so hoch waren und da es noch keine technischen Möglichkeiten zur Auffindung gab.

Da Feldteilchen immer an eine Ladung koppeln, wurde für die schwache Wechselwirkung die schwache Ladung definiert.

Für die Vereinigung musste es unweigerlich auch einen Zusammenhang zwischen den Kopplungen geben, da diese erheblich differieren (10^{-2} zu 10^{-6}). Diesen Zusammenhang entdeckte Steven Weinberg mittels dem nach ihm benannten *Weinberg-Winkel* [POV04, 163 ff.]:

$$\alpha_w = \frac{\alpha_{em}}{\sin^2(\theta_W)} \quad (3.57)$$

Dieser, auch Mischungswinkel⁵¹ genannt, ergibt sich aus dem Massenverhältnis der schwachen Feldteilchen.

$$\cos(\theta_W) = \frac{M_W}{M_Z} \Leftrightarrow \theta_W \approx 28,74^\circ \quad (3.58)$$

André Lagarrigue

Etwa ein Jahrzehnt später 1973 gelang es Physikern unter der Leitung von *André Lagarrigue* (1924 - 1975) einen indirekten Nachweis des Z^0 -Bosons zu erbringen. Im CERN wurde in der Blasenkammer GARGAMELL folgende Reaktion mittels Rückstoß eines Elektrons beobachtet:

$$\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{Z^0} \bar{\nu}_\mu + e^- \quad (3.59)$$

Diese Reaktion konnte nur mit einem neutralen Austauschteilchen erklärt werden, das aber wegen der Kopplung an das elektrisch neutrale Neutrino⁵² kein Photon sein konnte (vgl. [SCH95, 94 f.]). Diese Reaktionen nennt man Neutrale Ströme oder auch *NC*-Reaktionen (Neutral Current), da in ihnen keine Ladungsverschiebung stattfindet. Die geladenen Ströme oder auch *CC*-Reaktionen (Charged Current) werden mittels den elektrisch geladenen $W^\pm$ Feldteilchen erklärt, beispielsweise in der Reaktion

$$\bar{\nu}_\mu + e^- \xrightarrow{W^-} \nu_e + \mu^- \quad (3.60)$$

in denen ein Ladungsaustausch erfolgt.

⁵¹Warum dies ausgerechnet ein Winkel ist, scheint zunächst verwirrend und hat einen komplizierten mathematischen Hintergrund. Zur Beschreibung der Teilchen wird eine mathematische Gruppe von Drehungen benutzt, wodurch sich hier ein Winkel als Verknüpfung ergibt.

⁵²Neutrinos sind Teilchen, die nur schwach wechselwirken können.

Carlo Rubbia, Peter McIntyre und David Cline

Die GWS-Theorie sagte für die Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung sehr hohe Massen voraus ($M_{W^\pm} \approx 80 \text{ GeV}$, $M_{Z^0} \approx 90 \text{ GeV}$). Bis dato gab es aber keine Möglichkeit, solch hohe Energien zu erreichen, so schlugen 1976 *Carlo Rubbia* (1934 - heute), *Peter McIntyre* und *David Cline* vor, den Super-Protonen-Synchrotron (SPS) in Cern umzubauen, sodass bei gegenläufigen Protonenstrahlen eine Schwerpunktenergie beim Zusammenstoß von 540 GeV erreicht wurden.

Dieses Vorhaben wurde 1981 in Cern realisiert und ab 1982 konnten die ersten Experimente starten.

1983 wurden dann die ersten reellen Feldteilchen im SPS in folgenden Reaktionen entdeckt:

$$\begin{aligned} q + \bar{q} \rightarrow W^\pm &\rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) \\ &\rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) \end{aligned} \quad (3.61)$$

$$\begin{aligned} q + \bar{q} \rightarrow Z^0 &\rightarrow e^+ + e^- \\ &\rightarrow \mu^+ + \mu^- \end{aligned} \quad (3.62)$$

Beim Zusammenstoß von Proton und Antiproton treffen Quark (q) und Antiquark ($\bar{q}$) aufeinander. Bei ihrer Auslöschung entsteht für kurze Zeit ein Austauschteilchen, welches unmittelbar zerfällt. Die dabei gebildeten Teilchen teilen sich dessen Masse und fliegen mit jeweils 40 bzw. 45 GeV Energie auseinander (vgl. [BET91, 258 f.]).

Murray Gell-Mann, Yuval Ne'eman, George Zweig und Harald Fritzsch

In den fünfziger und sechziger Jahren wurden die ersten großen Protonenbeschleuniger gebaut und die Messtechnik wurde immer weiter verfeinert. So entdeckte man eine Vielzahl an neuen Teilchen und verlor bald den Überblick bei deren Kategorisierung. Auch die theoretischen Physiker waren in einer misslichen Lage, da sie kein passendes Modell zur Erklärung fanden. Es kamen einige Mutmaßungen auf, dass die ganzen gefundenen Teilchen gegebenenfalls gar keine elementaren Teilchen wären, sondern stattdessen aus einem kleinen Satz von Grundteilchen aufgebaut seien könnten. Die Leitidee war dabei das Prinzip der strukturellen Einfachheit, die schon bei vielen anderen Theorien Pate gestanden hat.

Bevor diese Idee weiter ausgebaut wurde, versuchten die Physiker *Murray Gell-Mann* (1929 - 2019) und *Yuval Ne'eman* (1925 - 2006) unabhängig voneinander die gefundenen Teilchen in Supermultipletts einzuteilen, welches mit der speziellen Gruppe $SU(3)$ theoretisch wunderbar funktionierte. Diese Theorie wurde auch der „Achtfache Weg“⁵³ genannt.

⁵³ „Die Gruppe der speziellen Transformationen $SU(3)$ läßt sich durch 8 dreidimensionale linear unabhängige, hermitesche Matrizen erzeugen. Ihnen sind durch Vertauschungsrelationen 8 Gruppenkonstanten zugeordnet. Wegen dieser 8 charakteristischen Parameter der $SU(3)$ -Gruppe

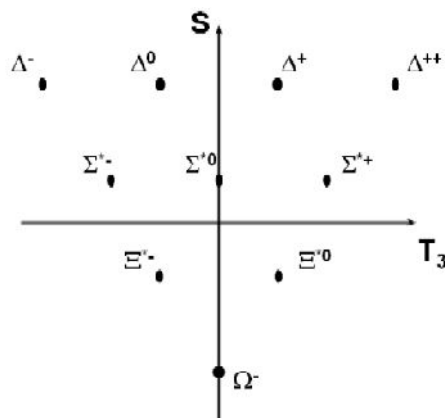


Abbildung 3.15.: Dekuplett von Baryonen

Eine Bestätigung der $SU(3)$ -Klassifikation gab es 1964 im Brookhaven National Laboratory (USA)[BAR64]. Hier wurde das Ω^- -Teilchen gefunden, welches alle vorhergesagten Eigenschaften erfüllte und das vorgeschlagene Dekuplett vollendete.

Verwunderlich an diesem theoretischen Konstrukt war nur, dass man in der Natur nur Singulettes, Oktettes und Dekuplettes fand, obwohl aus mathematischer Sicht auch Triplettes und Sextettes möglich wären. So kam schnell die Vermutung einer tieferen physikalischen Struktur auf, die dieses Geheimnis zu lüften vermag.

Murray Gell-Mann und *George Zweig* (1937 - heute) fanden 1963 unabhängig von einander eine mögliche Interpretation. Sie nahmen an, dass all die gefundenen Teilchen⁵⁴ aus fundamentalen Bausteinen mit drittelzahliger Ladung, die Gell-Mann „Quarks“ nannte, aufgebaut sind [HIL96, 45]. Damals reichten drei verschiedene Arten Quarks (u , d , s), jeweils mit ihren Antiteilchen, um alle bekannten Hadronen aufzubauen.

Aber um das Quarkmodell weiter zu bestätigen musste noch ein Problem behoben werden. Das eben erwähnte Ω^- besteht aus drei s -Quarks. Diese Quarks haben den gleichen Spin am selben Ort, welches das *Pauliprinzip* eigentlich nicht zulassen würde. Da man dieses Prinzip nicht mit Ausnahmen behaften wollte, wurde in den siebziger Jahren von *Murray Gell-Mann* und *Harald Fritzsch* (1943 - heute) ein Farbkonzept vorgeschlagen. Den Quarks wurde somit ein weiterer Freiheitsgrad zugeordnet, die Quantenzahl „Farbe“. So wie die elektrische Ladung die elektromagnetische Wechselwirkung verursacht, ist die Farbladung die Ursache für die starke Wechselwirkung. Es gibt drei verschiedene Farben und - entsprechend den Vorzeichen bei der elektrischen Ladung - ihre Antifarbe⁵⁵.

wurde in Assoziation der buddhistischen Heilslehre, wonach der Pfad der Überwindung des Leidens über 8 Stufen in einen Zustand vollkommener Versenkung führt, vom „achtfachen Weg“ gesprochen“[HIL96, 45].

⁵⁴Hiermit sind nur Hadronen gemeint, $e^\pm$ und $\mu^\pm$ kamen nicht in der $SU(3)$ vor.

⁵⁵Meist verwendet man die Grundfarben der additiven Farbmischung - „rot“, „grün“ und „blau“ - wobei allerdings betont werden muss, dass es sich nicht um Farben im makroskopischen Sinne

Da die Quarks nicht alleine auftreten können, müssen sie äußerst stark zusammengehalten werden, d.h. die Kopplungskonstante zwischen den Farbladung bzw. die relative Stärke der starken Kraft beträgt ungefähr eins ($\alpha_s \approx 1$)⁵⁶.

In Anlehnung an die QED, die die elektromagnetische Kraft zwischen zwei Ladungsträgern über den Austausch von Photonen erklärt, wurde 1973 im Rahmen des Austauschteilchenkonzeptes die Gluonen⁵⁷ als Feldteilchen der starken Kraft eingeführt. Die Theorie dahinter heißt QCD (Quantenchromodynamik). Das Gluon sollte - wie das Photon - masselos sein, aber aufgrund der Dreifachheit der Farbladung und der Vorgabe der Farbsymmetrie musste es selbst eine Ladung tragen. Bei genauerer Betrachtung von starken Wechselwirkungen muss es sogar zwei Farben zugleich aufweisen und zwar Farbe und Antifarbe. Um alle möglichen Phänomene zu erklären, bedarf es somit 8 verschiedener Gluonen. Diese sind $r\bar{b}$, $r\bar{g}$, $g\bar{r}$, $g\bar{b}$, $b\bar{r}$, $b\bar{g}$ und die beiden farbneutralen Kombinationen $\frac{1}{\sqrt{2}}(g\bar{g} - r\bar{r})$ und $\frac{1}{\sqrt{6}}(g\bar{g} + r\bar{r} - 2b\bar{b})$ [POV04, 109].

Da die Gluonen selbst eine Farbladung tragen, können sie nicht nur - wie das Photon in der em-Kraft - von den Quarks emittiert und absorbiert werden, sie können zusätzlich auch mit sich selbst wechselwirken. Daraus folgt, dass diese Feldteilchen selber Quellen ihres Feldes sind. Dieser Umstand macht die QCD weitaus komplexer und mathematisch anspruchsvoller als die QED (vgl. [HIL96, 104]).

Sechs Jahre nachdem die Gluonen vorgeschlagen wurden, hat man sie 1979 im Speicherring PETRA am DESY in Hamburg in 3-Jet-Ereignissen nachgewiesen (vgl. [KUH01a, 195]). Mit dieser Bestätigung wurde schließlich auch das *Yukawa*-Teilchen nicht mehr als Austauschteilchen der Kernkraft benötigt, da die Nukleonen durch Restwechselwirkung der starken Wechselwirkung, also durch Gluonen, aneinander gebunden werden.

Da dieses Konzept so wunderbar funktioniert, soll auch die Gravitation - als übrig gebliebene Wechselwirkung - mittels Feldteilchen erklärt werden. Dieses hypothetische Teilchen wird Graviton genannt, wurde aber bis heute nicht entdeckt.

Die große Vereinheitlichung

Aufgrund des großen Erfolges des Austauschteilchenkonzeptes wird versucht, auf seiner Grundlage die große Vereinheitlichung der Wechselwirkung weiter voran zu treiben. Gegenwärtig ist durch dieses Konzept die Verbindung zwischen der elektromagnetischen und der schwachen Kraft zur elektroschwachen Kraft gelungen.

handelt; gewisse Regeln lassen sich aber in Analogie zur Farbenlehre in der Optik anschaulich darstellen. So wird das bei den Quarks auftretende „Confinement-Phänomen“ (Quarks kommen nie isoliert vor, d.h. es gibt sie nur in Bindungszuständen), als Verbot nicht farbneutraler Zustände erklärt: Es müssen sich stets die drei verschiedenen Farben oder eine Farbe mit ihrer Antifarbe (Komplementärfarbe) zu Weiß addieren

⁵⁶vgl. hierzu die relative Stärke 3.56

⁵⁷aus dem englischen glue = Kleber.

Der nächste Schritt soll nun die Vereinheitlichung der elektroschwachen mit der starken Wechselwirkung zur *GUT* (**G**rand **U**nified **T**heory) sein.

In erster Linie lässt sich vermuten, dass durch die unterschiedlich großen Kopplungskonstanten, die die Stärke der Kraft widerspiegeln, eine Vereinheitlichung zu einer einzigen Wechselwirkung unmöglich erscheint. Aber man erkannte, dass diese Größen nicht konstant sind.

Bei zunehmender Energie

- nimmt die elektromagnetische Kopplung zu ($\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$)
- und die starke Kopplung nimmt ab ($\alpha_s \approx 1$).

Aufgrund der Tatsache, dass die schwache und die elektromagnetische Kraft derselben Eichsymmetrie unterliegen, wird vermutet, dass auch die schwache Kopplung ($\alpha_w \approx 10^{-6}$) bei zunehmender Energie steigt.

Wenn man diesen Gedanken weiter ausbaut, kommt man zur Vermutung, dass die drei unterschiedlichen Kopplungen konvergieren könnten, also alle dieselbe Stärke im Grenzfall annehmen. Diese große Vereinigung der Kräfte wäre demnach bei Energien zwischen 10^{15} und 10^{16} *GeV* erreicht, diese Energiebeträge liegen um ca. 12 Zehnerpotenzen höher als die heute erreichbaren Beschleunigungsenergien. Erwartet werden hierbei folgende Verhältnisse der Kopplungen (vgl. [HIL96, 199 ff.]):

$$\frac{5}{3}\alpha_{em} = \alpha_w = \alpha_s \approx \frac{1}{40} \quad (3.63)$$

Bei einer Einbeziehung der vierten verbliebenen Wechselwirkung, der Gravitation, welche beispielsweise im Rahmen der Supersymmetrie beschrieben wird, müssen sogar noch größere Energien erreicht werden, die im Bereich der *Planck*-Energie von ca. 10^{19} *GeV* liegen.⁵⁸

Wegen dieser hohen Energien werden experimentelle Bestätigungen wohl noch einige Zeit auf sich warten lassen. Aber Theorien zur Beschreibung einer großen Vereinheitlichung mit Hilfe des Austauschteilchenkonzeptes gibt es schon jetzt.

⁵⁸Die Schwierigkeit erkennt man auch relativ schnell bei Betrachtung der relativen Stärke, die mit $\alpha_g = \frac{G \cdot m_{el}^2}{\hbar c} \approx 10^{-39}$ etwa 10^{37} mal schwächer als die elektromagnetische Wechselwirkung ist.

Zusammenfassung

Somit lassen sich nun alle Wechselwirkungen mit ihren jeweiligen Austauschteilchen folgendermaßen zusammenstellen.

Wechselwirkung	Austauschteilchen	Masse [$\frac{GeV}{c^2}$]	Relative Stärke	Koppelt an
elektromagnetisch	1 Photon γ	0	$\alpha_{em} \approx 10^{-2}$	elektr. Ladung
schwach	3 Weakonen W^+, W^-, Z^0	80,4 80,4 91,2	$\alpha_w \approx 10^{-6}$	schwache Ladung
stark	8 Gluonen g	0	$\alpha_s \approx 1$	Farbladung
Gravitation	Graviton G (hypothetisch)	0	$\alpha_g \approx 10^{-39}$	Masse

Tabelle 3.7.: Liste der Wechselwirkungen mit ihren jeweiligen Austauschteilchen und Eigenschaften (Werte aus [PDG10, 8 ff.])

3.5.2. Fachwissenschaftliche Sicht

Alle Elementarteilchen sind aus derselben Substanz, aus demselben Stoff gemacht, den wir nun Energie oder universelle Materie nennen können; sie sind nur verschiedene Formen, in denen Materie erscheint.

(Heisenberg)

Das moderne Austauschteilchenkonzept entstand im Rahmen der Entwicklung einer Quantenfeldtheorie. Diese beschreibt die Elementarteilchen als Feldquanten. Sie sollen gequantelte Anregungszustände eines Feldes sein, wodurch auch der Name Quantenfeldtheorie herrührt. Somit stellt sie eine Weiterentwicklung der Quantenmechanik dar, weil sie nicht nur Teilchen, sondern auch Felder quantisiert. Die Quantisierung der Felder bezeichnet man auch oft als *Zweite Quantisierung*⁵⁹.

Wie schon in der Quantenmechanik finden die Berechnungen im Hilbertraum mithilfe von Operatoren statt. Die wichtigsten unter Ihnen sind, da man von Anregungen eines Feldes spricht, der Aufstiegsoperator $\hat{c}^\dagger$, der Abstiegsoperator $\hat{c}$ und der Hamiltonoperator $\hat{H}$ (vgl. [BLE10, 388]). Letzterer steht für die Zeitentwicklung und die möglichen Energieeigenwerte eines physikalischen Systems. Die Verknüpfung von $\hat{c}^\dagger$ und $\hat{c}$ ergibt den Anzahloperator $\hat{n}$:

$$\hat{n} = \hat{c}^\dagger \hat{c} \quad (3.64)$$

Wie der Name schon sagt, gibt dieser die Anzahl von Teilchen an, die ein Energieniveau von $|n\rangle$ aufweisen.

Die eigentliche Entwicklung des Austauschteilchenkonzeptes erfolgte zunächst im Rahmen der Quantenelektrodynamik. Im Weiteren beziehe ich mich auf [BLE10, 397 ff.].

Zu Beginn geht man von einem absolut leeren Raum aus, dem Vakuum. Das Vakuum bekommt den Zustandsvektor $|\mathbf{O}\rangle$. In diesem soll es nun Teilchen geben, die gequantelte Anregungszustände eines Feldes sind. Dafür bedarf es eines Erzeugungsoperators $\hat{a}_k^\dagger$, der ein Teilchen $|k\rangle$ in einem Zustand k erzeugt.

$$|k\rangle = \hat{a}_k^\dagger |\mathbf{O}\rangle \quad (3.65)$$

Äquivalent kann mit dem Vernichtungsoperator $\hat{a}_k$ ein Teilchen vernichtet werden.

$$\hat{a}_k |k\rangle = |\mathbf{O}\rangle \quad (3.66)$$

⁵⁹Die „klassische“ Quantenmechanik wird als *Erste Quantisierung* angesehen.

Durch mehrmalige Ausführung dieser Operatoren können mehrere Teilchen erzeugt bzw. vernichtet werden.

Nun wird der Hamiltonoperator formuliert, um ein physikalisches System beschreiben zu können. Dieser setzt sich zusammen aus der Besetzungszahl (vgl. 3.64) $\hat{n}_A = \hat{a}_A^\dagger \hat{a}_A$ eines Zustandes A und den Energie-Eigenzuständen des 1-Teilchensystems, diese Eigenwerte werden mit $E(k)$ bezeichnet. So wird der Hamiltonoperator eines freien Teilchens im Zustand $|k\rangle$ (Wechselwirkungen unter den Teilchen werden nicht beachtet) zu:

$$\hat{H}_{\text{freies T.}} = \sum_k E(k) \hat{a}_k^\dagger \hat{a}_k \quad (3.67)$$

Für ein freies Photon hat er folgende Gestalt:

$$\hat{H}_{\text{Photon}} = \sum_p \hbar \omega_p \hat{a}_p^\dagger \hat{a}_p \quad (3.68)$$

So hätten wir „für eine Welt, in der es Elektronen und Photonen, aber (noch) keine Wechselwirkung zwischen ihnen geben soll“ [BLE10, 399] den folgenden Hamiltonoperator:

$$\hat{H}_0 = \hat{H}_{\text{freie e}^-} + \hat{H}_{\text{Photon}} \quad (3.69)$$

Nun müssten Wechselwirkungsoperatoren gebaut werden. Für einen Quantensprung eines Elektrons unter Emission eines Photons sähe dieser so aus:

$$\hat{H}_{\text{Emission}} = \hat{a}_{A'}^\dagger \hat{a}_A \hat{c}_p^\dagger \quad (3.70)$$

Hier fällt ein Elektron von Zustand A in Zustand A' und sendet (erzeugt) dabei ein Photon aus. Äquivalent gibt es einen Absorptionsoperator $\hat{H}_{\text{Absorption}} = \hat{a}_A^\dagger \hat{a}_{A'} \hat{c}_p$. Man müsste/könnte so auch Operatoren für Stöße zwischen Elektronen, zwischen Elektronen und Photonen, zwischen unterschiedlichen Teilchen usw. aufbauen. Es gibt aber eine exorbitante Vielzahl von möglichen Prozessen und jede von ihnen müsste durch einen passenden Operator dargestellt werden, um eine Berechnung durchführbar zu machen. Eine solche Theorie mit einer Unzahl an Rechenvorschriften würde aber praktisch nicht durchführbar sein. Auf Grundlage dieses Problems kam man zu einer sehr genialen und recht einfachen Idee.

Der elementare Prozess der em-Wechselwirkung ist das Erzeugen oder Vernichten eines Photons.

Das ist die Geburt des Austauschteilchenkonzeptes, es entstand auf Grundlage der Einfachheit zur Beschreibung von Wechselwirkungen und bedeutet nebenher „nichts weniger als die Behauptung, die moderne Physik könne erklären, auf welche Weise eine Ladung den umgebenden Raum so verändert, wie es der klassische Feldbegriff

der Physik von Faraday seit 1835 postuliert“[BLE10, 402]. Dieses Austauschteilchen - hier das Photon - soll nun von geladenen Teilchen unentwegt emittiert und absorbiert werden können und dabei Impuls und Energie übertragen, sprich Wechselwirkungen ausführen können.

Zur Aufstellung eines allumfassenden Wechselwirkungsoperators braucht man somit die Möglichkeit einer Emission 3.70 und Absorption von Photonen, die möglichen Kombinationen aus Photonenzuständen p und Elektronenzuständen A und B . Des Weiteren wird noch eine Kopplungskonstante g eingeführt, die die Stärke der Wechselwirkung bestimmt und einen weiteren Faktor $(p_\gamma c)^{-1/2}$ der sich aus der Quantisierung des freien Maxwell-Feldes ergibt. Vollständig ausgeschrieben hat der Hamiltonoperator folgende Gestalt:

$$\hat{H}_{WW} = g \sum_{A,B,p} \frac{1}{\sqrt{p_\gamma c}} (\hat{a}_B^\dagger \hat{a}_A \hat{c}_p^\dagger + \hat{a}_A^\dagger \hat{a}_B \hat{c}_p) \quad (3.71)$$

Damit ergibt sich der komplette Hamiltonoperator zu:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_{WW} = \hat{H}_{freie\ e^-} + \hat{H}_{Photon} + \hat{H}_{WW} \quad (3.72)$$

Dieses Konzept beschreibt alle möglichen elektromagnetischen Prozesse und liefert bis heute, im Einklang mit den Experimenten, exakteste theoretische Ergebnisse. Dadurch wurde die QED zu einer herausgehobenen Theorie, wodurch der Wechselwirkungsgedanke in der Physik enorm gefördert wurde. Infolgedessen wurden auch die Schwache- und Starke-Wechselwirkung mit diesem Konzeptgedanken entwickelt (genauer vgl. hierzu 3.5.1).

Die Deutung dieses Konzeptes liegt darin, dass diese Wechselwirkungsphotonen nicht direkt messbar sind, sondern nur indirekt nachgewiesen werden können, da sie sonst die Energieerhaltung verletzen würden. Für diese Teilchen wurde deswegen der Begriff virtuelle Teilchen eingeführt. Man muss sich vergegenwärtigen, dass es sich bei den virtuellen Teilchen um ein physikalisches Konzept handelt. Bei den nachfolgend beschriebenen Eigenschaften solcher Teilchen trifft man also nie den komplexen Kern des Gesamtkonzeptes umfassend.⁶⁰

Die Photonen sollen im Rahmen der Energie-Unschärferelation virtueller Natur sein, das heißt nur in der Zeit von $\Delta t \approx \hbar/E$ wirken können. Mathematisch ist dieser virtuelle Effekt ebenfalls zu sehen. Wenn mit dem Hamiltonoperator der Schrödingergleichung die zeitliche Änderung eines Zustands berechnet wird, ergeben sich bei der Lösung schon mit der Taylorentwicklung in 2. Näherung quadratische Hamiltonoperatoren ($\hat{H}^2$). Durch die Quadratur $\hat{H}^2 = (\hat{H}_0 + \hat{H}_{WW})(\hat{H}_0 + \hat{H}_{WW})$ bekommt man Terme der Form $(\hat{H}_{WW})^2$ und somit ausgeschrieben:

$$\hat{H}_{Absorption} \hat{H}_{Emission} = \hat{a}_{B'}^\dagger \hat{a}_B \hat{c}_{p1} \hat{a}_{A'}^\dagger \hat{a}_A \hat{c}_{p1}^\dagger \quad (3.73)$$

⁶⁰Ähnlich zum Welle-Teilchen-Dualismus wird entweder das Photon als Teilchen oder als Welle angenommen, aber niemals kann es beides zugleich sein bzw. in seiner Gesamtheit erfasst werden.

Hier sind die Zustands-Indizes für das Photon gleich und für die Elektronen verschieden. „Angewandt auf einen beliebigen Anfangszustand wird hier in einem Zug ein Photon p_1 erst erzeugt und gleich wieder vernichtet.⁶¹ Dies *intermediäre* Photon taucht also in der Außenwelt gar nicht auf - ist virtuell geblieben.“[BLE10, 405]

⁶¹Produkte von Operatoren werden von rechts gelesen, das hat aber nicht direkt etwas mit der zeitlichen Reihenfolge zu tun.

3.5.3. Anmerkungen aus der Fachdidaktik

In den Experimenten über Atomvorgänge haben wir mit Dingen und Tatsachen zu tun, mit Erscheinungen, die ebenso wirklich sind wie irgendwelche Erscheinungen im täglichen Leben. Aber die Atome oder die Elementarteilchen sind nicht ebenso wirklich. Sie bilden eher eine Welt von Tendenzen und Möglichkeiten als eine von Dingen und Tatsachen.

(Heisenberg)

Das Konzept der Austauschteilchen kann in der Schule nur in Grundzügen behandelt werden, da den Schülerinnen und Schülern, wie so oft, ein komplexer, mathematischer Apparat fehlt. Zudem werden Grundlagen in der Elementarteilchenphysik vorausgesetzt⁶², welche sich aber als fester Bestandteil in der gymnasialen Oberstufe erst langsam zu etablieren beginnen. Die Elementarteilchenphysik ist in acht Bundesländern gar nicht vorgesehen bzw. wird nur als Wahlthema genannt, aber ohne jegliche Vorgaben. In drei Bundesländern werden Vorgaben gemacht, die aber das Konzept der Austauschteilchen nicht explizit nennen. Somit ist nur in fünf Bundesländern das Gebiet der Elementarteilchenphysik relativ ausführlich, unter Einbeziehung der Eichbosonen, im Lehrplan der gymnasialen Oberstufe verankert. Es ist aber davon auszugehen, dass sich dieses Themengebiet in den Lehrplänen im Rahmen der Behandlung moderner Wissenschaften weiter etablieren wird.

Wie bei den vorangegangenen Konzepten sollen hier die fachdidaktischen Ansichten des Konzeptes aus drei Blickwinkeln betrachtet werden. Diese sind das Vorgehen in unterschiedlichen Schulbüchern, die Umsetzungsvorschläge aus externen Unterrichtsmaterialien für Lehrer und Vorschläge seitens der Hochschulen in Form von Veröffentlichungen oder Ähnlichem für die Hand der Lehrkräfte.

⁶²Ohne expliziten Bezug zur Teilchenphysik ist das Wechselwirkungskonzept der Austauschteilchen nicht behandelbar, ein Ansprechen in anderen Teilgebieten der Physik ist nicht adäquat durchzuführen.

Schulbücher

Es werden hier die unter 6.3.1 vorgestellten Bücher betrachtet.

Wie schon angedeutet ist die Teilchenphysik in den Schulen noch in den Kinderschuh, welches sich auch im Umfang des Themas in den Schulbüchern niederschlägt. Die Schulbücher widmen der Elementarteilchenphysik nur wenig Seiten (Metzler 8 S., Cornelsen 11 S., Duden 4 S., Impulse 3 S. und Kuhn 4 S.). Wie bei den vorangegangenen Konzepten sind der Metzler und das Buch von Cornelsen am ausführlichsten. Insgesamt gehen die Bücher recht ähnlich vor. Zunächst wird eine geschichtliche Einführung dargestellt, das Standardmodell mit den neuen Teilchen - den Quarks - beschrieben und auf den neuen Ansatz der virtuellen Teilchen als Wechselwirkungsobjekte hingewiesen. Des Weiteren stellen alle Bücher kurz Beschleuniger als Experimentierapparate der Elementarteilchenphysik dar. Andere Sachverhalte, wie beispielsweise einen Ausblick (Higgs-Boson) oder eine Darstellung der fundamentalen Reaktionen, sind letztendlich der Ausführlichkeit des Themengebiets geschuldet, resultieren zunächst nicht aus einer Einbettung in fachdidaktische Grundsätzen der Lehrbuchautoren. Die Gemeinsamkeiten sowie die Unterschiede sind nun knapp in folgender Tabelle zusammengefasst:

Buch	Geschichtliche Entwicklung	Fundamentale Reaktionen	Fundamentale Wechselwirkungen
Metzler	ausführlich	gezeigt	2 sehr genau (stark u. schwach); die anderen nur kurz
Cornelsen	ausführlich	angedeutet	alle 4 beschrieben
Duden	sehr kurz	nicht vorhanden	alle 4 sehr knapp (Tabelle)
Impulse	kurz	nicht vorhanden	nur allg. Wechselwirkungs-Prinzip
Kuhn	kurz	nicht vorhanden	allg. Prinzip; starke ausführlich, die anderen nur genannt

Exemplarische Zusatz- und Begleitmaterialien

Die Begleitmaterialien verweisen darauf, dass die Bücher nur Ideen und Grundbegriffe des physikalischen Gebiets wiedergeben und lediglich das Interesse der Schülerinnen und Schülern berücksichtigt wurde. Für den Unterricht ist somit nur eine spärliche Grundlage geschaffen, die bei einer richtigen Behandlung der Ergänzung bedarf. Es werden auch keine fachdidaktischen Hinweise gegeben. Einzig ein Begleitmaterial liefert brauchbare Ergänzungen. Neben Aufgaben zu Feynman-Graphen zur Wechselwirkungsbeschreibung werden hier viele fachdidaktisch aufbereitete Informa-

tionstexte⁶³ bereitgestellt, die das Thema vertiefen.

Die Zusatzmaterialien liefern nur punktuelle Unterstützung. Der RAABE-Ordner [RAB11] gibt kein Material zur Elementarteilchenphysik und somit zum Austauschteilchenkonzept. Das Werk von Eckhard Lade [LAD02] liefert geschichtliche Hintergründe zur Strukturuntersuchung von Neutronen und Protonen, von Beschleunigern und vom Standardmodell. Dies wird jeweils mit Kopiervorlagen unterstützt und die jeweiligen Unterrichtsreihen als Lehrervortrag - aus didaktischen Gründen - vorgeschlagen. Interessant hierbei ist aber, dass das Konzept der Austauschteilchen bei Behandlung des Standardmodells völlig ausgeklammert wird, noch nicht einmal eine kurze Nennung zu finden ist. Lediglich der Aufbau bzw. die Bausteine der Materie werden behandelt.

Der Ordner vom Stark-Verlag hingegen hat konkrete Vorschläge. Es gibt eine sehr ausführliche UR-Reihe zu *Symmetriebrechungen* in der Teilchenphysik (mit didaktisch reduzierten, makroskopischen Gedankenbeispielen), die gegen Ende auf ein nötiges Higgsfeld zur Erklärung hinweist. Dies wird dann in einer folgenden UR-Reihe zum *Higgsteilchen* weiter ausgebaut. Im Rahmen dieser Behandlungen wird immer wieder auf Eichbosonen und das zugrunde liegenden Konzept hingewiesen. Insgesamt unterstützt dies das Wechselwirkungskonzept der Austauschteilchen. Zeitlich bedingt können Teile der Vorschläge sehr gut eine UR-Reihe zur Elementarteilchenphysik ergänzen und vor allem in ihrer Ganzheit der Lehrerin bzw. dem Lehrer fachliche Sicherheit bieten.

Sichtweisen der universitären Fachdidaktik

Die Fachdidaktik rät dazu, langsam an die Thematik heranzugehen. Einerseits müssen die Schülerinnen und Schüler in der Elementarteilchenphysik zwangsläufig lernen, bei mehreren physikalischen Größen über viele Größenordnungen hinweg zu denken. Längen von $10^{-15}m$ oder Zeiten im Rahmen von $10^{-21}s$ entziehen sich unserer Vorstellung, deswegen ist es unumgänglich, die Lernenden für solche Dinge zu sensibilisieren. Ohne diese wichtigen Lernvoraussetzungen sollte der eigentliche Unterricht zum Standardmodell mit all seinen Teilchen, Kräften, Reaktionen und dem Wechselwirkungskonzept nicht begonnen werden (vgl. [KIR09, 496]). Andererseits könnten die Schülerinnen und Schüler durch die Vielzahl neuer Namen und Begriffe schnell überfordert werden.

Naheliegend und erprobt sind UR-Reihen, die sich an der historische Entwicklung orientieren [KIR09, 497]. Auf diese Weise wird die Entstehung der strukturellen Zusammenhänge stets anschaulich begründet und schrittweise entwickelt. Auch die Notwendigkeit und Sinnhaftigkeit eines neuen Konzepts zur Beschreibung von Wechselwirkungen kann dadurch eher deutlich gemacht werden.

Da es kaum experimentelle Möglichkeiten für den Schulunterricht gibt, wird als Alternative auf das Informationsangebot im Internet (Simulationen, Foliensätze und

⁶³Beschaffung von Informationen durch Internetrecherche, die altersgerecht dargestellt und formuliert sind, überfordern viele Schülerinnen und Schüler.

Filme) hingewiesen.

Bekannt ist die Seite Solstice (Naturphänomene und Anregungen für den Physikunterricht). Hier gibt es unter dem Titel *Grundlagen der Teilchenphysik* ein multimediales Hypertext-Lernprogramm zum Gebrauch im Physikunterricht, welches im Rahmen einer Dissertation entwickelt wurde. Das Programm hat seit 2001 eine große Verbreitung gefunden und wird vielerorts im Physikunterricht eingesetzt. (vgl. [SOL07]). Es gibt eigene und sehr ausführliche Kapitel zu den fundamentalen Wechselwirkungen und deren Austauschteilchen. Es ist sehr einfach erklärt und mit vielen Bildern / Beispielen versehen, zudem liefert es zur Vertiefung auch Ansätze, die sonst erst in der Hochschule⁶⁴ zu finden sind. Zu jedem Themengebiet gibt es kleine interaktive Quizze zur Lernerfolgskontrolle. Ähnlich aufgebaut, aber thematisch etwas knapper, gibt es ein Selbstlern-Webangebot des DESY (KworkQuark).

Die allgemeine Internetseite des DESYs [TEI14] zur Teilchenphysik bietet verschiedene Vorträge und evaluierte Unterrichtsreihen mit Materialien, die unter anderem im Rahmen von Staatsarbeiten entstanden sind. In manchen Reihen wird als ein Punkt die Wechselwirkung über Austauschteilchen behandelt, wobei die Vorschläge keine neuen fachdidaktischen Ansätze liefern⁶⁵. Die zugehörigen Evaluationen zeigen, wie vermutet, dass das Interesse der Schülerinnen und Schülern sehr hoch war und gute Lernfortschritte erzielt wurden. Einen Untersuchungspunkt zum Konzept der Austauschteilchen speziell gibt es leider nicht.

Sehr neu sind Mitte 2015 Unterrichtsmaterialien zur Teilchenphysik vom „Netzwerk Teilchenphysik“ erschienen [NET15]. Hier lässt sich im Internet ein knapp 300 seitiges Skript zur Teilchenphysik mit vielen Aufgaben und fachdidaktischen Hinweisen für Lehrkräfte finden.

Insgesamt kann man sagen, dass die Teilchenphysik gerade erst den Sprung in die Schule geschafft hat, wodurch die Teildisziplin des Austauschteilchenkonzeptes noch nicht allzu präsent ist. Damit einher gehen natürlich auch die fachdidaktischen Ansätze des Konzeptes seitens der Hochschule. Die Vielfalt und auch die Tiefe mit der Auseinandersetzung des neuen Lerninhalts sind noch nicht sehr groß. Warum sollten bisher auch große fachdidaktische Bemühungen für ein Themengebiet gemacht werden, das in der Schule nicht unterrichtet wird? Zu Beginn dieses Unterkapitels wurde der Aufschwung dieses physikalischen Fachgebiets in den Schulen kurz thematisiert. Darum werden jetzt wahrscheinlich auch verstärkt Fachdidaktiker darum bemüht sein, dass Themengebiet, unter anderem mit neuen Ansätzen, der möglichen Vermittlung aufzubereiten.

⁶⁴Bspw. den Weinbergwinkel zur Vereinheitlichung der em- und schwachen WW.

⁶⁵Darstellung der Wechselwirkung über Ballwurf (Abstoßung) und Boomerangwurf (Anziehung)

4. Nicht anschlussfähige und überholte Wechselwirkungskonzepte

4.1. Der Karlsruher Physikkurs als ein nicht-anschlussfähiges Konzept

Im Karlsruher Physikkurs wird der eigentliche Newtonsche Kraftbegriff mehr oder weniger tabuisiert und durch den Begriff der Impulsstromstärke ersetzt, sprich ein völlig anderes und neues Wechselwirkungskonzept wird vorgeschlagen. Den Grund sahen die Physikdidaktiker der Universität Karlsruhe vor allem in einer Neustrukturierung des Physikunterrichts. Sie wollten hiermit die Kompetenzen der Schülerinnen und Schüler effektiver und nachhaltiger anlegen, somit „auch bei extrem verkürzter Unterrichtszeit sehr nützliche Lernziele erreichen“[HER95, 41].

An dieser Stelle seien kurz ein paar Grundlagen des Kurses erwähnt. Eine genaue Beschreibung ist im Internet auf der Seite der Physikdidaktik der Universität Karlsruhe zu finden.⁶⁶

Grundlage sind mengenartige physikalische Größen und die damit mögliche Ausführung von Bilanzgleichungen. Diese clustern sich in extensive und intensive Größen. Dadurch soll eine starke Verknüpfung zwischen den Teilgebieten der Physik möglich sein. Es werden beispielsweise extensive Größen wie Entropie, elektrische Ladung und Impuls verknüpft mit ihren jeweiligen intensiven Größen, Temperatur, elektrisches Potential und Geschwindigkeit. Eine Differenz der intensiven Größe bedeutet einen Antrieb für den Strom der passenden extensiven Größe (vgl. [HER14, 22 ff.]). Dies ist vergleichbar mit der elektrischen Spannung als Potentialdifferenz, die einen elektrischen Strom fließen lässt.

Hier zwei Beispiele:

	Extensive Größe	Stromstärke	Intensive Größe
Mechanik	Impuls $\vec{p}$	Kraft $\vec{F}$	Geschwindigkeit $\vec{v}$
E-Lehre	elek. Ladung Q	elek. Stromstärke I	elek. Potenzial ϕ

Tabelle 4.1.: Zuordnung physikalischer Größen im Rahmen des KPK [HER14, 18]

Am Anfang der Mechanik steht in diesem Konzept sehr früh der Impuls als eigenständige Größe und die Kraft wird als Impulsstromstärke eingeführt(vgl. [ALT, 7]).

⁶⁶www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de

4. Nicht anschlussfähige und überholte Wechselwirkungskonzepte

Diese ist dann wiederum die Ursache für eine mechanische Spannung, die dadurch eine Geschwindigkeitsänderung vornehmen kann. Diese Bewegungsänderung geschieht also durch das Hinein bzw. Hinausfließen eines Impulsstroms.

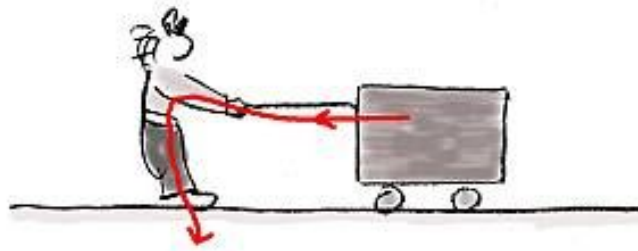


Abbildung 4.1.: Im KPK setzt sich der Wagen nicht in Bewegung, weil eine Kraft auf ihn wirkt, sondern weil über das Seil ein Impulsstrom vom Wagen aus in die Erde fließt. [JOR13, 6]

Wirkungsformulierung:

Ein negativer Impuls fließt vom Boden aus über die ziehende Person in den Wagen, wenn der Impuls des Wagens in Richtung der negativen x-Achse zunimmt. Der Impuls kommt zwar von der Person, aber deren Impuls nimmt nicht ab. Ihr Impuls war und ist Null.⁶⁷ Die Richtung des Impulsstroms ist hier rein über die x-Achse bestimmt.

Zur besseren Veranschaulichung dieses Umstandes folgende Abbildung:

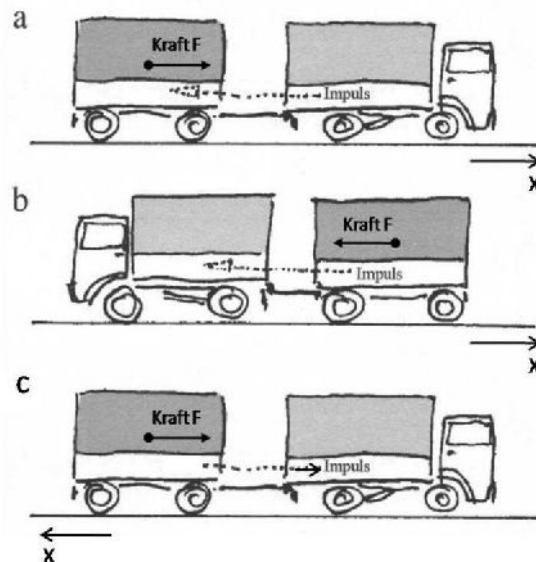


Abbildung 4.2.: Impulsstromrichtung [JOR13, 7]

⁶⁷vgl. hierzu Mechanik Skript des KPK für die Sekundarstufe II.

Ein Lastzug fährt einmal nach rechts (a) und einmal nach links (b) an. Beide Male steht die Kupplungsstange unter Zugspannung und beide Male fließt x-Impuls in die negative x-Richtung. (Dieser Teil der Abbildung mit Unterschrift der Abb. 2.27 des KPK-Schulbuches [HER10], nur die Pfeile für die Kräfte und die Richtungen der x-Achse wurden hinzugefügt). Die hinzugefügte Abb. (c) stellt die Situation dar, wenn die x-Achse gedreht wird (vgl. [DPG13]). Somit ist der Impulsstrom rein durch die x-Achse definiert und kann somit willkürlich festgelegt werden.

Das Feldkonzept

Die Anziehung und Abstoßung von elektrisch geladenen Körpern erklärt der KPK über eine Verbindung zwischen beiden Körpern, diese Verbindung wird elektrisches Feld genannt. „Den unsichtbaren Stoff, aus dem das Feld besteht, nennen wir Feldstoff“ [HER14, 18]. Die wechselwirkenden Gegenstände sollen über diesen Feldstoff Impuls transportieren, sprich im elektrischen Feld fließen Impulsströme von dem einen auf den anderen Körper. Dies soll gleichbedeutend damit sein, dass „der Feldstoff unter mechanischer Spannung steht“ [HER14, 18].

Mit ein Grund für diese Sichtweise des Konzeptes ist die Umgehung der Fernwirkungsvorstellung, die Newton bspw. auch als Mangel an seiner Theorie sah. So muss hier bei einer Wechselwirkung zwischen zwei Körpern direkt ein dritter Beteiligter eingeführt werden, das Feld. Durch dieses kann dann der Impulsstrom fließen. Die Anziehung bzw. Abstoßung kann dann folgendermaßen beschrieben werden: *„Zwei Körper mit Ladungen gleichen Vorzeichens werden von ihrem Feld voneinander weggedrückt, Körper mit Ladungen verschiedenen Vorzeichens werden zueinander hingezogen“* [ALT, 58].

Man könnte also sagen, dass das Konzept des Karlsruher Physikkurses als Grundlage die veraltete Fluida-Theorie von C. du Fay, B. Franklin und Faraday zur Erklärung heranzieht.

Schwächen

Obige Formulierungen über Wechselwirkungen sollen für die Schülerinnen und Schüler einfacher zu verstehen sein als *„gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an“*. Auch die Benutzung von mengenartigen Größen und das Aufstellen von Bilanzgleichungen soll bequemer von der Hand gehen. Allgemein soll die Ersetzung des Kraftbegriffs durch die Impulsstromstärke für Lernende wesentlich leichter zu verstehen sein, da dieser Begriff bspw. auch im Rahmen von Feldern benutzt wird.⁶⁸ Dies erscheint aber schon bei einem vergleichenden Blick zwischen der Behandlung des klassischen Kraftbegriffs und des Feldbegriffs im Schulunterricht

⁶⁸Wobei der Kraftbegriff im klassischen Physikunterricht auch zur Definition der elektrischen Feldstärke benutzt wird, also hier auch die gleiche Begrifflichkeit angewendet wird.

jedoch als äußerst fragwürdig (vgl. [LEH13, 3]). Fundierte Nachweise des besseren Verständnisses sind momentan auch noch nicht erbracht.

Ein weiterer Kritikpunkt offenbart sich in der experimentellen Erfahrbarkeit des Impulsstromes. Bei Betrachtung der 180° Drehung des Lastzuges 4.2 ergibt sich keine erfahrbare Komponente bei den Lernenden. Im Kraftkonzept könnten die Schülerinnen und Schüler die Problematik selber mit einem Seil ausprobieren und die wechselnde Kraftrichtung spüren, ein richtungskonstanter Impulsstrom lässt sich aber wahrlich nicht erkennen.

Schlussfolgerung

Anders als von den Autoren propagiert bietet der Karlsruher Physikkurs kein äquivalentes bzw. adäquates Wechselwirkungskonzept im Vergleich zum Kraft- oder Feldkonzept. Er beginnt mehr oder weniger einfach direkt mit einem abgewandelten Feldkonzept und ersetzt den Begriff der Kraft durch die Impulsstromstärke, welches im Detail zu großen Schwierigkeiten führt 4.2. So lässt sich mancher Sachverhalt gegebenenfalls auch einfacher verstehen, aber viele Ausdrucksweisen - gerade der verschiedenen Größen - werden verkompliziert.

Das größte Problem des KPK steckt aber darin, dass dieses Konzept nicht anschlussfähig ist. Viele Schülerinnen und Schüler wollen nach Beendigung der Schule ein naturwissenschaftliches Studium oder eine technische Ausbildung beginnen. Dafür muss der Physikunterricht sie in die gebräuchlichen nationalen und internationalen Begriffe einführen. Der Begriff des Impulsstromes mit seiner Einheit Huygens (Hy) lässt sich aber in keinem Schulbuch der Berufsschule oder in angesehenen Hochschulbüchern finden. Wie soll sich nun ein Schulabgänger fern der Schule in der Technik und Naturwissenschaft zurecht finden, wenn ihm sogar die rudimentärsten Grundlagen des Kraftbegriffs verwehrt wurden? Wahrscheinlich gar nicht.

Die Problematik des KPK steckt vermutlich in seinen didaktischen Wurzeln. Sein Konzept beruht nicht auf der lückenlosen Beschreibung von Naturphänomenen, sondern auf einer subjektiv angenommenen Einfachheit bei der Vermittlung.

Zum Schluss sei noch erwähnt, dass die *Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG)* dem KPK die fachliche Fundierung abgesprochen hat und von einem Einsatz in der physikalischen Ausbildung nachdrücklich abrät (vgl. [DPG13]).

4.2. Die Wirbeltheorie nach Descartes als ein überholtes Konzept

René Descartes (1596-1650) prägte eine spezielle Ausrichtung der damaligen Physik. Er forderte und unterstützte das mechanische Weltmodell. Alle Erscheinungen in der Natur sollten über wenige und einfache mechanische Prinzipien zu erklären sein, die durch mathematische Überlegungen vollends zu erfassen sind. (vgl. [HUN72, 98 f.]). Er stellte folgende Grundsätze auf, die sich aus der Erhaltung der Bewegungsgröße (wir würden es heute mit $m \cdot v$ ausdrücken vgl. 3.2.1) ergeben sollen [DES06, 37 ff.]:

1. Jede Sache beharrt im Zustand der Ruhe und ändert diesen nur infolge von einer äußeren Ursache.
2. Die Bewegung wird nur gerader Richtung, nie in gekrümmter, fortgesetzt. Gekrümmte Bahnen ergeben sich einzig durch Begegnung mit anderen Dingen (siehe 3.Gesetz).
3. Wenn ein Körper einem anderen begegnet und seine Kraft sich in gerader Linie sich fortzubewegen, geringer ist als die Kraft des anderen, ihm zu widerstehen, so biegt er in eine andere Richtung ab. Hierbei behält er seinen Bewegungszustand und verliert einzig seine frühere Richtungsrichtung.

Die Grundlage der ersten beiden Gesetze gründet nicht, wie später bei Newton, auf der Trägheit eines Körpers, sondern wird auf die „Beständigkeit und Unveränderlichkeit Gottes“ [KUH16, 122] zurückgeführt.

In seinem Weltmodell ist der komplette Weltraum von Materie erfüllt. Den Grund für das ausgefüllte All sieht Descartes im Dasein der Materie. Diese hat primär nur räumliche Merkmale - die Extensio - sie ist nur durch ihre Ausdehnung gekennzeichnet und Ausdehnung ist wiederum nur an Materie erkennbar. Dadurch ist ein leerer Raum undenkbar [HUN72, 99 f.]. Diese Argumentation brauchte Descartes, da er alle Wirkungen mechanisch über Druck und Stoß erklären wollte, hierfür wäre die Existenz eines leeren Raums recht hinderlich.

Die Materie bewegt sich in Wirbeln und hat sich somit über die Zeit hinweg rund geschliffen - nämlich zu Kugeln. Insgesamt soll das All nun aus drei unterschiedlichen Materietypen bestehen:

1. Die kleinsten Teilchen - staubförmiger Abrieb - rutschen in die mittleren Regionen der Wirbel und bilden die Fixsterne.
2. Die mittleren Teilchen - die himmlische Materie - sind von der Anzahl her am meisten vorhanden, füllen den Himmelsraum und bilden die eigentliche Materie der Wirbel.

3. Die großen Teilchen, von Luftteilchen bis hin zu den Planeten, werden nun von den Wirbeln auf Kreisbahnen bewegt.

In der ätherartigen Flüssigkeit (Teilchen) befindet sich von Anbeginn der Zeit eine Bewegungsmenge, aus der sich die materietrennenden Wirbel gebildet haben. Im Zentrum sammelt sich nun die erste Materieart, die Feuermaterie, aus der sich die Sonne und die Fixsterne gebildet haben. Die großen und schweren Stoffe treiben aufgrund der Drehbewegung nach außen und bilden die dritte irdische Materie. Die zweite Materieart soll den ganzen Raum erfüllen und die Ausbreitung des Lichtes gewährleisten(vgl. [KUH16, 127 f.]).

Somit ist die Bewegung der Planeten rein auf die Wirbel zurückzuführen und eine anziehende Kraft bspw. zwischen Sonne und Erde obsolet. Diese „Actio in distans“ zwischen Planeten sollte nach Descartes gar von übersinnliche Qualität sein [HUN72, 99].

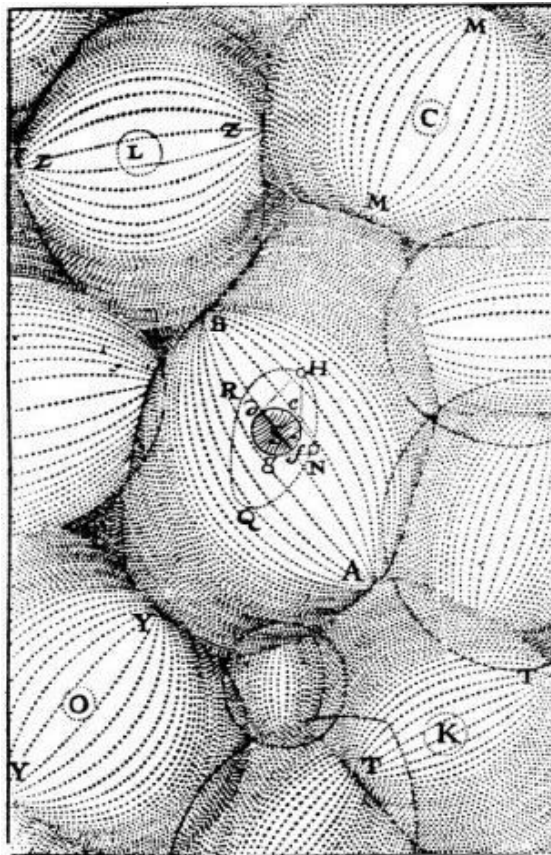


Abbildung 4.3.: Descartes Ätherwirbel [KUH16, 129]

Der umherwirbelnde Stoff um die Sonne soll die Erde mit sich tragen. Derartig wird dann der Mond von den Wirbeln der Erde auf einer Bahn bewegt, ähnlich entstehender Wirbel auf einem Fluss, die von der Strömung weiter getragen werden.

Die Schwere auf den Planeten selbst soll eine sekundäre Qualität der Wirbelbewegung sein. Durch die schnelle Bewegung der Erde hat die Himmelsmaterie (2. Art) ein größeres Bestreben, aufzusteigen, als die irdische Materie (3. Art). So ist also die Himmelsmaterie leichter gegenüber der Erde als es die irdische Materie ist. Infolgedessen müsste nun die irdische Materie in Richtung Erde gedrückt werden.

Die Wirbeltheorie von Descartes zur Beschreibung der Wechselwirkung ist aus damaliger Sicht zunächst recht schlüssig, weißt aber einige Unklarheiten bzw. Schwierigkeiten auf. Einerseits wird bei seiner Erklärung der Schwere die Materie immer in Richtung der Rotationsachse gedrückt und nicht in Richtung des Erdmittelpunktes, so dürfte am Nord- bzw. Südpol keine Schwere existieren. Andererseits schaffte Descartes es nicht, seine hydrodynamische Theorie mathematisch mit messbaren Größen und Formeln zu erfassen und somit falsifizierbare Experimente zu ermöglichen. Aus diesen Gründen wurde dieses Wechselwirkungskonzept nicht weiter ausgebaut und gilt heute als überholt. Man kann sogar zeigen, dass die Wirbeltheorie, würde man sie mathematisch ausarbeiten, nicht mit den Keplerschen Gesetzen in Einklang zu bringen ist (vgl. [HUN72, 129]). Aber die Idee der Wirkungsbeschreibung über hydrodynamische Prozesse hat später durch Descartes immer wieder in der Historie der Physik Anklang gefunden und wurde bspw. von Maxwell zur Aufstellung seiner „berühmten Gleichungen für das elektrodynamische Feld“ benutzt [KUH16, 131].

5. Antworten auf Klafkis Fragen

Es gibt keine bessere Methode Wissen im Geist zu verankern, als es auf so viele verschiedene Arten, wie wir nur können, zu präsentieren.

(Maxwell)

Im Folgenden sollen die unterschiedlichen Wechselwirkungskonzepte jeweils mithilfe der didaktischen Analyse nach Klafki legitimiert werden. Dazu werden zu jedem Konzept die fünf Grundfragen beantwortet. Vor der Beantwortung dieser Fragen, zur Aufschlüsselung des Bildungsgehalts, soll nachfolgend (vgl. 2.2) der Bildungsinhalt, der durch Lehrpläne gegeben ist, geklärt werden. Repräsentativ wird der Kernlehrplan (KLP) für die Sekundarstufe II aus Nordrhein-Westfalen gewählt, weil er zum einen eine sehr aktuelle Sicht (erschienen 2014) des Ministeriums darstellt und zum anderen gerade in Hinsicht auf das Austauschteilchenkonzept im Rahmen der Teilchenphysik den umfangreichsten Lerninhalt aller Bundesländer aufweist.

Um später zu jedem Wechselwirkungskonzept ein besseres Fazit zur Unterrichtbarkeit ziehen zu können, werden die einzelnen Fragen nach ihrer Beantwortung mit dem Status „erfüllt / gewährleistet“, „teilweise erfüllt / gewährleistet“ und „wenig erfüllt / gewährleistet“ versehen. Da die Einteilung auf Subjektivität gründet, ist eine differenziertere Bewertung in diesem Fall nicht sinnvoll. Des Weiteren kann hier stellvertretend nur die Schülerschaft im Allgemeinen betrachtet werden, es gibt natürlich für jede Schülerin und jeden Schüler eine individuelle Bedeutung des Bildungsinhalts. Dieser zeigt sich zunächst schon einmal grob in der Wahl eines Grund- oder Leistungskurses in Physik. Beim intrinsisch motivierten Leistungskursschüler sind beispielsweise alle fünf Bedingungen erfüllt, was bei einem Grundkursschüler, der institutionell bedingt zwingend eine Naturwissenschaft wählen musste, wohl kaum in dieser Ausprägung der Fall sein wird. Aus diesem Grund werden die Antworten auf manche Fragen gegliedert in eine alltägliche, innerfachliche und berufliche Bedeutung, um dieser Schwierigkeit etwas entgegen zu gehen.

5.1. Das Kraftkonzept

5.1.1. Legitimation nach KLP

Umgang mit Fachwissen: Die Schülerinnen und Schüler

- erläutern die Größen Position, Strecke, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Masse, Kraft, Arbeit, Energie, Impuls und ihre Beziehungen zueinander an unterschiedlichen Beispielen,
- unterscheiden gleichförmige und gleichmäßig beschleunigte Bewegungen und erklären zugrundeliegende Ursachen,
- beschreiben Wechselwirkungen im Gravitationsfeld und verdeutlichen den Unterschied zwischen Feldkonzept und Kraftkonzept,
- stellen historische Änderungen in den Vorstellungen zur Mechanik beim Übergang vom Mittelalter zur Neuzeit dar.

Erkenntnisgewinnung: Die Schülerinnen und Schüler

- analysieren in verschiedenen Kontexten Bewegungen qualitativ und quantitativ sowohl aus einer Wechselwirkungsperspektive als auch aus einer energetischen Sicht,
- berechnen mithilfe des Newtonschen Kraftgesetzes Wirkungen einzelner oder mehrerer Kräfte auf Bewegungszustände und sagen sie unter dem Aspekt der Kausalität vorher.

5.1.2. Legitimation nach Klafki

1. Grundfrage: Exemplarität

Das Kraftkonzept ist exemplarisch für die Untersuchung von jedweden Bewegungsabläufen. In vielen Zusammenhängen (Mechanik, Magnetismus, Elektrizität, Verhalten von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik) lässt sich das Kraftkonzept nutzen, um über Änderungen des Bewegungszustandes eines Körpers auf das Vorhandensein von Kräften zu schließen (vgl. [KLP08, 26]). Etwas interessanter ist der entgegengesetzte Weg, bei Kenntnissen über wirkende Kräfte können Rückschlüsse auf die Bewegung bzw. Bewegungsänderung eines Körpers gemacht werden. Da materielle Veränderungen in der Welt in sehr hohem Maße mit Bewegungsvorgängen zu tun haben, kann man ohne eine Analyse von Bewegungsprozessen die Welt kaum in ihren Grundzügen verstehen. Mithin ist das zugrundeliegende Wirkungskonzept in außerordentlich hohem Maße exemplarisch. Zudem fragt Klafki in dieser Grundfrage

explizit, welches „Grundprinzip“ erfasst wird. Das zu Erörternde ist ein physikalisches Grundprinzip und somit schon per Definition im Fach Physik als exemplarisch anzusehen.

(Status: **erfüllt**)

2. Grundfrage: Gegenwartsbedeutung

Das hier zu nennende Schlagwort ist der Determinismus. Die Jugendlichen fragen sich oft nach den kausalen Zusammenhängen von alltäglichen Erscheinungen. Mithilfe der sichtbaren Wirkungen haben sie mithilfe des Kraftkonzeptes die Möglichkeit, Phänomene zu deuten bzw. vorherzusagen. Das Erkennen von Zusammenhängen durch die reine Beobachtung wird gerade in der gymnasialen Oberstufe immer schwieriger und ist ohne ein theoretisches Untersuchungswerkzeug nicht mehr zu leisten. Die Wirkungen beziehen sich streng genommen bei diesem Konzept zunächst auf Wechselwirkungen über den direkten Kontakt, welches aber später mithilfe des Feldkonzeptes expliziter ausgebaut wird.

In der Sekundarstufe I ist das Thema Bewegungen und Kräfte zumeist schon behandelt worden. Somit kann man davon ausgehen, dass bei der Bearbeitung des Kraftkonzeptes in der Oberstufe schon Vorwissen existiert. Dieses Wissen ist aber erfahrungsgemäß sehr ungenau und unstrukturiert. Dies äußert sich darin, dass die meisten Schülerinnen und Schüler immer noch denken, dass zur Aufrechterhaltung einer Bewegung eine Krafteinwirkung von Nöten sei. Ihr Wissen ist also vielmehr ein Faktenwissen. Zudem ist das Kraftkonzept in seiner persönlichen Bedeutsamkeit für die Lernenden mit zahlreichen archaischen Elementen durchsetzt - bspw. der Zuordnung von Kraft im Sinne kräftig, wirkmächtige Fähigkeit eines Individuums oder anderen Lebewesens.

Die Lernenden kennen die Einheit *Newton* und ggf. noch die Berechnungsformel $F = m \cdot a$, wobei oft nur der Spezialfall $a = g$ bekannt ist.

Man kann als Lehrer bzw. Lehrerin, unter Beachtung von Misskonzepten, ohne weiteres einen Neustart in das Themengebiet unternehmen.

(Status: **erfüllt**)

3. Grundfrage: Zukunftsbedeutung

Die Zukunftsbedeutung lässt sich gliedern in einen innerfachlichen, einen alltagstauglichen und einen berufsorientierten Wert für die Jugendlichen. Innerfachlich ist das Kraftkonzept die Grundlage zu einem richtigen Verständnis des folgenden Feldbegriffs, der gerade in der Schule ein Grundpfeiler für die Elektrodynamik ist. Ohne das Kraftkonzept ist es nicht möglich, adäquat ein Feldkonzept einzuführen, da nach dem Feldkonzept an einem Punkt zu einer bestimmten Zeit eine gewisse spezielle physikalische Größe gemessen wird. Diese Größe ist zumeist, wenn nicht bspw. ein

Temperaturfeld untersucht wird, eine Kraft. Grundlegend wird die Stärke von Feldern über die Feldstärke definiert und diese ist die lokal wirkende Kraft dividiert mit einer Feldeigenschaft (Masse, Probeladung, etc.). Somit kann man sogar schlussfolgern, dass das Feldkonzept ohne den Kraftbegriff *nicht* behandelt werden kann.

Auch im späteren Beruf oder Studium spielt das Kraftkonzept für viele Schülerinnen und Schüler noch eine wichtige Rolle. Gerade in naturwissenschaftlichen Berufen oder Studiengängen bildet ein gutes Verständnis des Kraftbegriffes ein solides Fundament zur Erarbeitung fachspezifischer Inhalte. Ob Statik im Architekturstudium, Mechanik in Ingenieurwissenschaften oder Berechnungen in handwerklichen Berufen, nötige Kenntnisse über die Wirkung und Berechnung von Kräften sind mannigfaltig zu finden.

(Status: **erfüllt**)

4. Grundfrage: Thematische Struktur

Was vorangegangen ist, zeigt uns ein Blick in die Geschichte. Der Untersuchung von Bewegungen wurde von je her eine zentrale Bedeutung in der Naturwissenschaft beigemessen, dies hängt natürlich objektiv von der fundamentalen Bedeutung von Bewegungsvorgängen in der Realität zusammen. Die Bewegungslehre wurde deshalb von Aristoteles zum Zentrum der Naturwissenschaft erkoren (vgl. [HEL70, 144]). Nachdem Bewegungen - gleichförmig und beschleunigt - ausführlich im Unterricht besprochen wurden, stellt sich die unausweichliche Frage „Warum“ ein Körper gerade die Bewegung ausführt, die wir beobachten. Die Ursache für die Änderung des Bewegungszustandes eines Körpers ist seine Wechselwirkung mit der Umgebung. All diese Wechselwirkungen können durch das Konzept der Kraft beschrieben werden. So muss man sagen, dass ein Körper, der seinen Bewegungszustand ändert - bspw. langsamer wird oder die Richtung wechselt - eine Kraft erfährt. Nachdem der Kraftbegriff prinzipiell bekannt ist, werden die unterschiedlichen auftretenden Kräfte (Reibungskräfte, Kräfte der Drehbewegung etc.) und Folgerungen des Konzeptes (Scheinkräfte, Inertialsysteme etc.) näher untersucht. Bei diesem klassischen Unterrichtsgang ist damit eine thematische Struktur für die Lernenden klar ersichtlich. Unter 7.1 wird zudem noch ein näherer Blick auf eine mögliche Struktur geworfen.

(Status: **gewährleistet**)

5. Grundfrage: Zugänglichkeit

Der Zugang kann über viele verschiedene Wege führen, die an verschiedene Kontexte gebunden sind, die je nach Lerngruppe, Schulbuch, Materialien oder zur Verfügung stehenden Experimenten variabel ausgewählt werden können. Das Verfahren des kontextorientierten Unterrichts, ob in eingebetteten Alltagsbezügen oder anhand authentischer/exemplarischer Beispiele, wird sogar von allen Kultusministerien ex-

plizit verlangt oder gewünscht.⁶⁹

Mögliche Kontexte sind:

- *Physik und Sport*: Kräfte beim Sprung, Wechselwirkungskraft beim Stoßen bzw. Schießen eines Balls, Luftwiderstand beim Fallschirmspringen.
- *Architektur*: Statik von Gebäuden, Bau einer Papierbrücke etc.
- *Straßenverkehr*: Bremsvorgänge, Antriebs- und Fahrwiderstandskräfte, der Airbag, speziell Kurvenfahrten in Verbindung mit Autorennsport
- *Historische Sequenzierung*: Kognitive Konflikte durch damalige Auffassungen, frühere Gedankenexperimente etc.

Eine zu vordergründige Kontextorientierung birgt allerdings die Gefahr, dass die dem Kraftbegriff innewohnenden Dimensionen, dynamisch, statisch, Kompensation der Dissipation bei Reibungskräften nicht sauber genug klassifiziert und unter die Newtonsche Kraftdefinition subsummiert werden. Gerade in der gymnasialen Oberstufe hat man die Möglichkeit, wenn die oben genannten Bedingungen hinreichend erfüllt sind, die Schülerinnen und Schüler selbst in den Findungsprozess eines zugänglichen Kontextes einzugliedern. Neben diesen Aspekten sei noch erwähnt, dass das Kraftkonzept eingegliedert im Themengebiet der Mechanik eine Vielzahl an möglichen Schülerexperimenten liefert. Mit diesem enaktiven Mittel gibt es ein Set an möglichen Methoden zur Erkenntnisgewinnung.

(Status: **erfüllt**)

5.2. Das Feldkonzept

5.2.1. Legitimation nach KLP

Umgang mit Fachwissen: Die Schülerinnen und Schüler

- erläutern den Feldbegriff und zeigen dabei Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Gravitationsfeld, elektrischem und magnetischem Feld auf,
- bestimmen die relative Orientierung von Bewegungsrichtung eines Ladungsträgers, Magnetfeldrichtung und resultierender Kraftwirkung mithilfe einer Drei-Finger-Regel,
- erläutern qualitativ die Entstehung eines elektrischen bzw. magnetischen Wirbelfelds bei B- bzw. E-Feldänderung und die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle.

Kommunikation: Die Schülerinnen und Schüler

⁶⁹Vgl. die Lehrpläne für die gymnasiale Oberstufe der verschiedenen Bundesländer.

- erläutern und veranschaulichen die Aussagen, Idealisierungen und Grenzen von Feldlinienmodellen, nutzen Feldlinienmodelle zur Veranschaulichung typischer Felder und interpretieren Feldlinienbilder.

Bewertung: Die Schülerinnen und Schüler

- beurteilen den Stellenwert experimenteller Verfahren bei der Definition physikalischer Größen (u.a. elektrische Feldstärke E und magnetische Feldstärke B).

5.2.2. Legitimation nach Klafki

1. Grundfrage: Exemplarität

Das Feldkonzept ist als exemplarisch anzusehen, weil es ein Grundprinzip der Physik darstellt und es Methoden zur Lösung von Problemen bietet, die ohne dieses Konzept keine adäquaten Ergebnisse liefern würden. Hiermit können vielfältige Phänomene der Natur beschrieben bzw. erschlossen werden. Ohne dieses Konzept wären wir noch in einer Fernwirkungstheorie von Wechselwirkungen, bei der nicht nach dem „Wie“ der Wechselwirkung gefragt wird. Das Feldkonzept ist eine Nahwirkungstheorie, die eine endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit für physikalische Wirkungen beinhaltet. Dies führt auf die maximale Geschwindigkeit der Signalausbreitung - die Lichtgeschwindigkeit, und leitet zur Relativitätstheorie von Albert Einstein über. Somit ist auch die Kausalität von Ereignissen, die schon in 5.1.2 erwähnt wurde, gegeben bzw. kann bei den Schülerinnen und Schülern vertieft werden.

Neben diesen Aspekten wird der Raumbegriff für die Schülerinnen und Schüler und damit das naturwissenschaftliche Grundverständnis weiter entwickelt. Der Raum bekommt neben den Eigenschaften *Länge*, *Breite* und *Höhe* noch weitere Attribute, unter anderen werden ihm elektrische, magnetische, gravimetrische usw. Eigenschaft zugeschrieben. Diese nehmen je nach vorhandenen Objekten andere Werte an und bestimmen dadurch Wirkungen auf andere Objekte.

(Status: **erfüllt**)

2. Grundfrage: Gegenwartsbedeutung

Die Schülerinnen und Schüler kennen den Begriff des Feldes, zumeist im Rahmen des Magnetfeldes, aus ihrem Alltag und dem Unterricht der Sekundarstufe I im umgangssprachlichen Gebrauch. Über die Existenz des Magnetfeldes der Erde oder das Wirken von Dauermagneten, sind nicht nur im Schulunterricht sondern auch in der Lebenswelt zahlreiche Informationen verfügbar. Auch das elektrische Feld ist den Lernenden aus dem Physikunterricht nicht unbekannt, hier zumeist als Ablenkung geladener Teilchen. Der wissenschaftlich fundierte Feldbegriff ermöglicht die umgangssprachlichen Verwendungen „Feld“ zu vereinheitlichen und auf ein gemeinsames Prinzip zurückzuführen. Mit einem Feldkonzept, dass Kraftwirkungen

auf Änderung von Raumeigenschaften zurückführt, lassen sich Lernenden die verschiedensten Feldwirkungen einheitlich verdeutlichen. Dies liefert einen wesentlichen Schlüssel, um die extrem vielfältigen Phänomene des Elektromagnetismus, so wie sie uns im Alltag in Gestalt von Handy, Computer, Fernseher und sonstigen Informationstechnologien begegnen, auf einheitliche Weise zu deuten. Damit wird die Gegenwartsbedeutung deutlich.

An das Feldkonzept schließt sich der Elektromagnetismus samt den elektromagnetischen Wellen an. Die Bedeutung dieses Themengebiets ist in der Gegenwart nicht mehr wegzudenken. Anwendungskontexte ergeben sich nicht nur aus den bereits genannten Beispielen sondern erstrecken sich auch auf biologische und chemische Wirkungen (Röntgengerät, UV-Strahlung) die bekanntlich auf höheres Interesse der Schülerinnen und Schüler stoßen [HAE95, 113 f.].

(Status: **erfüllt**)

3. Grundfrage: Zukunftsbedeutung

Die Zukunftsbedeutung lässt sich, wie schon beim Kraftkonzept, gliedern in einen innerfachlichen, einen alltagstauglichen und einen berufsorientierten Wert für die Jugendlichen. Innerfachlich kann durch Einbindung von einfachen Elementen der Differentialgeometrie den Lernenden verdeutlicht werden, dass durch geometrische Betrachtungsweisen ein besseres Verständnis von Feldern möglich ist. Dies bereitet auch den späteren Einstieg in die Geometrisierung der Raumzeit vor (siehe Geometrisierungskonzept). D.h. im Bereich des Feldkonzeptes dient die Geometrie als Hilfsmittel, um Vektorfelder mithilfe des Gradienten vereinfacht als Skalarfelder zu veranschaulichen, sprich elektrische Felder mithilfe des Potentials darzustellen. Das vereinfacht später den Übergang zum Geometrisierungskonzept, wo die Geometrie kein Hilfsmittel mehr, sondern das Modell an sich ist.

Für die weitere Entwicklung der Schülerinnen und Schüler liefert es, wie schon der Kraftbegriff, ein Fundament zum besseren Einstieg und zur Absolvierung von naturwissenschaftlichen Studiengängen. Neben dieser recht speziellen Zukunftsbedeutung führt das Wissen über Felder aber zu einer verantwortlicheren zukünftigen Lebensführung. Neben dem Feldbegriff und seinen theoretischen Konsequenzen sollten natürlich auch die Gefahren von Feldern im Unterricht thematisiert werden. Dieses stärkt vor allem die Mündigkeit und das kritische Denkvermögen (vgl. 2.1.3.) der Schülerinnen und Schüler deutlich. So können sie bspw. mit dem oft angegebenen SAR-Wert⁷⁰ von Handys etwas anfangen und den Gebrauch kritisch reflektieren.

Auch in den verschiedensten technischen Berufsfeldern findet eine immer größere Einbindung neuer Technologien statt, ob im Auto, in moderner Haussteuerung oder grundlegend in der Technisierung der Produktionsabläufe. Alles soll vernetzt sein und das möglichst kabellos. Grundlegende Kenntnisse der Übertragung von

⁷⁰Spezifische Absorptionsrate: $SAR = \frac{1}{2} \frac{\sigma \cdot |\vec{E}|^2}{\rho} \frac{W}{kg}$

Signalen darunter Emission, Reflexion, Absorption, Abschirmung etc. werden den Jugendlichen in ihrem Berufsleben helfen können.

(Status: **erfüllt**)

4. Grundfrage: Thematische Struktur

Vorangegangen ist das Konzept der Kraft im Themengebiet der Mechanik. Nachdem meistens die Wirkung von Kräften durch Ziehen, Drücken, Schieben und Stoßen, also weitgehend Kontaktkräfte mit direkter Berührung der wechselwirkenden Körper oder durch Vermittlung von Stangen, Seilen usw. untersucht wurden, wird die Kraft nun, meistens im Rahmen der Elektrostatik/dynamik, durch nichts Gegenständliches mehr ausgeübt. Die Fernwirkungsvorstellung, die zumeist bei der Behandlung des Gravitationsgesetzes noch den Vorzug der Einfachheit für die Schule innehatte, wird nun durch das Feldkonzept in eine Nahwirkungstheorie ersetzt. Nachdem die Idee des Feldes bei den Schülerinnen und Schülern gefruchtet hat und eine mögliche Veranschaulichung gegeben ist, werden die schon aus der Mechanik bekannten Begriffe - Energie, Arbeit, etc. - und die aus der Sekundarstufe I vorhandenen Vorstellungen zur Ladung, Potential, Spannung etc. vertieft und weiter ausgebaut. Hiermit wird, bei richtiger Herangehensweise, den Schülerinnen und Schülern das Konzept des Feldes immer bewusster.

(Status: **gewährleistet**)

5. Grundfrage: Zugänglichkeit

Die Zugänglichkeit kann über solche Wege ermöglicht werden, die einen lebensweltlichen Kontext repräsentieren. Mögliche Kontexte sind:

- *Gewitter und Faradayscher Käfig*: Wie entsteht ein Gewitter? Wo schlagen Blitze ein und warum? Was bietet Schutz bei einem Blitzeinschlag?
- *Bauteile der Elektrotechnik*: Bekannte Bauteile wie Kondensator, Spule, Transistoren hinsichtlich der dahinterstehenden Physik untersuchen.
- *Historische Sequenzierung*: Kognitive Konflikte durch damalige Auffassungen, frühere Gedankenexperimente etc.
- *Kommunikation*: Wie funktioniert die Übertragung von W-LAN, wie die vom Mobilfunk und wie wird ein Mobilfunknetz etabliert? Wie können diese Strahlen aus sicherheitstechnischen Gründen abgeschirmt werden? Was können für gesundheitliche Folgen entstehen?

Wie schon beim Kraftkonzept ist eine Einbindung der Schülerinnen und Schüler in der Kontextsuche sinnvoll, um die Zugänglichkeit für die Beteiligten zu optimieren.

(Status: **gewährleistet**)

5.3. Das Geometrisierungskonzept

5.3.1. Legitimation nach KLP

Umgang mit Fachwissen: Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben qualitativ den Einfluss der Gravitation auf die Zeitmessung.

Kommunikation: Die Schülerinnen und Schüler

- beschreiben für unterschiedliche Adressaten Konsequenzen der relativistischen Einflüsse auf Raum und Zeit mit Hilfe geeigneter Visualisierungen,
- veranschaulichen mithilfe eines einfachen gegenständlichen Modells den durch die Einwirkung von massebehafteten Körpern hervorgerufenen Einfluss der Gravitation auf die Zeitmessung sowie die "Krümmung des Raums".

Bewertung: Die Schülerinnen und Schüler

- bewerten die wissenschaftshistorische Bedeutung der Relativitätstheorie mit Blick auf die Veränderung des physikalischen Weltbilds.

5.3.2. Legitimation nach Klafki

1. Grundfrage: Exemplarität

Das Geometrisierungskonzept stellt den essentiellen Kern der Allgemeinen Relativitätstheorie dar. Hier eine herausgehobene Exemplarität zu finden, wo die Allgemeine Relativitätstheorie sogar in der Hochschullehre eher als „Spezialgebiet“ verstanden wird, ist außerordentlich schwierig - jedenfalls dann, wenn man die Exemplarität nur auf das Schulfach Physik bezieht. Im allgemeinen menschlichen Streben nach objektiver Wahrnehmung und Erkenntnis spielen geometrische Arbeitsprinzipien eine herausragende Rolle. Die Körpervielfalt naturgegebener Gegenstände wird bekanntlich extrem häufig in Form von geraden Kanten, idealen Objekten (wie Kugel oder Würfel); überhaupt maßgeblich durch geometrische Vereinfachung dargestellt. Unsere Wahrnehmung selbst befolgt in der darstellenden Geometrie untersuchten Gesetze der räumlichen Projektion. Die Physik bedient sich zur vereinfachenden Darstellungen unterschiedlicher Koordinatensysteme und Koordinatentransformationen, es liegt also durchaus nahe, das Wirken physikalischer Gesetze geometrisch zu deuten. Die Schwierigkeit im Detail der Relativitätstheorie ist lediglich darin begründet, dass auch die Zeit als eine Art räumliche Koordinatenachse aufgefasst wird.

Ein weiterer, exemplarischer Aspekt ist die Methodik des Gedankenexperiments, welches bei der Erarbeitung des Themas von grundlegender Wichtigkeit ist. Nur im Gedankenexperiment kann schnell und adäquat ein Wechsel zwischen Inertialsystemen zur Untersuchung von Wirkungen vonstatten gehen. Hier haben die Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit, die Kraft dieses einzigartigen gedanklichen

Werkzeugs zu erkunden und seine Wirksamkeit zu erproben.

Ferner wird durch das Geometrisierungskonzept ein Zugang zum vereinheitlichten Weltverständnis geliefert, denn Raum, Zeit, Materie und Energie verschmelzen zu einem ganzheitlichem Erklärungskonstrukt. Die aufgezählten Kriterien begründen unweigerlich die Exemplarität dieses Konzeptes.

(Status: **teilweise erfüllt**)

2. Grundfrage: Gegenwartsbedeutung

Es lässt sich wiederum eine innerschulische sowie eine außerschulische Gegenwartsbedeutung in dieser Thematik für die Schülerinnen und Schüler finden. Auf die Schule bezogen haben die Lernenden zum einen die Geometrisierung in der Elektrostatik bei der Darstellung von elektrischen Potentialen behandelt und nun haben sie die Möglichkeit, noch ein weiteres, viel umfassenderes Beispiel dieser Methode - hier als Modell - kennen zu lernen. Zum anderen wird in diesem Gebiet die Geometrie auch mathematisch gefasst. Das heißt, die Schülerinnen und Schüler kommen das erste Mal mit den Matrizen außerhalb des Mathematikunterrichts in Kontakt. So sehen sie die Anwendungsgebiete dieser facettenreichen Rechenweise, die sonst im Mathematikunterricht nur in sehr eingekleideten Kontexten vorkommt, wenn sie überhaupt im Rahmen der Geometrie behandelt wird und nicht rein zur Darstellung von Produktionsübergängen (Rohstoff - Zwischenprodukt - Endprodukt) benutzt wird.

Außerhalb der Schule sind Phänomene wie schwarze Löcher, der Urknall und weitere kosmische Vorgänge ständig in populärwissenschaftlichen Nachrichten präsent und sind somit Teil der Erfahrungswelt. Dieses Themengebiet ruft bei Schülerinnen und Schüler von Anfang der Klasse 6 bis zur Oberstufe starkes Interesse hervor.

Des Weiteren sind ohne die Erkenntnisse des Geometrisierungskonzeptes viele Phänomene, die heute zum technischen Alltag gehören, nicht erklärbar - man denke an die Laufzeitänderung der Signale im Schwerfeld der Erde, die bei der GPS-Navigation beachtet werden muss. Somit stellt dieses Konzept neben den eben genannten Aspekten gerade bei älteren Schülerinnen und Schülern im Rahmen der mittlerweile fast taglich genutzten Navigation, ob im Auto oder in Verbindung mit dem Smartphone, eine große Bedeutung dar.

(Status: **erfüllt**)

3. Grundfrage: Zukunftsbedeutung

Dieses Gebiet liefert einen mathematischen Apparat, der die Schülerinnen und Schüler vorab auf Anforderungen in der Hochschule hinweist. Neben der Matrizenrechnung erhalten die Lernenden erste Einblicke in kompliziertere geometrische Anschauungen. Neben neuen Koordinatensystemen (Kugelkoordinaten) lernen sie auch neue Begriffe wie beispielsweise die Geodäte kennen. Somit können die Schülerinnen und Schüler Erfahrungen sammeln, die ihnen den Start in ein naturwissenschaftliches

Studium erleichtern.

Falls die Kursmitglieder keine Hochschulausbildung anstreben bzw. keine naturwissenschaftliche, so ermöglicht ihnen die Allgemeine Relativitätstheorie, ein kritisches Denkvermögen gegenüber zweifelhaften populärwissenschaftlichen Darstellungen in den Medien auf- bzw. auszubauen.

Wissenschaftstheoretisch zeigt sich in diesem Konzept aktuell eine sehr große Bedeutung. Albert Einstein folgerte aus seiner Allgemeinen Relativitätstheorie die Existenz von Gravitationswellen, die hundert Jahre später 2015/2016 experimentell bestätigt wurden und als ein Meilenstein der Astronomieentwicklung betrachtet werden. Das heißt, dass die Lernenden aktuelle Forschungen im Unterricht kennenlernen (Gegenwartsbedeutung), am Beginn einer möglichen, noch nicht absehbaren Entwicklung stehen. Sie sehen den Start eines neuen Forschungsgebiets, welches im Vergleich zu den damals experimentell bestätigten elektromagnetischen Wellen von Hertz (1886) eine noch nicht dagewesene Technologie ermöglichen wird. Die Lernenden können hiermit den Werdegang der Wissenschaft nachvollziehen. Bei Eingliederung der Historie im Bereich der Elektrodynamik (Gleichungen von Maxwell → experimentelle Bestätigung durch Hertz → heutige Technik der em-Wellen) kann diese aufgegriffen, verglichen und über neue Technologien philosophiert werden (Gleichungen von Einstein → exp. Bestätigung von Gravitationswellen → ??? ⁷¹).

(Status: **teilweise erfüllt**)

4. Grundfrage: Thematische Struktur

Der Behandlung der Allgemeinen Relativitätstheorie im Rahmen des Geometrisierungskonzeptes ist die Spezielle Relativitätstheorie vorangegangen. Wenn die Allgemeine Relativitätstheorie nun direkt im Anschluss an die SRT behandelt wird, sind die Schülerinnen und Schüler mit den nötigen relativen physikalischen Betrachtungsweisen (Lorentz-Transformationen, Längenkontraktion, Zeitdilatation, etc.) voll vertraut. Das Relativitätsprinzip kann nun in einem folgenden Schritt weiter verallgemeinert werden. Diesen Weg kennen die Schülerinnen und Schüler schon aus dem Gebiet der Kinematik. Hier wurden zunächst gleichförmige Bewegungen behandelt, die dann zu gleichmäßig beschleunigten Bewegungen vertieft wurden. So kann auch die Betrachtung von Inertialsystemen in der Speziellen Relativitätstheorie im Rahmen von Überlegungen beschleunigter Bezugssystemen in der Allgemeinen Relativitätstheorie fortgeführt werden.

Die innerthematische Struktur ist sehr flexibel zu gestalten. Sie hängt davon ab, wie ausführlich die Spezielle Relativitätstheorie behandelt wurde, von den kognitiven Fähigkeiten der Lernenden und von der zur Verfügung stehenden Zeit. Des Weiteren wäre es von Vorteil, wenn im Rahmen des Feldkonzeptes eine Betrachtung des Gravitationspotentials gemacht würde. So hätten die Schülerinnen und Schüler im Ansatz eine Vorstellung über die Verbindung zwischen der Stärke der Krümmung

⁷¹bpsw. Gravitationswellenastronomie, etc..

und einer wirkenden Gravitationskraft.

(Status: **gewährleistet**)

5. Grundfrage: Zugänglichkeit

Wie schon bei Grundfrage 2 angedeutet ist es nicht sehr schwierig, dieses Themengebiet in den Fragehorizont der Jugendlichen zu bringen. Themen wie der Urknall, schwarze Löcher, Wurmlöcher, Supernovae etc. kommen oft als Fragestellungen seitens der Schülerinnen und Schüler auf. Gerade, wenn sie vorher eine Reportage, Dokumentation oder einen Film gesehen haben, der diese Themen beinhaltet, wird man als Lehrperson oft mit Fragen überschüttet. Dieses Interesse gilt es zu nutzen. So kann eine populärwissenschaftliche Reportage als Einstieg genutzt werden, die im Nachhinein bei den Jugendlichen viele Fragen aufwirft. Diese Fragen können passend geclustert werden, um eine inhaltsreiche Unterrichtsreihe zu gestalten. Bei dieser Reihe haben die Schülerinnen und Schülern das Gefühl, einen aktuellen interessanten Sachverhalt (Gravitationswellen) zu bearbeiten, bei dessen Gestaltung sie aktiv involviert sind.

(Status: **gewährleistet**)

5.4. Das Austauschteilchenkonzept

5.4.1. Legitimation nach KLP

Umgang mit Fachwissen: Die Schülerinnen und Schüler

- systematisieren mithilfe des heutigen Standardmodells den Aufbau der Kernbausteine und erklären mit ihm Phänomene der Kernphysik,
- erklären an Beispielen Teilchenumwandlungen im Standardmodell mit Hilfe der Heisenbergschen Unschärferelation und der Energie-Masse-Äquivalenz.

Erkenntnisgewinnung: Die Schülerinnen und Schüler

- vergleichen das Modell der Austauschteilchen im Bereich der Elementarteilchen mit dem Modell des Feldes (Vermittlung, Stärke und Reichweite der Wechselwirkungskräfte).

Kommunikation: Die Schülerinnen und Schüler

- recherchieren zum aktuellen Wissenstand der Elementarteilchenphysik anhand der öffentlich zugänglichen Ergebnisse der großen Forschungseinrichtungen (u.a. CERN),

- tauschen sich mit anderen über den aktuellen Stand der Erkenntnis hinsichtlich der elementaren Bausteine der Materie aus.

Bewertung: Die Schülerinnen und Schüler

- bewerten die Aussagen des heutigen Standardmodells im Hinblick auf seine Beständigkeit bzw. Vorläufigkeit.

5.4.2. Legitimation nach Klafki

1. Grundfrage: Exemplarität

Das Konzept der Austauschteilchen wird im Rahmen der Elementarteilchenphysik behandelt, wodurch eine Exemplarität bezüglich der Modernität der behandelten Wissenschaft gegeben ist. Die Schülerinnen und Schüler haben somit in diesem Teilgebiet die Möglichkeit, sich über Sachverhalte auszutauschen, die auch in der aktuellen Wissenschaft diskutiert werden. Als Beispiel sei hier das Higgs-Boson zu nennen. Im Laufe einer zugehörigen Unterrichtsreihe werden die Jugendlichen ggf. die Erkenntnis gewinnen, dass es ein Austauschteilchen in diesem Modell geben muss, welches den Widerstand eines Körpers gegenüber einer Beschleunigung hervorruft, landläufig nennen wir diesen Widerstand träge Masse. Dieses Teilchen ist in der aktuellen Wissenschaft erst vor kurzem bestätigt worden. Dadurch ist eine Beispielhaftigkeit der Forschung im Wechselspiel zwischen theoretischer und experimenteller Physik aufgezeigt.

Des Weiteren ist dieses Konzept zielführend für ein vertieftes Verständnis von Modellvorstellungen. Bisher dienten die Modelle im typischen Unterrichtsgang meistens der besseren Anschauung, beispielsweise das Feldlinienbild zur Vorstellung der Struktur eines elektrischen Feldes oder das Teilchenmodell zur Veranschaulichung von thermodynamischen Prozessen. Das Modell der Austauschteilchen ermöglicht eine konkrete Vorstellung von Wechselwirkungsprozessen. Verlässt man aber die gedankliche Ebene der Veranschaulichung und wechselt zu derjenige Ebene, bei der Modelle als Erkenntniswerkzeuge dienen, wird das Nachvollziehen konkreter Prozesse sehr schwierig. Eine Abstoßung zweier Körper mithilfe von Bosonen wäre noch in einem verträglichen Anschauungsrahmen, aber wie etwa eine Anziehung von Körpern durch den Austausch von Teilchen zustande kommen soll, ist sowohl phänomenologisch wie mathematisch, sehr kompliziert abzubilden. Hier kann die Problematik der Vielschichtigkeit von Modellvorstellungen beispielhaft thematisiert werden.

(Status: **erfüllt**)

2. Grundfrage: Gegenwartsbedeutung

Zum Austauschteilchenkonzept direkt werden die Schülerinnen und Schüler wenig bis gar kein Vorwissen aufweisen, allenfalls unsortierte populärwissenschaftlichen Aussagen werden ihnen in den Medien begegnet sein. Somit werden einige von ihnen

schon wissen, dass es eine Vielzahl an Teilchen gibt und die bekannten Nukleonen - Proton/Neutron - selbst nochmals aus kleineren Teilchen bestehen. Doch durch welche Prozesse werden diese Teilchen strukturiert? Scheinbar sind die möglichen Phänomene schier endlos.

Eine Grundfrage aus unserem immer unübersichtlicher werdendem Zeitgeschehen lautet, nach welchen einheitlichen Grundprinzipien und Gedankenmustern wir die Vielfalt der Phänomene deuten können. Die Erfolge des Konzeptes der Austauschteilchen führen den Lernenden vor Augen, dass es nicht aussichtslos ist, gedankliche Ordnung in die Welt zu bringen, da wir gegenwärtig diese unterschiedlichen Phänomene der em-, starken, und schwachen Wechselwirkung einheitlich beschreiben und deuten können. Es besteht also Hoffnung, die komplexe Welt - vielleicht nicht nur die unbelebte Welt - sinnstiftend gedanklich zu sortieren.

(Status: **teilweise erfüllt**)

3. Grundfrage: Zukunftsbedeutung

Auf individueller Ebene ist eine Zukunftsbedeutung vordergründig nur dann zu erkennen, wenn sie die gelernten Konzepte sowie die zugrundeliegende Elementarteilchenphysik nur in einem reinen Physikstudium anwenden werden. Aus generalisierender Sicht allerdings anzumerken ist, dass die Lernenden den Facettenreichtum physikalischer Modellbildung um weitere Bausteine erweitern können. Sie lernen hier insbesondere, dass Modelle nicht zwangsläufig auch anschaulich sein müssen, sondern dass es auch Modelle geben kann, die in einigen Teilaspekten nicht einmal den Anspruch auf Anschaulichkeit und Vorstellbarkeit erheben. Eine explizite Zukunftsbedeutung ist also wenig bis gar nicht gegeben.

(Status: **wenig erfüllt**)

4. Grundfrage: Thematische Struktur

Das Themengebiet der Elementarteilchenphysik ist aus fachlicher sowie historischer Sicht die Fortsetzung der Atom- und Kernphysik (vgl. 3.5) hin zu kleineren Längeneinheiten (vgl. [KIR09, 496]). Somit sollte dieses Teilgebiet im Anschluss daran behandelt werden. Die explizit mögliche Struktur lässt sich unter 7.3 finden.

Neben den immer kleiner werdenden Maßstäben liefert uns die Behandlung des Austauschteilchenkonzeptes strukturell die Möglichkeit, vorangegangene Sachverhalte nochmals genauer zu beleuchten. In der Kernphysik wurde beispielsweise der Beta-Zerfall als Umwandlung von einem Neutron in ein Proton unter Emission eines Elektrons und Neutrinos sehr ungenau bzw. phänomenologisch behandelt. Weitergehende Fragen seitens der Schülerinnen und Schülern bleiben, wegen des fehlenden Wechselwirkungskonzeptes, noch unbeantwortet bzw. unzureichend beantwortet. Somit können im Laufe der Unterrichtsreihe viele offenstehende Unklarheiten angegangen und die Erkenntnisgewinnung über elementare Prozesse vertieft werden. Dadurch

wird den Schülerinnen und Schülern eine Struktur innerhalb der mikroskopischen Physik deutlich, die ohne das Austauschteilchenkonzept nicht zugänglich wäre.

(Status: **gewährleistet**)

5. Grundfrage: Zugänglichkeit

Das sehr stark mathematisierte Austauschteilchenkonzept ist auf fachphysikalischer exakter Seite kaum im Unterricht zugänglich, abgemildert wird der Umstand durch die Tatsache, dass es im Laufe der letzten Jahre einige Elementarisierungsversuche gab, die erfolgreich einige Aspekte der Teilchenwechselwirkung abbilden konnten. Hier seien beispielhaft, wie auch in den später dargestellten Unterrichtsreihen elementarisiert, die Feynman-Diagramme als Umwandlungsprozessdarstellung oder das Federballspiel als Anschauungshilfe zu nennen.

Aus motivationaler Sicht kann die Theorie über den Urknall thematisiert werden, die in populärwissenschaftlichen Medien, ob in Serien (The Big Bang Theorie), Filmen oder Fernsehreportagen, sehr präsent ist. Dadurch weisen manche Schülerinnen und Schüler in der Oberstufe ein „umfangreiches aber diffuses Vorwissen“ [KIR09, 497] auf. Sie kennen bildliche Zeittafeln vom Urknall bis heute, wo anfangs Teilchen mit anderen Teilchen etwas machen und sich daraus etwas ergibt. Begriffe wie Antimaterie, Dunkle Materie usw. stehen so anfangs zusammenhangslos im Raum und können während der Reihe sortiert und auf einfacher Ebene erklärt werden. Nebenbei zeigen viele Schülerinnen und Schüler bei der Nennung dieser „Schlagworte“ ein großes Interesse, welches als erste Zugänglichkeit des neuen Konzeptes genutzt werden kann.

(Status: **wenig gewährleistet**)

5.5. Zusammenfassung

In der folgenden Tabelle ist der Status zu den jeweiligen Fragen und Unterrichtsinhalten nochmals zusammengefasst.

Fragen	WW-Konzept			
	Kraft	Feld	Geometrie	A.-Teilchen
Exemplarität	erfüllt	erfüllt	tw. erfüllt	erfüllt
Gegenwartsbed.	erfüllt	erfüllt	erfüllt	tw. erfüllt
Zukunftsbed.	erfüllt	erfüllt	tw. erfüllt	w. erfüllt
Struktur	gewährleistet	gewährleistet	gewährleistet	gewährleistet
Zugänglichkeit	gewährleistet	gewährleistet	gewährleistet	w. gewährleistet

Tabelle 5.1.: Status von Klafkis Fragen: Erklärung (tw.) teilweise ; (w.) wenig

Die „klassischen“ Wechselwirkungskonzepte in der Schulphysik - der Kraft- und Feldbegriff - sind, wie auch erwartet, stets im vollen Umfang erfüllt.

Die anderen beiden Konzepte müssen differenzierter betrachtet werden.

Das Geometriesierungskonzept weist im Rahmen der klafkischen Betrachtungsweise für den Schulunterricht Schwächen in der Exemplarität und der Zukunftsbedeutung auf. Wohlgemerkt, dies ist keine physikalische Beurteilung, sondern ein fachdidaktisch pädagogischer Hinweis auf die Zugänglichkeit für den Schulunterricht. Da aber die übrigen drei der fünf Bedeutungen ohne große Einschränkung gegeben sind, ist eine unterrichtliche Behandlung hinsichtlich Klafki legitim.

Das Austauschteilchenkonzept ist in zwei von fünf Bedeutungen leider nur wenig erfüllt / gewährleistet. Der Grund ist die eingeschränkte allgemein physikalische Bedeutung für die Schulphysik. Dieses Wechselwirkungskonzept kann nur im Rahmen einer umfänglichen Teilchenphysik adäquat angewendet und verstanden werden. Da dieses Teilgebiet aber in der Schulphysik nur langsam als Unterrichtsgegenstand in den Lehrplänen verankert wird - und dies oft auch nur als Exkurs - ist die Bedeutung dieses Konzeptes für Schülerinnen und Schüler zunächst gering. Das heißt aber nicht, dass eine unterrichtliche Behandlung unmöglich wäre. Wie oben dargelegt, ist auch dieses Konzept gewinnbringend für Lernende einsetzbar. Somit ist seine Behandlung in einem gewissen zeitlichen Rahmen ohne Bedenken möglich. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass sich Klafkis Analyse in ihrer Bewertung immer auf eine größere Lerngemeinschaft bezieht. Es ist aber auch möglich, im Rahmen eines differenzierend Unterrichts Inhalte zu behandeln, die nur für sehr interessierte und leistungsstarke Schülerinnen und Schüler in Frage kommen. Im Rahmen der individuellen Förderung wird dies auch ausdrücklich angestrebt (vgl. [KMK15]). Dies

kann integrativ, mit der kompletten Lerngruppe oder ergänzend im Rahmen einer AG oder eines Differenzierungskurses stattfinden.

5.6. Interpretation

Wie in der Zusammenfassung schon dargestellt, ist eine Behandlung der Wechselwirkungskonzepte nach Klafki legitimierbar. Die Konzepte der Kraft und des Feldes sind sehr gut, die beiden anderen Konzepte allerdings mit kleinen Einschränkungen im Unterricht umsetzbar.

Die beiden klassischen Konzepte Kraft und Feld sollten sehr ausführlich behandelt werden, da sie einen Grundpfeiler der Physik darstellen und Anwendungen in sehr vielen anderen naturwissenschaftlichen und technischen Bereichen finden.

Die beiden anderen Konzepte weisen nach Klafki zwar „Schwächen“ auf, was allerdings so zu verstehen ist, dass es im Rahmen eines Unterrichtes im Hinblick auf den Nachweis der Praxisrelevanz und einer leichten Elementarisierbarkeit unverkennbare Probleme gibt. Sie sollten daher bei der unterrichtlichen Handhabung eine geringere Tiefe aufweisen und einen kleineren zeitlichen Rahmen ausfüllen. Es sei hier angemerkt, dass es in über Klafki hinausgehende Bildungstheoretischen Ansätzen durchaus relativ leicht ist, die Behandlung solcher Themenfelder zu fundieren. Mindestens in Allgemeinbildungskonzepten sind sie gut zu verorten.

6. Untersuchungen zu den physikalischen Konzepten der Wechselwirkungen mithilfe einer Schulbuchanalyse

Gewisse Bücher scheinen geschrieben zu sein, nicht damit man daraus lerne, sondern damit man wisse, dass der Verfasser etwas gewusst hat.

(Goethe)

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Ist-Zustand, das heißt, es soll dargelegt werden, wie sich Wechselwirkungskonzepte in der aktuellen Schullehrbuchliteratur niederschlagen.

6.1. Das Schulbuch als Spiegelbild des Unterrichts

Mithilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse von gängigen Physikbüchern der gymnasialen Oberstufe soll der Ist-Zustand festgestellt werden, wobei die Physikbücher hier stellvertretend für den Physikunterricht gesehen werden.

Man kann sich natürlich die Frage stellen, ob man mit dieser Methode eine realitätsnahe Widerspiegelung der aktuellen Unterrichtslage erhalten mag. Wahrscheinlich ist dies nur in Teilen möglich, aber um eine umfassende Bestandsaufnahme zu generieren wäre eine komplette Evaluation aller didaktisch relevanten Komponenten (Lehrpläne, Studienpläne, Handreichungen, Hospitationstätigkeit in allen Bundesländern usw.) notwendig, was den Rahmen der vorliegenden Untersuchung sprengen würde, zumal es auch nicht das Hauptanliegen dieser Arbeit darstellt. Die Analyse der Schulbücher bildet aus folgenden Gründen einen relativ guten Grundstein zur Beantwortung obiger Fragestellung:

1. Die aktuellen Schulbücher werden immer an die Ansprüche des jeweiligen Unterrichts angepasst.

Die Schülerinnen und Schüler haben in den Büchern oft Rückblicke zum selbstständigen Testen, es gibt Anleitungen für außerschulische Versuche, historische Exkurse sowie Transferaufgaben zur horizontalen Vernetzung des Wissens.

Für Lehrerinnen und Lehrer bieten sie eine nahe Ausrichtung an den staatlichen Lehrplan, gerade in Servicebänden abgestimmte Arbeitsblätter, gute und umfassende Experimentierideen sowie fast immer eine CD / DVD mit Bildersammlungen und multimedialer Software zur Veranschaulichung. Letztere eignen sich sehr gut, falls ein passendes Experiment nicht in den zeitlichen Rahmen passt oder die Geräte, Materialien fehlen.

2. An den meisten Schulen hat man nur noch ein gewisses Kontingent an Kopien oder muss gar jede selbst tragen (mit 2-3 Cent). Dies veranlasst die Lehrerinnen und Lehrer zur stärkeren Einbindung der Schulbücher und somit zur Hinwendung auf die darin enthaltenen inhaltlichen Handhabungsvorschläge.⁷²
3. Ein weiterer Grund für die Praxisrelevanz von Schulbüchern, der von den Fachdidaktikern oft nicht beachtet wird, sind die Gegebenheiten des Alltags im Unterrichtsgeschehen. Bei vollem Stundenkontingent haben viele Lehrer gar nicht die Möglichkeit, jede Unterrichtsstunde adaptiv zu gestalten und greifen oft aufs Buch zurück.
4. Da die Schulbücher für viel Geld angeschafft werden, sollen diese auch im Unterricht eingesetzt werden. Dies wird in den meisten Fällen dadurch gewährleistet, dass die schulinternen Curricula sich nah an dem zu Verfügung stehendem Buch orientieren.

6.2. Ablauf der Schulbuchuntersuchung

Die Untersuchung richtet sich nach der strukturierenden Inhaltsanalyse von Philipp Mayring, welche er in seinem Buch zur *Qualitativen Inhaltsanalyse* darstellt. Ein Grund für diese Wahl ist eine nachweislich gelungene und inhaltlich haltbare Analyse von mehreren Autoren.⁷³

Bei dieser Methode wird der Inhalt des Buches nach einem theoriegeleiteten Kategoriensystem erfasst, um Strukturen zu finden. Dabei sind die folgenden Punkte von Bedeutung [MAY10, 92]:

- Die grundsätzlichen Strukturierungsdimensionen müssen genau bestimmt werden, sie müssen aus der Fragestellung abgeleitet und theoretisch begründet werden.
- Diese Strukturierungsdimensionen werden dann zumeist weiter differenziert, indem sie in einzelne Ausprägungen aufgespalten werden. Die Dimensionen und Ausprägungen werden dann zu einem Kategoriensystem zusammengestellt.

⁷²Gemeint ist hierbei, dass Lehrerinnen und Lehrer beispielsweise eher einen historischen Exkurs in der Unterrichtsstunde einbauen, wenn sie diesen im Buch vorfinden.

⁷³bspw. Krause, Eduard: Dissertation zu „*Das Erhaltungsprinzip in der Physik und seine Anwendung im Physikunterricht*“ [KRA12]; Brennecke, Julia: Dissertation zu „*Schülervorstellungen zur evolutionären Anpassung*“; Deitersen, Christian: Dissertation zu „*Wachstum und Energie*“

- Wann ein Materialbestandteil unter eine Kategorie fällt, muss genau festgestellt werden. Dabei hat sich ein Verfahren bewährt, das in drei Schritten vorgeht:
 1. Definition der Kategorien
Es wird genau definiert, welche Textbestandteile unter eine Kategorie fallen.
 2. Ankerbeispiele
Es werden konkrete Textstellen angeführt, die unter eine Kategorie fallen und als Beispiel für diese Kategorie gelten sollen.
 3. Kodierregeln
Es werden dort, wo Abgrenzungsprobleme zwischen Kategorien bestehen, Regeln formuliert, um eindeutige Zuordnungen zu ermöglichen.

6. Untersuchungen zu den physikalischen Konzepten der Wechselwirkungen mithilfe einer Schulbuchanalyse

Hiermit ergeben sich die folgenden Schritte die nacheinander zu durchlaufen sind (6.1):

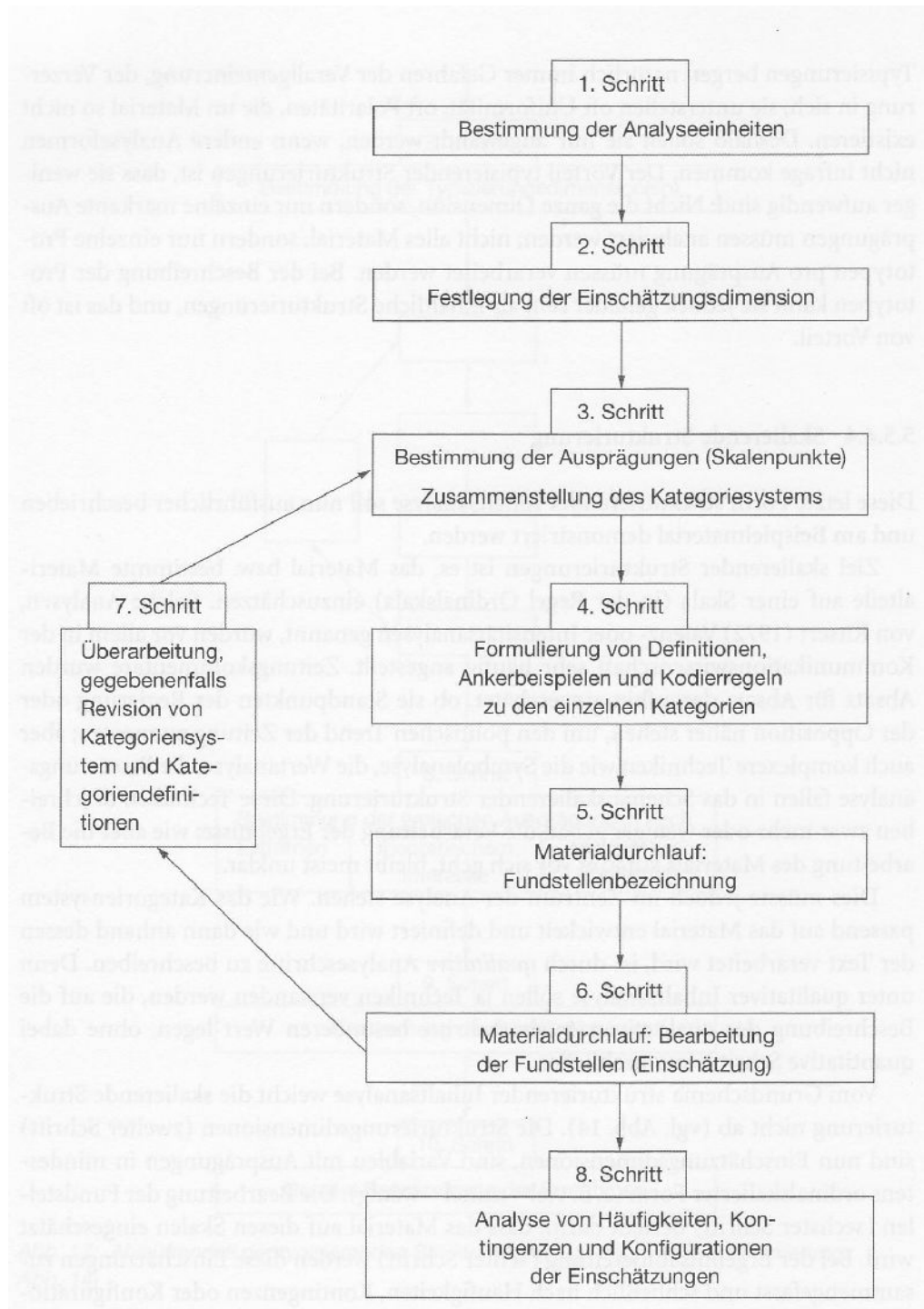


Abbildung 6.1.: Ablaufmodell skalierender Strukturierung [MAY10, 93]

Nähere Erläuterungen (vgl. [KRA12, 130 f.])

1. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse

Der erste Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse besteht darin, die Analyseeinheit genau festzulegen. Das meint, dass genau definiert werden muss, wie lang eine Textstelle mindestens sein muss, um in die Wertung aufgenommen zu werden (Kodiereinheit). Des Weiteren muss festgelegt werden, wie lang eine Textstelle höchstens sein darf, um noch als eine Fundstelle zu gelten (Kontexteinheit). Außerdem muss der Ablauf der Analyse festgelegt werden (wenn z.B. mehrere Schulbücher analysiert werden, ist festzusetzen, ob die Schulbücher nacheinander untersucht werden oder ob analoge Fundstellen aus allen Schulbüchern nacheinander ausgewertet werden).

2. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse

Der zweite Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse beinhaltet die theoriegeleitete Festlegung der Strukturdimension. Es gibt folgende vier Formen (Dimensionen) der strukturierenden Inhaltsanalyse [MAY10, 94]:

- „Eine formale Strukturierung will die innere Struktur des Materials nach bestimmten formalen Strukturierungsgesichtspunkten herausfiltern.“
- „Eine inhaltliche Strukturierung will Material zu bestimmten Themen, zu bestimmten Inhaltsbereichen extrahieren und zusammenfassen.“
- „Eine typisierende Strukturierung will auf einer Typisierungsdimension einzelne markante Ausprägungen im Material finden und diese genauer beschreiben.“
- „Eine skalierende Strukturierung will zu einzelnen Dimensionen Ausprägungen in Form von Skalenpunkten definieren und das Material daraufhin einschätzen.“

3. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse

Die in Schritt 2 festgelegten inhaltlichen Hauptkategorien werden hier in Unterkategorien unterteilt.

4. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse

An dieser Stelle werden konkrete Definitionen, Ankerbeispiele und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien festgelegt. Hierbei wird aber schon ein ausschnittsweiser Materialdurchgang gemacht, um zu prüfen, ob die festgelegten Kategorien, Unterkategorien, Definitionen und Ankerbeispiele überhaupt greifen und eine eindeutige Zuordnung möglich ist.

5. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse

In diesem Schritt beginnt nun der Materialdurchlauf in Form eines groben Durchgangs, bei dem die Fundstellen markiert werden.

6. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse
Hier wird das Material genauer durchgesehen und die Fundstellen den Unterkategorien zugeordnet.
7. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse
Wenn in den Materialdurchläufen (Schritt 5 und 6) Mängel in den Unterkategorien und Kodierregeln festgestellt werden, müssen diese revidiert und die Schritte 3 bis 6 erneut durchlaufen werden.
8. Schritt der strukturierenden Inhaltsanalyse
Abschließend wird das Ergebnis der strukturierenden Inhaltsanalyse aufbereitet.

6.3. Analyse der Schulbücher

6.3.1. Auswahl der Schulbücher

Es werden die nun folgenden fünf Physikbücher der gymnasialen Oberstufe analysiert. Diese sind jeweils die aktuellsten Bücher von unterschiedlichen Verlagen und sollen exemplarisch die heute gebräuchlichen Physikbücher darstellen.

- Kuhn Physik 2 (Westermann Verlag) [KUH00]
 - Erscheinungsjahr (Druck): 2011
 - Umfang: 387
 - Beinhaltete Kapitel:
Elemente der Mechanik; Mechanische Schwingungen und Wellen; Elemente der Thermodynamik; Elektrizitätslehre; Elektromagnetische Schwingungen und Wellen; Relativität; Quanten und Atome; Kernphysik; Ausblick (Elementarteilchen)
- Impulse Physik (Klett Verlag) [IMP07]
 - Erscheinungsjahr (Druck): 2011
 - Umfang: 369 Seiten
 - Beinhaltete Kapitel:
Beschreiben von Bewegungen; Ursache von Bewegungen; Erhaltungssätze; Gravitationsfeld; Schwingungen; Elektrisches Feld; Magnetisches Feld; Induktion; Wellen; Wellenmodell des Lichtes; Quantenobjekte; Atomphysik; Kernphysik; Thermodynamik; Relativitätstheorie
- Metzler Physik (Schroedel Verlag) [MET07]

- Erscheinungsjahr (Druck): 2012
- Umfang: 569 Seiten
- Beinhaltete Kapitel:
Mechanik; Gravitation; Mechanische Schwingungen und Wellen; Thermodynamik; Elektrische Ladung und elektrisches Feld; Bewegte Ladungsträger und magnetisches Feld; Elektromagnetische Schwingungen und Wellen; Chaotische Vorgänge; Die spezielle Relativitätstheorie; Einführung in die Quantenphysik; Atomphysik; Festkörperphysik und Elektronik; Kernphysik; Elementarteilchenphysik; Astrophysik; Physik und Wissenschaftstheorie
- Physik (Duden Paetec Verlag) [DUD11]
 - Erscheinungsjahr (Druck): 2012
 - Umfang: 590 Seiten
 - Beinhaltete Kapitel:
Denk- und Arbeitsweisen in der Physik; Mechanik; Thermodynamik; Elektrizitätslehre und Magnetismus; Optik; Quantenphysik; Atom- und Kernphysik; Spezielle Relativitätstheorie; Astrophysik; Komplexe Aufgaben
- Physik Oberstufe Gesamtband (Cornelsen Verlag) [PHY08]
 - Erscheinungsjahr (Druck): 2011
 - Umfang: 546 Seiten
 - Beinhaltete Kapitel:
Mechanik (Einfache Bewegungen, Kinematik, Dynamik, Erhaltungssätze, Kreisbewegung, Drehbewegung); Felder (Gravitation, Elektrische und Magnetische Felder, Induktion und Leitungsvorgänge); Schwingungen und Wellen (mechanische und elektromagnetische Schwingungen, Chaos, mechanische und elektromagnetische Wellen); Quantenobjekte und Struktur der Materie (Licht, Quantenphysik, Atome, Kerne und Elementarteilchen); Relativität und Astrophysik (Relativitätstheorie, Astrophysik, Thermodynamik); Methoden der Physik

6.3.2. Bestimmung der Analyseeinheit

Schon bei der Bestimmung der Kodiereinheit muss hinreichend differenziert werden. Das reine Nennen eines Konzeptes von Wechselwirkungen, beispielsweise das Wort Kraft, wird nicht als eine Fundstelle gewertet. Das Konzept muss dahingehend eine Erwähnung finden, als das genau erkennbar ist, dass eine Wirkung, beispielsweise

zwischen zu untersuchenden Körpern, gemeint ist oder eine logische Wirkungsverknüpfung beschrieben wird. Also:

- Keine Fundstelle:
Die Vektoreigenschaft von Kraft und Weg ist die Ursache dafür, dass die...
- Keine Fundstelle:
Senkrechtes Hochheben erfordert viel Kraft.
- Fundstelle:
Die Ursache der Schwingung mit dem periodischen Durchlaufen derselben Bahn in einer Hin- und Herbewegung ist eine Kraft. Mit dem bekannten Kraftgesetz kann man nun...
- Fundstelle:
Da die Erde sich dreht, ist sie kein Inertialsystem, sondern ein beschleunigtes Bezugssystem, in dem Trägheitskräfte auftreten. Wir wissen, dass diese keine Gegenkraft haben, da...

Das heißt, es muss erkennbar sein, dass das Konzept mit seinen Folgen an sich benutzt wird. Eine einzige Nennung des Konzeptes reicht nicht, es muss mit diesem gearbeitet werden. Es muss erkennbar sein, dass die Textstelle den Konzeptgedanken aufgreift.

Als Kontexteinheit wird ein inhaltlich zusammenhängender Text mit den zugehörigen Bildern, Tabellen, Graphen, Beispielen und Aufgaben festgelegt. Des Weiteren werden die Schulbücher nacheinander analysiert.

6.3.3. Bestimmung der Kategorien und Unterkategorien mit Beispielen

Die vorliegende Analyse ist eine typisierende Strukturierung. Es wird als erstes zwischen den verwendeten Konzepten kategorisiert, also zwischen Kraft, Feld, Geometrisierung und Austauschteilchen. Neben der schon oben beschriebenen Differenzierung einer Erwähnung eines Konzeptes sollen diese nochmals in ihrer Qualität unterschieden werden. Es wird in folgende Typen zugeordnet:

- (G) Erwähnung als Gesetz/Vorschrift. Das Konzept wird rein als Gesetz oder Vorschrift erwähnt und angewendet. Es werden keine Hintergrundgedanken genannt.

Beispiel:

Die Federwaage zeigt eine Kraft von 3 Newton an. Da die Erdbeschleunigung bekannt ist, kann mittels $F = m \cdot a$ die Masse des Körpers berechnet werden.

- (P) Erwähnung als Prinzip. Das Konzept wird erklärend angewendet und es wird auf die Wirkung des Konzeptes geachtet.

Beispiel:

Mit der Kraft $\vec{F}$ ist immer die beschleunigende Kraft gemeint. Wirkt z.B. auf ein Auto eine Antriebskraft in der einen Richtung und zudem eine bewegungshemmende Reibungskraft in der anderen Richtung, so ist...

- (WK) Erwähnung als Wechselwirkungskonzept. Neben der erklärenden Anwendung wird viel Wert darauf gelegt das Konzept als Wechselwirkungsbeschreibung anzuwenden.

Beispiel:

Wirken zwei Körper aufeinander ein, so wirkt auf jeden der beiden Körper eine Kraft. Das ist bei einem Crash von zwei Autos ebenso der Fall wie zwischen der Erde und der Sonne oder der Erde und einem Körper auf ihrer Oberfläche. Die Erde zieht den Körper an, der Körper aber auch die Erde. Sie beide stehen in Wechselwirkung miteinander.

An dieser Einteilung lässt sich jetzt schon Vermuten, dass die Konzepte als Gesetz sehr oft vorkommen werden, da das Betreiben von Physik, einfach gesagt, ohne sie nicht funktionieren würde. Auch die erklärende Nennung als Prinzip wird man noch relativ oft finden, da wir uns mit Schulbüchern befassen, die ein hohes erklärendes didaktisches Potential aufzeigen wollen. Vor dem Hintergrund der allgemeinen Lehrplandiskussionen, wird die Betonung des konzeptartigen an der Wechselwirkung wahrscheinlich nur spärlich erfolgen. Letztendlich handelt es sich bei physikalischen Betrachtungen sehr häufig um die Untersuchung von Wechselwirkungsvorgängen, das muss aber nicht zwangsläufig bedeuten, dass der Wechselwirkungscharakter in einem Lehrbuchtext stets ausführlich betrachtet wird.

Wenn in einer gewissen Kontexteinheit das Konzept in verschiedenen Qualitäten zugleich auftaucht, wird die Fundstelle der jeweilig höheren Qualität zugesprochen.

In der strukturierenden Inhaltsanalyse soll es, wie oben beschrieben, klare Trennungen zwischen den Kategorien und Unterkategorien geben. Das ist an manchen Stellen relativ schwierig, da die unterschiedlichen Konzepte, gerade das Kraft- und Feldkonzept, beispielsweise bei der Behandlung der elektrischen Feldstärke, eng ineinandergreifen. An solchen Stellen wird subjektiv entschieden, ob es dem einen, dem anderen oder sogar beiden zugeschrieben wird.

Des Weiteren ist es gelegentlich kompliziert, zwischen einer Erwähnung als Gesetz oder als Prinzip klar zu unterscheiden. Aus diesem Grund wurde ein Buch zweimal, mit einer zeitlichen Differenz von vier Wochen, untersucht. Dabei wurde, mit Ausnahme zweier Fundstellen, dasselbe Ergebnis in der Analyse erzielt, wodurch sichergestellt ist, dass die Unterscheidungen in die verschiedenen Typen gut greifen.

6.3.4. Formulierung von Kodierregeln

Jede Fundstelle wird nach einem bestimmten Muster mit Hilfe von folgenden Abkürzungen angegeben:

1. Als erstes wird das Buch genannt, hierbei steht (Kuh) für Kuhn Physik 2, (Imp) für Impulse Physik, (Met) für Metzler, (Dud) für Duden Physik und (Cor) für Physik Oberstufe des Cornelsen Verlages.
2. Als nächstes wird der Hauptkategorientyp, das verwendete Wechselwirkungskonzept, angegeben, (K) für das Kraftkonzept, (F) für das Feldkonzept, (G) für das Geometrisierungskonzept und (A) für das Austauschteilchenkonzept.
3. An dieser Stelle steht das Kapitel, in dem das Konzept vorgekommen ist, (M) steht für Mechanik, (E) für Elektrodynamik, (QA) für Quanten- und Atomphysik, (KE) für Kern- und Elementarteilchenphysik, (R) Relativitätstheorie, (T) für Thermodynamik und (A) für Astrophysik.
4. An vierter Stelle wird der Qualitätskategorientyp angegeben, (G) für die Erwähnung als Gesetz/Vorschrift, (P) für Prinzip und (WK) für die Behandlung als Wechselwirkungskonzept.
5. Hier wird durchnummeriert, zum wievielten Mal das Konzept in der jeweiligen Qualität genannt wurde.
6. Der Buchstabencode an der letzten Stelle gibt an, in welcher Weise das Konzept genannt wurde. Es gelten folgende Abkürzungen:
 - A für Aufgabe
 - B für Beispiel
 - C für Computereinsatz
 - G für mathematische Graphen, Prinzipiendarstellung als Graphik oder Photographie
 - L für Lesetext
 - T für Tabelle
 - V für Versuch
 - R für Randbemerkung

Somit kann man aus jener Fundstellenbezeichnung herauslesen:

(Met.F.E.P.2.GL) S. 104, Wirbelstrombremse an Fahrgeschäften.

Zur Erklärung: Das Konzept der Kraft als Prinzip wird zum zweiten Mal im Schulbuch Metzler im Kapitel zur Elektrodynamik in einem Lesetext und einer Graphik

genannt. Des Weiteren werden hinter dem Code noch die Seitenzahl und der grobe Inhalt der Stelle angesprochen.

6.3.5. Materialdurchlauf

6.3.5.1. Wechselwirkungskonzepte in Kuhn Physik 2

Das Kraftkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Kuh.K.M.G.1.LGV) S.24, Grundgleichung der Mechanik
- (Kuh.K.M.G.2.ALGV) S.25, Konsequenzen aus der Grundgleichung
- (Kuh.K.M.G.3.LG) S.33, Goldene Regel der Mechanik
- (Kuh.K.M.G.4.AL) S.35, Berechnung kinetischer Energie
- (Kuh.K.M.G.5.L) S.37, Reibungsarbeit
- (Kuh.K.M.G.6.L) S.42, Unelastischer Stoß rückwärts
- (Kuh.K.M.G.7.L) S.47, Zentripetalbeschleunigung
- (Kuh.K.M.G.8.ALBGV) S.48 f., Kraftgesetz der Kreisbewegung
- (Kuh.K.M.G.9.ABL) S.52 f., Zentripetalkräfte im Sport und sonstige Anwendungen
- (Kuh.K.M.G.10.L) S.57, Wiederholung Mechanik
- (Kuh.K.M.G.11.A) S.67, Gravitationskraft
- (Kuh.K.M.G.12.L) S.78, Harmonische Schwingung
- (Kuh.K.M.G.13.CL) S.80 f., Computersimulation von Schwingungen
- (Kuh.K.M.G.14.L) S.88 f., Chaotische Schwingungen
- (Kuh.K.M.G.15.L) S.92, Wellenausbreitung
- (Kuh.K.M.G.16.LG) S.94, Ausbreitungsgeschwindigkeit von Querwellen
- (Kuh.K.M.G.17.AL) S.101, Grundfrequenz einer gespannten Saite
- (Kuh.K.T.G.18.L) S.113, Innere Kraft bei Volumenänderungsarbeit
- (Kuh.K.T.G.19.LG) S.119, Kinetische Gastheorie
- (Kuh.K.E.G.20.LV) S.175, Millikanversuch

- (Kuh.K.QA.G.21.L) S.331, Grundgesetz der Quantenmechanik
- (Kuh.K.KE.G.22.L) S.358 f., Kernmodelle
- (Kuh.K.KE.G.23.L) S.368, Alphazerfall
- (Kuh.K.KE.G.24.L) S.378, Kernspaltung

Erwähnung als Prinzip

- (Kuh. K. M. P. 1. L) S.7, Mechanik nach Aristoteles
- (Kuh. K. M. P. 2. L) S.8, Aspekte der Bewegungslehre
- (Kuh. K. M. P. 3. LGV) S.22, Zustandekommen und Aufrechterhaltung von Bewegungen
- (Kuh. K. M. P. 4. L) S.23, Einführung ins Newtons Dynamik (1. und 2. Axiom)
- (Kuh. K. M. P. 5. L) S.24, Kausalitätsprinzip von Kraft und Beschleunigung
- (Kuh. K. M. P. 6. LGV) S.26, Erklärung gleicher Fallbeschleunigung und Betrachtung des Luftwiderstandes
- (Kuh. K. M. P. 7. L) S.32, Einführung in das Erhaltungsprinzip
- (Kuh. K. M. P. 8. L) S.35, Wo steckt die Spannenergie?
- (Kuh. K. M. P. 9. LGV) S.46, Kreisbewegungen
- (Kuh. K. M. P. 10. LGV) S.50 f., Kräfte in beschleunigten Bezugssystemen
- (Kuh. K. M. P. 11. LG) S.75, mechanische Schwingung
- (Kuh. K. M. P. 12. ALGV) S.76, Harmonische Schwingung
- (Kuh. K. E. P. 13. L) S.260, Lichtbrechung nach Newton
- (Kuh. K. QA. P. 14. L) S.S.310, Bohrsches Atommodell
- (Kuh. K. KE. P. 15. L) 356, Die Kernkraft
- (Kuh. K. KE. P. 16. ALV) S.366 f., WW von Alphateilchen mit Materie

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Kuh. K. M. WK. 1. ABLGV) S.28, Wechselwirkungsprinzip nach Newton
- (Kuh. K. M. WK. 2. LG) S.30, Computermodelle von Bewegungszuständen

- (Kuh. K. M. WK. 3. L) S.39, Impulserhaltung
- (Kuh. K. M. WK. 4. A) S.51, Trägheitskräfte
- (Kuh. K. M. WK. 5. L) S.66, Newtons Himmelsmechanik
- (Kuh. K. M. WK. 6. LG) S.68, Newtons Mondrechnung
- (Kuh. K. M. WK. 7. L) S.70, Newtons methodisches Konzept
- (Kuh. K. E. WK. 8. LG) S.154, Kraftwirkung auf geladene Körper

Das Feldkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Kuh. F. M. G. 1. L) S.35, Erhaltung mechanischer Energie im Gravitationsfeld
- (Kuh. F. M. G. 2. L) S.36, Lageenergie
- (Kuh. F. E. G. 3. L) S.158, Entstehung eines Gewitters
- (Kuh. F. E. G. 4. L) S.169, Elektrostatische Farblackierung
- (Kuh. F. E. G. 5. LV) S.175, Millikanversuch
- (Kuh. F. E. G. 6. AL) S.178, Braunsche Röhre
- (Kuh. F. E. G. 7. L) S.179, Wiederholung
- (Kuh. F. E. G. 8. LG) S.182, Felder bewegter Ladung
- (Kuh. F. E. G. 9. L) S.187, Helmholtz-Spulen
- (Kuh. F. E. G. 10. AL) S.200, Induktionsspannung und Lorentzkraft
- (Kuh. F. E. G. 11. L) S.206, Induktion - eine fundamentale Entdeckung
- (Kuh. F. E. G. 12. LGV) S.210, Wechselspannung
- (Kuh. F. E. G. 13. L) S.223, Energieerhaltung beim Transformator
- (Kuh. F. E. G. 14. LGV) S.228, Der Halleffekt an Halbleitern
- (Kuh. F. E. G. 15. L) S.233, Der pn-Übergang
- (Kuh. F. E. G. 16. L) S.242, Elektromagnetischer Schwingkreis
- (Kuh. F. E. G. 17. L) S.253, Elektromagnetischer Verträglichkeit
- (Kuh. F. KE. G. 18. LG) S.350, radioaktive Strahlungsarten

- (Kuh. F. KE. G. 19. LG) S.354, Massenspektrograph

Erwähnung als Prinzip

- (Kuh. F. M. P. 1. L) S.34, Einführung in die Lageenergie
- (Kuh. F. E. P. 2. LGA) S.165 f., elektrische Feldstärke
- (Kuh. F. E. P. 3. L) S.159, Entstehung von Körperströmen
- (Kuh. F. E. P. 4. L) S.160, Grundgleichung des elektrisches Feldes
- (Kuh. F. E. P. 5. LGA) S.164 f., elektrische Spannung
- (Kuh. F. E. P. 7. L) S.179, Wiederholung
- (Kuh. F. E. P. 8. ALGV) S.184 f., Lorentzkraft
- (Kuh. F. E. P. 9. LG) S.190, Teilchenbeschleuniger
- (Kuh. F. E. P. 10. LG) S.191, Elektronenmikroskop
- (Kuh. F. E. P. 11. LG) S.192, Wie entsteht ein Fernsehbild
- (Kuh. F. E. P. 12. L) S.193, Magnetschwebbahn
- (Kuh. F. E. P. 13. LGA) S.194 ff., Elektromagnetische Induktion
- (Kuh. F. E. P. 14. B) S.199, Thomsonscher Ringversuch
- (Kuh. F. E. P. 15. LG) S.248, elektrische Dipole

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Kuh. F. M. WK. 1. L) S.70, Newtons methodisches Konzept der Himmelsmechanik
- (Kuh. F. E. WK. 2. LGV) S.154 f., Einführung des elektrisches Feldes
- (Kuh. F. E. WK. 3. ABL) S.162 f., Coulombkraft
- (Kuh. F. E. WK. 4. LG) S.204 f., Vertiefte Deutung der Induktionserscheinung

Das Geometrisierungskonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Kuh. G. R. G. 1. LG) S.295, Gravitationslinsen
- (Kuh. G. KE. G. 2. G) S.353, Geometrische Deutung des Rutherfordexperiments

Erwähnung als Prinzip

- (Kuh. G. R. P. 1. LG) S.294, Geometrie auf rotierender Scheibe

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Kuh. G. R. WK. 1. L) S.294, Gravitation als Raumzeit-Krümmung

Das Austauschteilchenkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Kuh. A. KE. G. 1. LT) S.387, Die vier Grundkräfte

Erwähnung als Prinzip

Die Erwähnung als Prinzip wurde in diesem Werk nicht vorgefunden.

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Kuh. A. KE. WK. 1. LG) S.385 f., Einführung in virtuelle Teilchen

6.3.5.2. Wechselwirkungskonzepte in Impulse Physik

Das Kraftkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Imp. K. M. G. 1. ALG) S.27, Kraft bewirkt Beschleunigung
- (Imp. K. M. G. 2. L) S.35, Der waagerechte Wurf
- (Imp. K. M. G. 3. B) S.40, Kräfte an der schiefen Ebene
- (Imp. K. M. G. 4. A) S.42, Aufgaben zum Kraftbegriff
- (Imp. K. M. G. 5. LG) S.45, Mechanische Energie
- (Imp. K. M. G. 6. LT) S.48, Energieübertrag
- (Imp. K. M. G. 7. L) S.50, Die Leistung
- (Imp. K. M. G. 8. L) S.52, Der Weg zum Energieerhaltungssatz
- (Imp. K. M. G. 9. A) S.54 und 59, Wirkungsgefüge für den Raketenstart
- (Imp. K. M. G. 10. L) S.55, Anwendung von Impuls und Kraft
- (Imp. K. M. G. 11. LG) S.57, Drehbewegungen
- (Imp. K. M. G. 12. L) S.72, Untersuchung des Gravitationsgesetzes
- (Imp. K. M. G. 13. LG) S.78 ff., Kräfte bei (nicht) harmonischen Schwingungen
- (Imp. K. M. G. 14. A) S.94 f., Anwendungen zu Schwingungen
- (Imp. K. E. G. 15. LG) S.102, Die elektrische Feldstärke
- (Imp. K. E. G. 16. L) S.113, Der Millikanversuch
- (Imp. K. E. G. 17. LG) S.127, Die magnetische Flussdichte
- (Imp. K. E. G. 18. L) S.201, Korpustheorie des Lichtes
- (Imp. K. KE. G. 19. L) S.296, Alphastrahlung durch Tunneleffekt
- (Imp. K. KE. G. 20. L) S.301, Kernspaltung und Kettenreaktion

Erwähnung als Prinzip

- (Imp. K. M. P. 1. LG) S.25, Grundwissen zu Kräften

- (Imp. K. M. P. 2. LG) S.28, Beschleunigung als Folge der wirkenden Gesamtkraft
- (Imp. K. M. P. 3. ACLG) S.33, Simulation der Fallbewegung
- (Imp. K. M. P. 4. LG) S.37, Einführung von Kreisbewegungen
- (Imp. K. M. P. 5. LR) S.38 f., Kräfte bei Kreisbewegungen
- (Imp. K. M. P. 6. AB) S.41, Rutschendes Seil
- (Imp. K. M. P. 7. A) S.42, Aufgaben zum Kraftbegriff
- (Imp. K. M. P. 8. LG) S.49, Energieübertrag
- (Imp. K. M. P. 9. A) S.61, Untersuchung einer Loopingfahrt

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Imp. K. M. WK. 1. ACLG) S.29, Einführung in die computergestützte Modellbildung
- (Imp. K. M. WK. 2. L) S.30, Die Axiome von Newton
- (Imp. K. M. WK. 3. L) S.66 f., Das Gravitationsgesetz
- (Imp. K. M. WK. 4. LG) S.70, Das Entstehen der Gezeiten
- (Imp. K. M. WK. 5. A) S.73, Aufgabe zum Gravitationsgesetz
- (Imp. K. QA. WK. 6. LG) S.272, Aufbau von Festkörpern
- (Imp. K. QA. WK. 7. LG) S.277, Theorie der Rutherford-Streuung

Das Feldkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Imp. F. M. G. 1. L) S.73, Wiederholung
- (Imp. F. E. G. 2. LG) S.104 f., Energie im elektrischen Feld
- (Imp. F. E. G. 3. LG) S.108, Isolatoren erhöhen die Kapazität
- (Imp. F. E. G. 4. L) S.111, Blitze und Gewitter
- (Imp. F. E. G. 5. L) S.115, Piezoelektrische Kristalle

- (Imp. F. E. G. 6. L) S.119, Wiederholung
- (Imp. F. E. G 7. A) S.119 ff., Aufgaben zum elektrischen Feld
- (Imp. F. E. G. 8. L) S.126, Magnetfelder lenken Ströme ab
- (Imp. F. E. G. 9. L) S.127, Die magnetische Flussdichte
- (Imp. F. E. G. 10. LG) S.128, Der Hall-Effekt
- (Imp. F. E. G. 11. L) S.131, Das Magnetfeld langer Spulen
- (Imp. F. E. G. 12. LG) S.133, Supraleitung
- (Imp. F. E. G. 13. L) S.134, Bestimmung der Masse eines Elektrons
- (Imp. F. E. G. 14. L) S.137, Elektronenbeschleuniger
- (Imp. F. E. G. 15. LG) S.138, Wiederholung
- (Imp. F. E. G. 16. A) S.139 f., Aufgaben zum magnetischen Feld
- (Imp. F. E. G. 17. LGV) S.142 f., Einführung in die Induktion
- (Imp. F. E. G. 18. LGV) S.145, Lenzsche Regel
- (Imp. F. E. G. 19. LG) S.150 f., Erzeugung von Wechselstrom
- (Imp. F. E. G. 20. LG) S.158, Der elektrische Schwingkreis
- (Imp. F. E. G. 21. ALG) S.163 ff., Wiederholung und Aufgaben
- (Imp. F. E. G. 22. LG) S.186 f., Vom Schwingkreis zum Dipol
- (Imp. F. QA. G. 23. L) S.274, Reine und dotierte Halbleiter
- (Imp. F. KE. G. 24. L) S.289, Unterscheidung verschiedener Strahlungsarten
- (Imp. F. KE. G. 25. LG) S.305, Künstliche Kernfusion

Erwähnung als Prinzip

- (Imp. F. M. P. 1. A) S.74, Potential des Gravitationsfeldes
- (Imp. F. E. P. 2. LG) S.103, Das Coulombgesetz
- (Imp. F. E. P. 3. LG) S.114, Ablenkung in einer Elektronenstrahlröhre
- (Imp. F. E. P. 4. L) S.116, Der p-n-Übergang
- (Imp. F. E. P. 5. A) S.120 f., Aufgaben zum elektrischen Feld
- (Imp. F. E. P. 6. L) S.123, Einführung des Magnetismus

- (Imp. F. E. P. 7. LG) S.124 f., Das magnetische Feld
- (Imp. F. E. P. 8. LG) S.136, Massenspektroskopie
- (Imp. F. E. P. 9. A) S.139, Beschreibung des Magnetfeldes
- (Imp. F. E. P. 10. ALG) S.144, Der magnetische Fluss

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Imp. F. M. WK. 1. LGR) S.68 f., Das Gravitationsfeld
- (Imp. F. E. WK. 2. LGV) S.100 f., Das elektrische Feld
- (Imp. F. E. WK. 3. A) S.121, Aufgaben zum elektrischen Feld
- (Imp. F. E. WK. 4. ALG) S.146, Wirbelstrombremse
- (Imp. F. E. WK. 5. LG) S.188, Maxwell's Theorie zum Elektromagnetismus

Das Geometrisierungskonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Imp. G. R. G. 1. ALG) S.349 ff., Minkowski-Diagramme
- ((Imp. G. R. G. 2. LG) S.352, Minkowski-Kegel
- ((Imp. G. R. G. 3. BG) S.357, Landung eines Raumschiffs

Erwähnung als Prinzip

- (Imp. G. R. P. 1. L) S.356, Kurze Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

Die Erwähnung als Wechselwirkungskonzept wurde in diesem Werk nicht vorgefunden.

Das Austauschteilchenkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Imp. A. KE. G. 1. L) S.308, Das Standardmodell
- (Imp. A. A. G. 2. L) S.309, Entwicklung des Universums nach dem Urknall

Erwähnung als Prinzip

Die Erwähnung als Prinzip wurde in diesem Werk nicht vorgefunden.

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Imp. A. KE. WK. 1. LG) S.307, Einführung in die Austauschteilchen

6.3.5.3. Wechselwirkungskonzepte im Metzler

Das Kraftkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Met. K. M. G. 1. VG) S.18, geradlinige Bewegungen
- (Met. K. M. G. 2. L) S.46, Grundgleichung der Mechanik
- (Met. K. M. G. 3. LG) S.49, Komponentenzerlegung einer Kraft
- (Met. K. M. G. 4. A) S.51, Aufgaben zur Kraft
- (Met. K. M. G. 5. ALG) S.52 f., Kräfte bei Kreisbewegungen
- (Met. K. M. G. 6. LG) S.57 f., Herleitung von Bernoullis Gesetz
- (Met. K. M. G. 7. LG) S.58, Die aerodynamische Auftriebskraft
- (Met. K. M. G. 8. LG) S.59, Der Magnus-Effekt
- (Met. K. M. G. 9. LG) S.60 f., Mechanische Energie
- (Met. K. M. G. 10. LG) S.62, Kinetische Energie
- (Met. K. M. G. 11. LG) S.63, Spannenergie oder potentielle Federenergie

- (Met. K. M. G. 12. LG) S.64, Energieübertrag bei Reibung
- (Met. K. M. G. 13. L) S.68, Energiestrom - Leistung
- (Met. K. M. G. 14. L) S.69, Physik und Sport
- (Met. K. M. G. 15. LGV) S.72 f., Das Drehmoment und Trägheitsmoment
- (Met. K. M. G. 16. LG) S.74, Fahrleistung eines Autos (Exkurs)
- (Met. K. M. G. 17. LG) S.77, Über Drehmomente und Drehimpulse (Exkurs)
- (Met. K. M. G. 18. L) S.78 f., Wiederholung
- (Met. K. M. G. 19. L) S.88, Astronomische Massenbestimmung
- (Met. K. M. G. 20. L) S.96, Gravitation als Zentralkraft
- (Met. K. M. G. 21. L) S.111, Rücktreibende Kraft
- (Met. K. M. G. 22. ALG) S.114 f., Beispiele harmonischer Schwingungen
- (Met. K. M. G. 23. L) S.117, Differentialgleichungen in der Physik
- (Met. K. M. G. 24. L) S.126, Mechanische Wellen
- (Met. K. M. G. 25. L) S.131, Entstehung von Wasserwellen (Exkurs)
- (Met. K. T. G. 26. L) S.159, Herleitung der Grundgleichung der kin. Gastheorie
- (Met. K. T. G. 27. LG) S.163, Messung von Wärmeenergie
- (Met. K. E. G. 28. LGV) S.204 f., Millikanversuch
- (Met. K. E. G. 29. LG) S.206 f., Elektrische Leitungsvorgänge
- (Met. K. E. G. 30. L) S.221, Der Kondensator als Spannungswaage
- (Met. K. E. G. 31. LG) S.236 f., Der Halleffekt
- (Met. K. QA. G. 32. L) S.423, Chemische Bindungen
- (Met. K. KE. G. 33. L) S.498, Massendefekt
- (Met. K. KE. G. 34. L) S.504, Das Potentialtopfmodell des Kerns
- (Met. K. KE. G. 35. L) S.517, Kernfusion
- (Met. K. A. G. 36. LG) S.549, Die Masse der Sterne

Erwähnung als Prinzip

- (Met. K. M. P. 1. L) S.36, Trägheitsprinzip nach Galileo

- (Met. K. M. P. 2. L) S.38, Die Masse
- (Met. K. M. P. 3. LG) S.44 f., Zweites Newtonsches Axiom
- (Met. K. M. P. 4. L) S.46, ortsabhängige Gewichtskraft
- (Met. K. M. P. 5. LG) S.48, Dynamische und Statische Kraftmessung
- (Met. K. M. P. 6. LG) S.53, Wechselwirkungskraft zur Zentripetalkraft
- (Met. K. M. P. 7. LG) S.56, Corioliskraft
- (Met. K. M. P. 8. LG) S.63, Potentielle Energie im Gravitationsfeld
- (Met. K. M. P. 9. LG) S.87, Messung der Gravitationskonstanten
- (Met. K. M. P. 10. L) S.89, Schwere und träge Masse
- (Met. K. M. P. 11. ALG) S.90 f., Die Gezeiten
- (Met. K. E. P. 12. LG) S.232, Die magnetische Feldstärke
- (Met. K. E. P. 13. L) S.234, Die Lorentzkraft
- (Met. K. E. P. 14. LG) S.258 f., Kräfte als Ursache der Induktion
- (Met. K. E. P. 15. L) S.450, Ionen und Elektronen im Festkörper
- (Met. K. KE. P. 16. AL) S.500 f., Tröpfchenmodell des Atomkerns

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Met. K. M. WK. 1. L) S.44, Erstes Newtonsches Axiom
- (Met. K. M. WK. 2. ABLV) S.47 f., Wechselwirkungskräfte
- (Met. K. M. WK. 3. LG) S.50, Haftkräfte und Reibungskräfte
- (Met. K. M. WK. 4. LG) S.51, Antriebs- und Fahrtwiderstandskräfte (Exkurs)
- (Met. K. M. WK. 5. ALGV) S.54 f., Scheinkräfte und Inertialsysteme
- (Met. K. M. WK. 6. A) S.80, Wissenstest Mechanik
- (Met. K. M. WK. 7. L) S.82, Einführung in die Gravitation
- (Met. K. M. WK. 8. LG) S.86, Newtons Gravitationsgesetz
- (Met. K. KE. WK. 9. L) S.534, Die Farbkraft in angeregten Mesonen

Das Feldkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Met. F. M. G. 1. LG) S.63, Potentielle Energie im Gravitationsfeld
- (Met. F. M. G. 2. LG) S.65, Energieumwandlung im Gravitationsfeld
- (Met. F. M. G. 3. AL) S.95, Das Potential
- (Met. F. M. G. 4. L) S.96, Bewegungen im Gravitationsfeld
- (Met. F. M. G. 5. L) S.104, Wiederholung
- (Met. F. E. G. 6. L) S.194, Messung elektrischer Felder
- (Met. F. E. G. 7. ALG) S.200 f., Potential im radialsym. Feld
- (Met. F. E. G. 8. L) S.202, Kapazität von Kondensatoren
- (Met. F. E. G. 9. L) S.206 f., Elektrische Leitungsvorgänge
- (Met. F. E. G. 10. LG) S.210, Elektrische Spannungsquellen
- (Met. F. E. G. 11. LG) S.211, Elektrochemische Spannungsquellen
- (Met. F. E. G. 12. L) S.213, Reizleitung in Nervenzellen (Exkurs)
- (Met. F. E. G. 13. L) S.214, Austritt von Elektronen aus Leiteroberflächen
- (Met. F. E. G. 14. L) S.216, Elektronenstrahlableitkröhre
- (Met. F. E. G. 15. LG) S.220, Kapazität von Kondensatoren
- (Met. F. E. G. 16. ALG) S.226 f., Wiederholung elektrisches Feld
- (Met. F. E. G. 17. LG) S.231, Erdmagnetismus (Exkurs)
- (Met. F. E. G. 18. LG) S.232, Die magnetische Feldstärke
- (Met. F. E. G. 19. L) S.234, Die Lorentzkraft
- (Met. F. E. G. 20. LG) S.236 f., Der Halleffekt
- (Met. F. E. G. 21. LG) S.240 Das Zyklotron
- (Met. F. E. G. 22. L) S.241, Teilchenbeschleuniger (Exkurs)
- (Met. F. E. G. 23. LG) S.246, Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters
- (Met. F. E. G. 23. LG) S.247, Magnetfeld einer langen Spule
- (Met. F. E. G. 24. LG) S.248 f., Durchflutungsgesetz
- (Met. F. E. G. 25. LG) S.251, Ferromagnetische Domänen (Exkurs)

- (Met. F. E. G. 26. LG) S.252 f., Elektromagnetische Induktion
- (Met. F. E. G. 27. LG) S.253, Lenzsche Regel
- (Met. F. E. G. 28. ALG) S.257, Faradaysches Induktionsgesetz
- (Met. F. E. G. 29. LG) S.258 f., Kräfte als Ursache der Induktion
- (Met. F. E. G. 30. ALG) S.268 f., Wiederholung magnetisches Feld
- (Met. F. E. G. 31. ALGV) S.272 f., Erzeugung von Wechselspannung
- (Met. F. E. G. 32. L) S.292, Hertzscher Dipol
- (Met. F. E. G. 33. LG) S.294, Stehende em-Welle
- (Met. F. QA. G. 34. L) S.380, Die Lichtquantenhypothese
- (Met. F. QA. G. 35. A) S.402, Die Gegenfeldmethode
- (Met. F. QA. G. 36. L) S.411, Erforschung des Atoms mit Streuversuchen
- (Met. F. E. G. 37. L) S.452, Halbleiter und Dotierung
- (Met. F. E. G. 38. L) S.458, Der Feldeffekttransistor
- (Met. F. E. G. 39. L) S.465, Meissner-Ochsenfeld-Effekt
- (Met. F. E. G. 40. L) S.468, Die Fermi-Verteilung
- (Met. F. E. G. 41. L) S.470, Elektronen in Halbleitern
- (Met. F. KE. G. 42. LGV) S.482, Strahlungsarten
- (Met. F. KE. G. 43. L) S.491, Energieabgabe von Elektronen
- (Met. F. KE. G. 44. LG) S.518 f., Technik der Fusion

Erwähnung als Prinzip

- (Met. F. M. P. 1. L) S.70, Stoßvorgang Alphateilchen mit Kern
- (Met. F. M. P. 2. LG) S.94, Potentielle Energie im Gravitationsfeld
- (Met. F. E. P. 3. L) S.186, Einführung in das elekt. Feld
- (Met. F. E. P. 4. LGV) S.192, Untersuchung von radialsym. Feldern
- (Met. F. E. P. 5. LGV) S.196 f., Darstellung elektrischer Felder
- (Met. F. E. P. 6. L) S.198, Potential und Spannung im homogenen elektrischen Feld

- (Met. F. E. P. 7. A) S.201, Feldlinienuntersuchung
- (Met. F. E. P. 8. AL) S.203, Energie und Energiedichte im homogenen elekt. Feld
- (Met. F. E. P. 9. LGV) S.204 f., Millikanversuch
- (Met. F. E. P. 10. LG) S.226, Wiederholung elektrisches Feld
- (Met. F. E. P. 11. LG) S.238, Massenspektroskopie
- (Met. F. E. P. 12. LG) S.244 f., Polarlichter
- (Met. F. E. P. 13. ALG) S.264 f., Die Maxwellschen Gleichungen
- (Met. F. E. P. 14. LG) S.266, Ausbreitung von Feldern
- (Met. F. QA. P. 15. L) S.413, Atommodell nach Rutherford
- (Met. F. KE. P. 16. L) S.523, Kernspintomographie

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Met. F. M. WK. 1. ALG) S.92 f., Einführung in das Gravitationsfeld
- (Met. F. E. WK. 2. L) S.186, Das elektrische Feld
- (Met. F. E. WK. 3. LGV) S.190, Die elektrische Feldstärke
- (Met. F. E. WK. 4. ALG) S.195, Das Coulombsche Gesetz
- (Met. F. E. WK. 5. L) S.186, Das magnetische Feld
- (Met. F. KE. WK. 6. LG) S.530 f., Das Farbfeld der starken Wechselwirkung
- (Met. F. KE. WK. 7. L) S.535, Das Feld der schwachen Wechselwirkung

Das Geometrisierungskonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Met. G. M. G. 1. L) S.93, Fernwirkung und Nahwirkung
- (Met. G. M. G. 2. G) S.95, Potentialtrichter des Gravitationsfeldes
- (Met. G. E. G. 3. G) S.201, Darstellung des elektrischen Potentials
- (Met. G. R. G. 4. LG) S.360 f., Einführung in Minkowski-Diagramme

- (Met. G. R. G. 5. LG) S.362, M.-Diagramm mit Lorentztransformationen
- (Met. G. R. G. 6. LG) S.363, M.-Diagramm mit Geschwindigkeitsaddition
- (Met. G. R. G. 7. LG) S.365, Die Raumzeit - eine absolute Größe der rel. Physik (Exkurs)
- (Met. G. KE. G. 8. LG) S.501, Darstellung der negativen Bindungsenergie pro Nukleon

Erwähnung als Prinzip

- (Met. G. R. P. 1. LG) S.372, Lichtablenkung (Exkurs)

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Met. G. R. WK. 1. L) S.371, Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie (Exkurs)

Das Austauschteilchenkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Met. A. KE. G. 1. LG) S.532, Gluonen
- (Met. A. KE. G. 2. L) S.536, Streuprozesse
- (Met. A. KE. G. 3. LG) S.536, Paarerzeugung und Paarvernichtung
- (Met. A. KE. G. 4. G) S.537, Teilchenreaktionen

Erwähnung als Prinzip

- (Met. A. KE. P. 1. LG) S.537, Kernkräfte

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

Die Erwähnung als Wechselwirkungskonzept wurde in diesem Werk nicht vorgefunden.

6.3.5.4. Wechselwirkungskonzepte im Duden Physik

Das Kraftkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Dud. K. M. G. 1. LG) S.58, Modellbildung am Computer
- (Dud. K. M. G. 2. LG) S.65, Der Magnuseffekt
- (Dud. K. M. G. 3. LGR) S.82, Reibungskräfte
- (Dud. K. M. G. 4. L) S.84 Wasser bildet Tropfen
- (Dud. K. M. G. 5. LR) S.88, Trägheitskräfte
- (Dud. K. M. G. 6. LR) S.90, Überblick
- (Dud. K. M. G. 7. A) S.91 ff., Aufgabensammlung
- (Dud. K. M. G. 8. L) S.100, Einführung mechanische Arbeit
- (Dud. K. M. G. 9. LG) S.103, Kraft, Beschleunigungsarbeit und kinetische Energie
- (Dud. K. M. G. 10. LG) S.104, Kraft, Verformungsarbeit und Federspannenergie
- (Dud. K. M. G. 11. LG) S.106, Überblick
- (Dud. K. M. G. 12. L) S.113, Impuls und Kraft
- (Dud. K. M. G. 13. G) S.144, Entstehung mechanischer Schwingungen
- (Dud. K. M. G. 14. LG) S.149, Federschwinger und Fadenpendel
- (Dud. K. M. G. 15. L) S.192, Grundgleichung der kinetischen Gastheorie
- (Dud. K. E. G. 16. L) S.266, Eigenschaften geladener Körper
- (Dud. K. QA. G. 17. L) S.477, Die Schrödingergleichung
- (Dud. K. R. G. 18. LG) S.513, Inertialsysteme und das Galileische Relativitätsprinzip
- (Dud. K. M. G. 19. A) S.579, Schlepperziehen

Erwähnung als Prinzip

- (Dud. K. M. P. 1. LG) S.72 f., Einführung in Kräfte und ihre Wirkungen
- (Dud. K. M. P. 2. ALGR) S.75 f., Zusammensetzung von zwei Kräften
- (Dud. K. M. P. 3. L) S.77, Das Trägheitsgesetz
- (Dud. K. M. P. 4. ALG) S.78 f., Zweites Newtonsches Gesetz
- (Dud. K. M. P. 5. LG) S.81, Die Gewichtskraft
- (Dud. K. M. P. 6. LG) S.83, Physik im Straßenverkehr
- (Dud. K. M. P. 7. LGR) S.86 f., Kraft bei der gleichförmigen Kreisbewegung
- (Dud. K. M. P. 8. LG) S.89, Kräfte beim Schwimmen und Fliegen
- (Dud. K. M. P. 9. A) S.91 ff., Aufgabensammlung
- (Dud. K. M. P. 10. LG) S.101, Arbeit bei konstanter Kraft in Wegrichtung
- (Dud. K. M. P. 11. LG) S.102, Kraft, Hubarbeit und potenzielle Energie
- (Dud. K. M. P. 12. L) S.111 f., Impulsänderung und Kraftstoß
- (Dud. K. M. P. 13. A) S.141, Die Gewichtskraft
- (Dud. K. E. P. 14. L) S.298, Magnetische Felder
- (Dud. K. QA. P. 18. A) S.468, Gravitation im Atom
- (Dud. K. KE. P. 19. LR) S.471, Der Atomkern und seine Bestandteile
- (Dud. K. KE. P. 20. L) S.486, Das Potentialtopfmodell des Atomkerns
- (Dud. K. KE. P. 21. LR) S.492, mittlere Bindungsenergie

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Dud. K. M. WK. 1. L) S.74, Kraft als Wechselwirkungsgröße
- (Dud. K. M. WK. 2. LGR) S.80, Das Wechselwirkungsgesetz
- (Dud. K. M. WK. 3. LGR) S.113 f., Der Impulserhaltungssatz
- (Dud. K. M. WK. 4. LG) S.126 ff., Das Gravitationsgesetz
- (Dud. K. E. WK. 5. LGTR) S.267 f., Das Coulombsche Gesetz
- (Dud. K. E. WK. 6. A) S.497, Kräfte im Atomkern, Kernkraft

- (Dud. K. A. WK. 7. A) S.555, Massenanziehung und Masse der Sonne
- (Dud. K. M. WK. 8. A) S.578, Autofahren wird immer sicherer

Das Feldkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Dud. F. M. G. 1. L) S.135 f., Potenzielle Energie eines Körpers und Potential im Gravitationsfeld
- (Dud. F. E. G. 2. L) S.238, Elektrische Leitungsvorgänge
- (Dud. F. E. G. 3. L) S.242, Elektrische Leitungsvorgänge in Flüssigkeiten
- (Dud. F. E. G. 4. LG) S.278, Elektrische Feldstärke von Punktladungen
- (Dud. F. E. G. 5. LG) S.279, Überlagerung von elektrischen Feldern
- (Dud. F. E. G. 6. LG) S.280, Feldstärke und Potenzialverlauf
- (Dud. F. E. G. 7. LG) S.281 f., Kondensator als Ladungs- und Energiespeicher
- (Dud. F. E. G. 8. LG) S.284 f., Blitz und Donner (Exkurs)
- (Dud. F. E. G. 9. LG) S.288, Die Gegenfeldmethode (Exkurs)
- (Dud. F. E. G. 10. LG) S.291, Oszilloskop mit Braunscher Röhre (Exkurs)
- (Dud. F. E. G. 11. L) S.301, Dauermagnet und Weißsche Bezirke (Exkurs)
- (Dud. F. E. G. 12. L) S.304, Magnetische Flussdichte in einer langen Spule
- (Dud. F. E. G. 13. LG) S.306, Vergleich statischer elektrischer und magnetischer Felder
- (Dud. F. E. G. 14. L) S.310 f., Bestimmung der spezifischen Ladung von Elektronen
- (Dud. F. E. G. 15. LG) S.312 f., Der Halleffekt
- (Dud. F. E. G. 16. LG) S.314, Massenspektrograph
- (Dud. F. E. G. 17. A) S.316 ff., Aufgaben zu magnetischen Feldern
- (Dud. F. E. G. 18. LG) S.322 f., Induktionsspannung bei zeitlich konstantem Magnetfeld
- (Dud. F. E. G. 19. AL) S.322 f., Induktionsspannung bei zeitlich veränderlichem Magnetfeld

- (Dud. F. E. G. 20. LG) S.328, Energieerhaltung und lenzsche Regel
- (Dud. F. E. G. 21. LG) S.328, Wirbelströme
- (Dud. F. E. G. 22. L) S.330 ff., Selbstinduktion
- (Dud. F. E. G. 23. L) S.334, Überblick elektromagnetische Induktion
- (Dud. F. E. G. 24. A) S.335 ff., Aufgaben zu elektomagnetischer Induktion
- (Dud. F. E. G. 25. LGR) S.343 ff., Elektromagnetische Felder
- (Dud. F. E. G. 26. LG) S.347 ff., Abstrahlung elektromagnetischer Wellen
- (Dud. F. E. G. 27. L) S.400, Polarisierung von Licht
- (Dud. F. E. G. 28. LG) S.477, Ablenkung von Kernstrahlung
- (Dud. F. KE. G. 29. L) S.504, Zyklotron
- (Dud. F. A. G. 30. L) S.550, Magnetfelder von Planeten
- (Dud. F. E. G. 31. A) S.580 ff., Komplexe Aufgaben im Zusammenhang mit Feldern

Erwähnung als Prinzip

- (Dud. F. M. P. 1. L) S.133 f., Potenzielle Energie und Arbeit im Gravitationsfeld
- (Dud. F. M. P. 2. LG) S.139, Hohmann-Bahnen und Swing-by-Manöver
- (Dud. F. E. P. 3. LG) S.255, Der Feldeffekttransistor
- (Dud. F. E. P. 4. LG) S.270, Der Millikanversuch
- (Dud. F. E. P. 5. LG) S.273 f., Die elektrische Feldstärke
- (Dud. F. E. P. 6. LG) S.275 f., Arbeit im elektrischen Feld, Potenzial und Potenzialdifferenz
- (Dud. F. E. P. 7. ALG) S.289 f., Bewegungen geladener Teilchen im homogenen Querfeld
- (Dud. F. E. P. 8. LG) S.293, Überblick Elektrische Felder
- (Dud. F. E. P. 9. LGR) S.302 f., Beschreibung magnetischer Felder durch eine Größe
- (Dud. F. E. P. 10. LGR) S.307 f., Die Lorentzkraft
- (Dud. F. E. P. 11. LG) S.315, Überblick Statische magnetische Felder

- (Dud. F. E. P. 12. LG) S.320 f., Grundlagen der elektromagnetischen Induktion
- (Dud. F. QA. P. 13. L) S.425, Elektronenmikroskope
- (Dud. F. KE. P. 14. A) S.498, Ablenkung in Feldern
- (Dud. F. A. P. 15. ALG) S.543, Gravitationsrotverschiebung

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Dud. F M. WK. 1. LGR) S.132, Beschreibung von Gravitationsfeldern
- (Dud. F. M. WK. 2. LGR) S.140, Überblick Gravitationsfelder
- (Dud. F. E. WK. 3. LGR) S.271 f., Beschreibung von elektrischen Feldern
- (Dud. F. E. WK. 4. LGR) S.286 f., Geladene Teilchen in elektrischen Feldern
- (Dud. F. E. WK. 5. A) S.294 f., Aufgaben zu elektrischen Feldern
- (Dud. F. E. WK. 6. LGR) S.299 f., Beschreibung von magnetischen Feldern

Das Geometrisierungskonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Dud. G. M. G. 1. G) S.136, Potential des Gravitationsfeldes
- (Dud. G. E. G. 2. G) S.280, Räumliche Darstellung des Potenzialverlaufs
- (Dud. G. R. G. 3. LG) S.524, Minkowski-Diagramme (Exkurs)
- (Dud. G. R. G. 4. L) S.530, Grundzüge der Allgemeinen Relativitätstheorie

Erwähnung als Prinzip

- (Dud. G. A. P. 1. LG) S.540, Gravitationslinsen

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Dud. G. A. WK. 1. LG) S.543, Gravitationsfeld
- (Dud. G. A. WK. 2. A) S.545, Lichtablenkung

Das Austauschteilchenkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Dud. A. KE. G. 1. G) S.509, Überblick Grundbausteine der Materie
- (Dud. A. KE. G. 2. A) S.510, Fundamentale Kräfte

Erwähnung als Prinzip

Die Erwähnung als Prinzip wurde in diesem Werk nicht vorgefunden.

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Dud. A. KE. WK. 1. LGTR) S.507 f., Fundamentale Wechselwirkungen und ihre Austauschteilchen

6.3.5.5. Wechselwirkungskonzepte im Cornelsen Oberstufen Gesamtband

Das Kraftkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Cor.. K. M. G. 1. L) S.34, Definition der Kraft
- (Cor. K. M. G. 2. LG) S.38, Rücktreibende Kraft elastischer Körper
- (Cor. K. M. G. 3. LG) S.39, Rollreibung
- (Cor. K. M. G. 4. L) S.40 f., Luftwiderstand (Exkurs)
- (Cor. K. M. G. 5. A) S.43, Aufgaben zur Dynamik
- (Cor. K. M. G. 6. LA) S.46 f., Leistung beim Hochsprung
- (Cor. K. M. G. 7. LG) S.48, Spannen einer Feder

- (Cor. K. M. G. 8. L) S.50, Impuls und Kraft
- (Cor. K. M. G. 9. AG) S.57, Aufgaben zum Kraftbegriff
- (Cor. K. M. G. 10. L) S.59, Überblick Masse und Kraft
- (Cor. K. M. G. 11. LGV) S.62 f., Zentripetalkraft
- (Cor. K. M. G. 12. LA) S.67, Foucaultsches Pendel (Exkurs)
- (Cor. K. M. G. 13. LA) S.73, Rotierende Luftmasse (Exkurs)
- (Cor. K. M. G. 13. A) S.74, Aufgaben zu Kreisbewegungen
- (Cor. K. M. G. 14. L) S.82, Der Mond als fallender Körper
- (Cor. K. M. G. 15. A) S.87, Aufgaben zur Gravitation
- (Cor. K. M. G. 16. A) S.98, Aufgaben zur Gravitation
- (Cor. K. M. G. 17. L) S.182, Rücktreibende Kraft
- (Cor. K. M. G. 18. L) S.186, Rücktreibende Kraft beim Fadenpendel
- (Cor. K. M. G. 19. L S.187, Gedämpfte harmonische Schwingung
- (Cor. K. M. G. 20. L) S.219, Stehende Welle
- (Cor. K. M. G. 21. L S.335, Erstes Bohrsches Postulat
- (Cor. K. KE. G. 22. A) S.391, Zusammenhalt eines Heliumkerns
- (Cor. K. A. G. 23. L) S.453, Masse und mittlere Dichte der Sonne
- (Cor. K. T. G. 24. L) S.487, Reale Gase

Erwähnung als Prinzip

- (Cor. K. M. P. 1. L) S.35, Deutung von der Grundgleichung der Mechanik
- (Cor. K. M. P. 2. LG) S.36 f., Addition von Kräften
- (Cor. K. M. P. 3. LG) S.38, Gewichtskraft und freier Fall
- (Cor. K. M. P. 4. LG) S.38 f., Haftreibung und Gleitreibung
- (Cor. K. M. P. 5. L) S.47, Energie beim Beschleunigen
- (Cor. K. M. P. 6. L) S.48, Mechanische Energie und Kraft
- (Cor. K. M. P. 7. L) S.48 f., Energieübertragung
- (Cor. K. M. P. 8. AL) S.52 f., Sicherheit in Fahrzeugen

- (Cor. K. M. P. 9. LG) S.63, Kräfteaddition bei Kreisbewegungen
- (Cor. K. M. P. 10. L) S.70, Drehmoment
- (Cor. K. M. P. 11. LG) S.89, Potenzielle Energie im Gravitationsfeld
- (Cor. K. E. P. 12. LGV) S.114 f., Millikanversuch
- (Cor. K. E. P. 13. LG) S.123 f., Die Lorentzkraft
- (Cor. K. M. P. 14. L) S.184, Rücktreibende Kraft beim Fadenpendel
- (Cor. K. M. P. 15. L) S.189 f., Erzwungene Schwingung und Resonanz
- (Cor. K. QA. P. 16. L) S.286, Impuls von Photonen
- (Cor. K. QA. P. 17. L) S.288, Strahlungsdruck (Exkurs)
- (Cor. K. R. P. 18. L) S.444 f., Elemente der Allgemeinen Relativitätstheorie

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Cor. K. M. WK. 1. LGV) S.35, Experiment zu Newtons drittem Axiom
- (Cor. K. M. WK. 2. L) S.76 f., Das mechanistische Weltbild und seine Grenzen
- (Cor. K. M. WK. 3. L) S.83, Newtonsches Gravitationsgesetz
- (Cor. K. M. WK. 4. L) S.86, Schwerelosigkeit
- (Cor. K. KE. WK. 5. L) S.388, Tröpfchenmodell des Kerns
- (Cor. K. T. WK. 6. LG) S.500 f., Mechanische Deutung von Druck und Temperatur

Das Feldkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Cor. F. M. G. 1. L) S.84, Gravimetrie (Exkurs)
- (Cor. F. M. G. 2. LG) S.89, Potenzielle Energie im Gravitationsfeld
- (Cor. F. M. G. 3. L) S.90, Gezeiten (Exkurs)
- (Cor. F. M. G. 4. L) S.94 f., Kosmische Geschwindigkeiten
- (Cor. F. M. G. 5. L) S.99, Überblick Gravitation

- (Cor. F. E. G. 6. L) S.101, Faradayscher Käfig
- (Cor. F. E. G. 7. LG) S.104 f., Elektrische Feldstärke
- (Cor. F. E. G. 8. L) S.106, Elektrisches Feld im Plattenkondensator
- (Cor. F. E. G. 9. LG) S.107, Flächenladungsdichte und Radialfeld
- (Cor. F. E. G. 10. LG) S.108, Elektrisches Potenzial
- (Cor. F. E. G. 11. LG) S.110 f., Isolatoren im elektrischen Feld
- (Cor. F. E. G. 12. A) S.117, Aufgaben zu elektrischen Feldern
- (Cor. F. E. G. 13. LG) S.120, Magnetfeld der Erde (Exkurs)
- (Cor. F. E. G. 14. LG) S.123 f., Die Lorentzkraft
- (Cor. F. E. G. 15. L) S.125, Magnetfeld einer langen Spule
- (Cor. F. E. G. 16. LG) S.126, Materie im Magnetfeld
- (Cor. F. E. G. 17. L) S.126 f., Ferromagnetismus
- (Cor. F. E. G. 18. L) S.128, Bestimmung der Masse geladener Teilchen
- (Cor. F. E. G. 19. A) S.132 f., Aufgaben zu elektrischen und magnetischen Feldern
- (Cor. F. E. G. 20. L) S.134 f., Überblick zu elektrischen und magnetischen Feldern
- (Cor. F. E. G. 21. LG) S.136, Induktionsgesetz
- (Cor. F. E. G. 22. L) S.137, Metalldetektoren
- (Cor. F. E. G. 23. LG) S.138 f., Lenzsche Regel
- (Cor. F. E. G. 24. LG) S.141 f., Generator und Motor
- (Cor. F. E. G. 25. L) S.145, Wirbelströme
- (Cor. F. E. G. 26. L) S.149, Drehstrommotor
- (Cor. F. E. G. 27. A) S.174 f., Aufgaben zur Induktion
- (Cor. F. E. G. 28. LG) S.236 f., Entstehung von Radiowellen
- (Cor. F. QA. G. 29. L) S.284 f., Photomultiplier
- (Cor. F. QA. G. 30. L) S.366 f., Freie-Elektronen-Laser
- (Cor. F. KE. G. 31. L) S.374, Arten radioaktiver Strahlung
- (Cor. F. KE. G. 32. L) S.405, Fusionsreaktor
- (Cor. F. R. G. 33. LG) S.428, Relativität und Elektrodynamik (Exkurs)

- (Cor. F. R. G. 34. L) S.448, Gravitations-Rotverschiebung
- (Cor. F. T. G. 35. L) S.499, Erzeugung tiefer Temperaturen

Erwähnung als Prinzip

- (Cor. F. M. P. 1. L) S.88 f., Gravitationsfeldstärke
- (Cor. F. M. P. 2. L) S.89, Überlagerung von Feldern
- (Cor. F. M. P. 3. A) S.95, Aufgaben zum Gravitationsfeld
- (Cor. F. M. P. 4. LA) S.96, Swing-by-Technik (Exkurs)
- (Cor. F. E. P. 5. LG) S.106, Elektrische Spannung und Energie
- (Cor. F. E. P. 6. LG) S.116, Braun'sche Röhre
- (Cor. F. E. P. 7. LG) S.121 f., Magnetische Feldstärke
- (Cor. F. E. P. 8. LG) S.124 f., Der Halleffekt
- (Cor. F. E. P. 9. LG) S.128 f., Massenspektroskopie (Exkurs)
- (Cor. F. E. P. 10. A) S.130, Aufgaben zum magnetischen Feld
- (Cor. F. E. P. 11. LA) S.131, Polarlichter
- (Cor. F. E. P. 12. LG) S.140, Folgerungen aus dem Induktionsgesetz
- (Cor. F. E. P. 13. L) S.170, Leitung in Flüssigkeiten
- (Cor. F. KE. P. 14. A) S.416, Teilchen in einer Blasenkammer

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Cor. F. M. WK. 1. LG) S.88, Einführung in das Gravitationsfeld
- (Cor. F. M. WK. 2. LG) S.93, Äquipotenzialflächen und Feldlinien
- (Cor. F. E. WK. 3. L) S.100, Einführung in elektrische und magnetische Felder
- (Cor. F. E. WK. 4. LG) S.102 f., Kräfte zwischen geladenen Körpern
- (Cor. F. E. WK. 5. LG) S.103 f., Elektrisches Feld
- (Cor. F. E. WK. 6. LG) S.119, Magnetisches Feld
- (Cor. F. E. WK. 7. L) S.178 f., Nahwirkung statt Fernwirkung

Das Geometrisierungskonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Cor. G. M. G. 1. G) S.91, Potenzialtrichter von Erde und Mond
- (Cor. G. R. G. 2. LG) S.435 f., Einführung in Minkowski-Diagramme
- (Cor. G. R. G. 3. LGA) S.437, Lichtkegel und Kausalität
- (Cor. G. R. G. 4. LG) S.446, Lichtablenkung im Gravitationsfeld
- (Cor. G. R. G. 5. L) S.451, Überblick Relativitätstheorie

Erwähnung als Prinzip

- (Cor. G. R. P. 1. LG) S.446 f., Gravitationswellendetektor

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Cor. G. R. WK. 1. LGA) S.448 f., Krümmung der Raumzeit

Das Austauschteilchenkonzept

Erwähnung als Gesetz/Vorschrift

- (Cor. A. KE. G. 1. L) S.413, Schwache Wechselwirkung
- (Cor. A. KE. G. 2. T) S.413, Wechselwirkungen mit ihren Austauschteilchen

Erwähnung als Prinzip

- (Cor. A. KE. P. 1. LG) S.412, Gluonen

Erwähnung als Wechselwirkungskonzept

- (Cor. A. KE. WK. 1. LG) S.411 f., Einführung in die Austauschteilchen
- (Cor. A. KE. WK. 2. A) S.414, Aufgabe zu Austauschteilchen

6.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit werden die Ergebnisse nachfolgend tabellarisch aufgezeigt. Um auch die Möglichkeit zu haben, die Schulbücher untereinander zu vergleichen, wird die Anzahl der Fundstellen auf die Anzahl der Buchseiten normiert und einheitlich mit einem Faktor 100 versehen.

6.4.1. Kuhn Physik 2

	G	rel.	P	rel.	WK	rel.
Kraft	24	6,2	16	4,1	8	2,1
Feld	19	4,9	15	3,9	4	1,0
Geometrisierung	2	0,5	1	0,3	1	0,3
Austauschteilchen	1	0,3	0	0	1	0,3

Tabelle 6.1.: WW-Konzepte in Kuhn Physik 2

6.4.2. Impulse Physik

	G	rel.	P	rel.	WK	rel.
Kraft	20	5,4	9	2,4	7	1,9
Feld	25	6,8	10	2,7	5	1,4
Geometrisierung	3	0,8	1	0,3	0	0
Austauschteilchen	2	0,5	0	0	1	0,3

Tabelle 6.2.: WW-Konzepte in Impulse Physik

6.4.3. Metzler Physik

	G	rel.	P	rel.	WK	rel.
Kraft	36	6,3	16	2,8	9	1,6
Feld	44	7,7	16	2,8	7	1,2
Geometrisierung	8	1,4	1	0,2	1	0,2
Austauschteilchen	4	0,7	1	0,2	0	0

Tabelle 6.3.: WW-Konzepte in Metzler Physik

6.4.4. Duden Physik

	G	rel.	P	rel.	WK	rel.
Kraft	19	3,2	21	3,6	8	1,4
Feld	31	5,3	15	2,5	6	1
Geometrisierung	4	0,7	1	0,2	2	0,3
Austauschteilchen	2	0,3	0	0	1	0,2

Tabelle 6.4.: WW-Konzepte in Duden Physik

6.4.5. Cornelsen Gesamtband Oberstufe

	G	rel.	P	rel.	WK	rel.
Kraft	24	4,4	18	3,3	6	1,1
Feld	35	6,4	14	2,6	7	1,3
Geometrisierung	5	0,9	1	0,2	1	0,2
Austauschteilchen	2	0,4	1	0,2	2	0,4

Tabelle 6.5.: WW-Konzepte in Cornelsen Gesamtband Oberstufe

6.5. Überarbeitung und Revision des Kategoriensystems und der Kategoriendefinition

Es fand nur eine kleine Überarbeitung statt. Dabei wurde das Konzept der Geometrisierung ausgeweitet, das heißt es wurde nicht alleine die Geometrisierung im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie beachtet, sondern es wurden auch Geometrisierungen in anderen Kontexten aufgeführt, beispielsweise wenn die Wirkung des elektrischen Potenzials graphisch visualisiert wurde.

6.6. Ergebnisinterpretation

Die Ergebnisse wurden zunächst in die Kategorien unterteilt. In diesen werden sie dann in die Unterkategorien sowie anschließend nach Themengebieten aufgesplittet, graphisch dargestellt und interpretiert.

6.6.1. Das Kraftkonzept

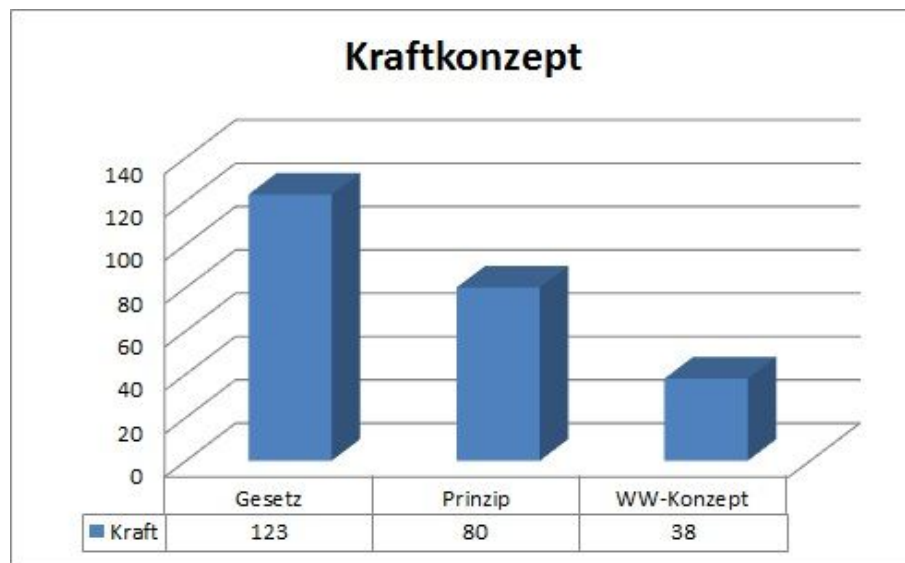


Abbildung 6.2.: Kraftkonzept in Qualitäten

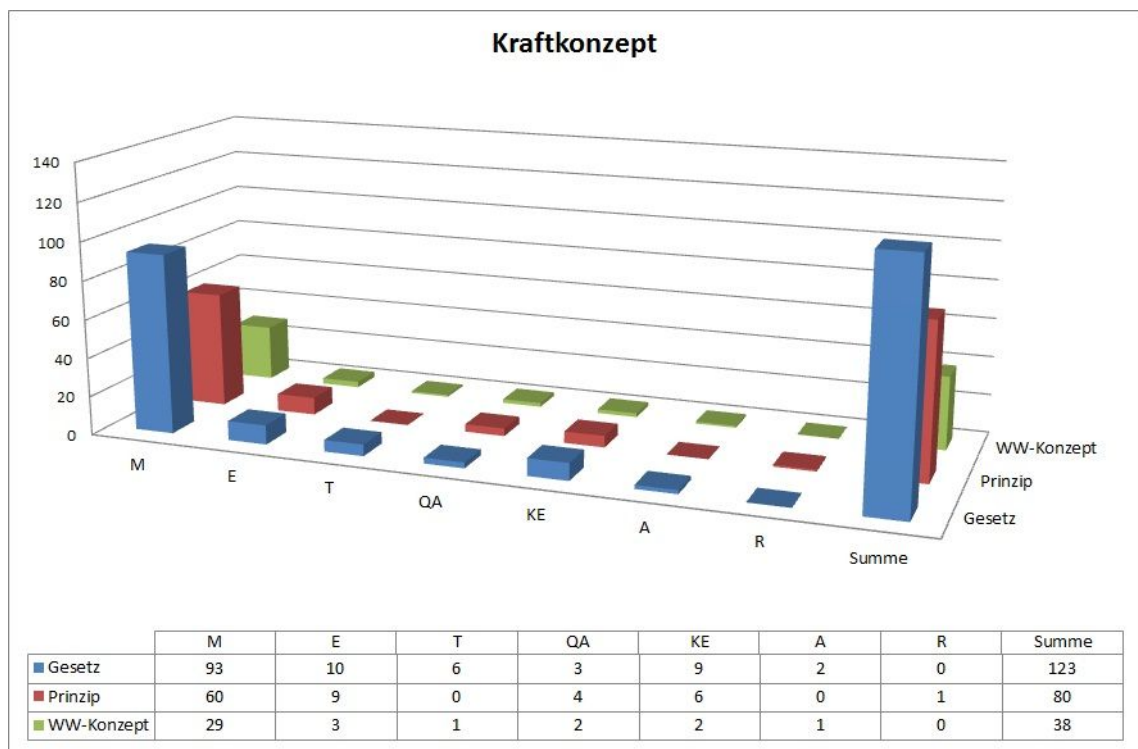


Abbildung 6.3.: Kraftkonzept in Qualität und Teilgebieten

Die Graphik 6.2 zeigt, wie erwartet, eine stetige Abnahme in der Qualität in dem soeben definierten Sinn vgl. 6.3.3. Das Konzept der Kraft wird relativ häufig zur Erklärung von physikalischen Inhalten genutzt, aber es finden zumeist nur Nennungen statt, ohne auf die Wechselwirkungseigenschaften genauer einzugehen. Es stehen zwar zumindest 38 Erwähnungen als Wechselwirkungskonzept den 123 Nennungen als reines Gesetz/Vorschrift gegenüber, aber resümierend ist festzuhalten, dass lediglich 15% als Wechselwirkungskonzept behandelt und 33% als Prinzip behandelt werden. In der Gesamtschau kommen Prinzip und Wechselwirkungskonzept auf rund 50% der Nennungen.

Wenn man Graphik 6.3 betrachtet, fällt auf, dass, wie erwartet, ein Großteil der Nennungen in der Mechanik stattfinden, aber auf Platz 2 die Elektrodynamik dicht folgt; auf Platz 3 liegt die Kern- und Elementarteilchenphysik. Inhaltlich liegt dies offenkundig daran, dass das Feldkonzept das fachdidaktische Paradebeispiel für die Behandlung der Elektrodynamik ist, so dass viele Nennungen in diesem physikalischen Teilgebiet eher dem Feld und dem Kraftbegriff zugesprochen wird.

6.6.2. Das Feldkonzept

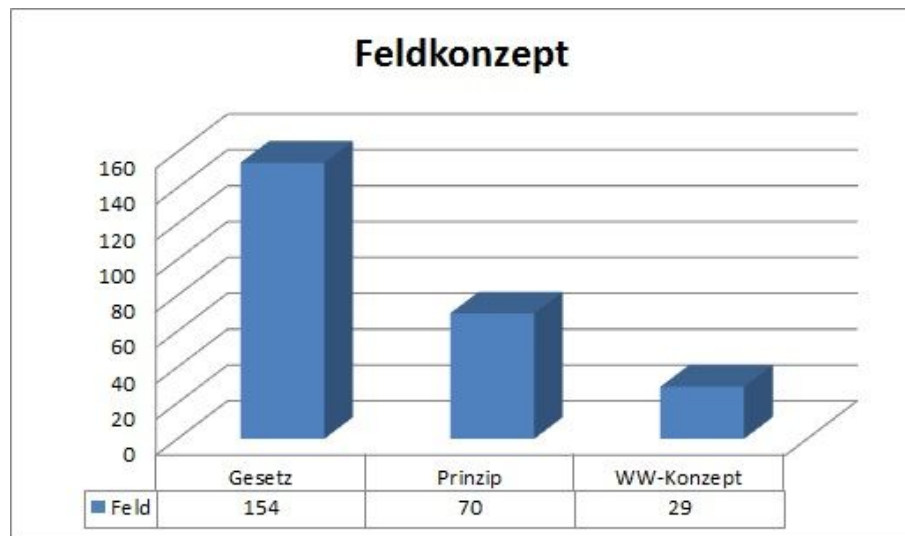


Abbildung 6.4.: Feldkonzept in Qualitäten

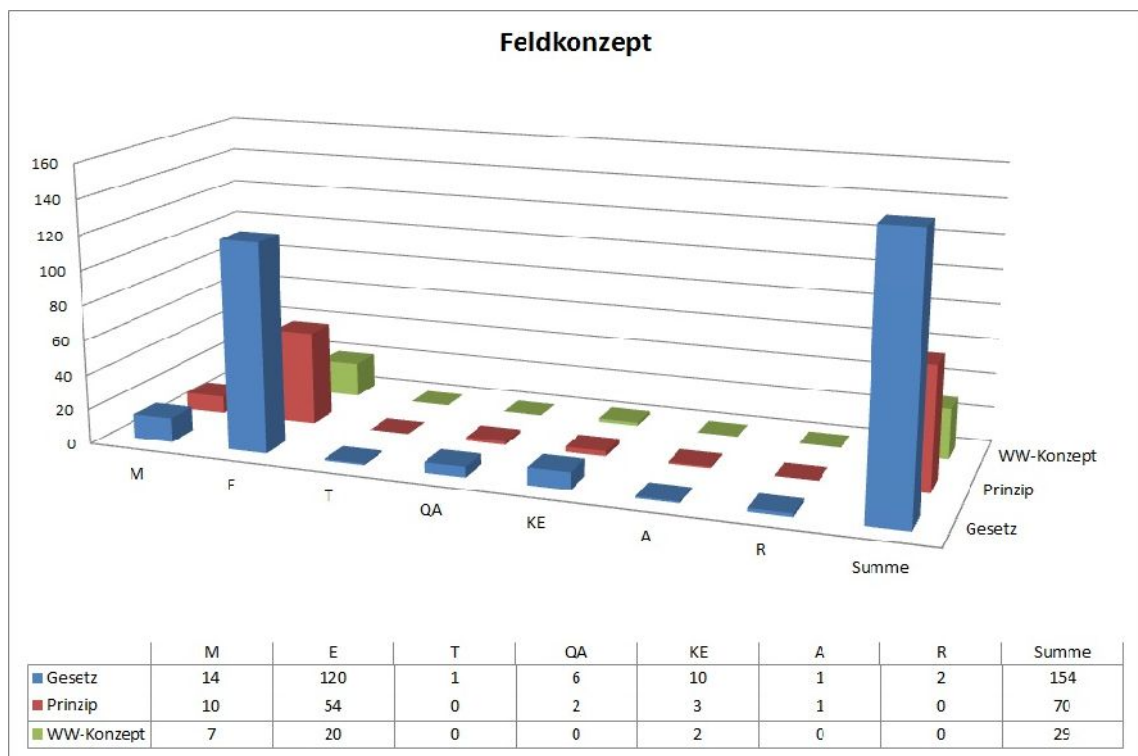


Abbildung 6.5.: Feldkonzept in Qualität und Teilgebieten

Als Erstes fällt auf, dass das Feldkonzept mit 154 Nennungen als Gesetz/Vorschrift eine größere Häufigkeit aufweist als das Kraftkonzept. Aber bei Betrachtung der Qualitätsaufteilung wird deutlich, dass das Feldkonzept wesentlich öfter als Gesetz/Vorschrift Erwähnung findet. So wird es als Prinzip mit 70 Erwähnungen nur in 28% und als Wechselwirkungskonzept mit 29 Nennungen sogar nur in 11% der Fälle behandelt (vgl. 6.4). Insgesamt wird es mit 40% als sachgemäße Wirkung verstanden. Damit ist es nicht so stark vertreten wie das Kraftkonzept, aber immer noch vergleichsweise häufig.

Zu einem sehr großen Teil wird das Feldkonzept, wie erwartet, in der Elektrodynamik benutzt (vgl. 6.5). Aber mit 31 Nennungen wird es auch noch relativ oft in der Mechanik erwähnt, wobei es sich hierbei immer um die Betrachtung des Gravitationsfeldes handelt. Weiterhin findet man es noch teilweise in der Kern- und Elementarteilchenphysik, ein Grund hierfür war das weniger ausgeprägte Austauschteilchenkonzept in einem der betrachteten Bücher. In diesem Band wurden in der Elementarteilchenphysik die vier fundamentalen Wechselwirkungen über Felder (Gravitations-, Elektromagnetisches-, Schwaches- und Farbfeld) betrachtet, anstatt über Feldbosonen.

6.6.3. Das Geometrisierungskonzept

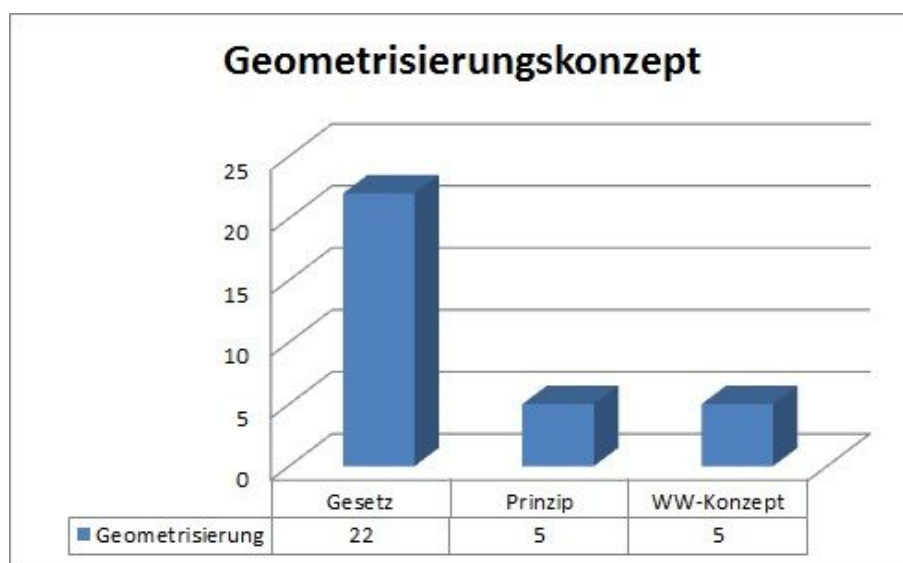


Abbildung 6.6.: Geometrisierungskonzept in Qualitäten

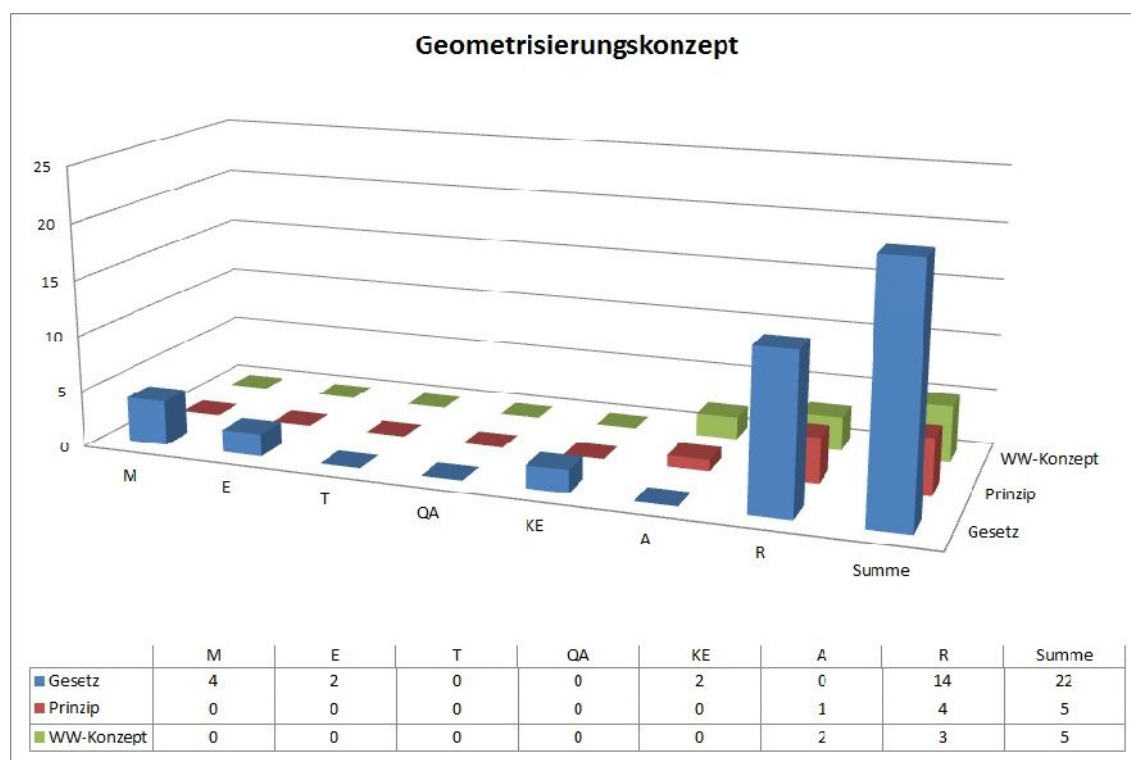


Abbildung 6.7.: Geometrisierungskonzept in Qualität und Teilgebiete

In erster Linie sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass das Geometrisierungskonzept nicht nur in Bezug auf die Raumzeit-Krümmung und Minkowski-Diagramme zum Tragen gekommen ist, sondern auch bei graphischen Darstellungen von Potenzialen.

In Graphik 6.6 sieht man eine sehr große Diskrepanz zwischen Erwähnungen als Gesetz und Prinzip oder Wechselwirkungskonzept, wobei Nennungen als Prinzip und Wechselwirkungskonzept gleich auf sind. Aber die Geometrisierung in einem Wirkungsgedanken steht mit gut 30% gegenüber 70% als reine Erwähnung. Erklärung hierfür ist höchstwahrscheinlich die mathematische Schwierigkeit, mit diesem Wechselwirkungskonzept zu arbeiten und das Fehlen des Geometrisierungsgedankens in den Lehrplänen der gymnasialen Oberstufe.

Bei Betrachtung der Aufteilung in die Teilgebiete der Physik 6.7 ist es wenig erstaunlich, dass ein Großteil der Erwähnungen in der Relativitätstheorie zu finden ist. Weitere Erwähnungen als Gesetz sind in der Mechanik, Elektrodynamik und in der Kern- und Elementarteilchenphysik vorhanden, hierbei handelt es sich um die eben erwähnten graphischen Behandlungen von Potenzialen. Die drei Wirkungsbehandlungen in der Astrophysik kommen durch die Behandlung von Allgemeinen-Relativitätstheorie-Gedanken in Astronomiekapiteln zustande.

6.6.4. Das Austauschteilchenkonzept



Abbildung 6.8.: Austauschteilchenkonzept in Qualitäten

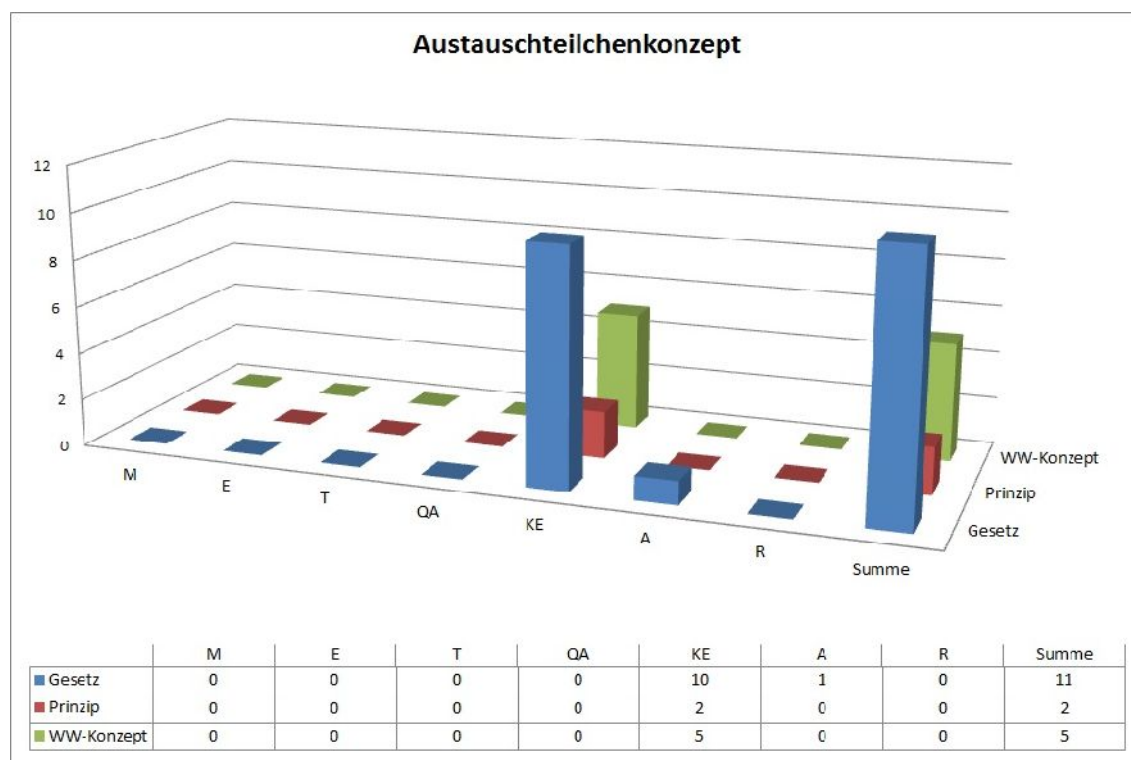


Abbildung 6.9.: Austauschteilchenkonzept in Qualitäten und Teilgebieten

Bei so wenigen Nennungen, von insgesamt 18 Stück über fünf Büchern hinweg, ist eine tiefgründige Interpretation der Qualitäten recht schwierig. Einzig auffällig ist, dass das Konzept im Rahmen des Wechselwirkungsgedanken öfters genannt wurde als reines Prinzip, wobei man hierbei aber beachten muss, dass schon allein der Begriff der Wechselwirkung mit seinen Hintergrundgedanken im Teilgebiet der Teilchenphysik beständigen Anklang findet.

Das Austauschteilchenkonzept ist, wie man in 6.8 sieht, in der Kern- und Elementarteilchenphysik vertreten, in der es auch seinen geschichtlichen Ursprung hat. In anderen Teilgebieten, in denen makroskopische Größenordnungen untersucht werden, kommt es, wie erwartet, nicht vor. Die einzige weitere Nennung ist zu finden bei der Behandlung des Urknalles mit der Entwicklung der vier fundamentalen Kräften des Universums im Kapitel der Astrophysik.

6.6.5. Überblick

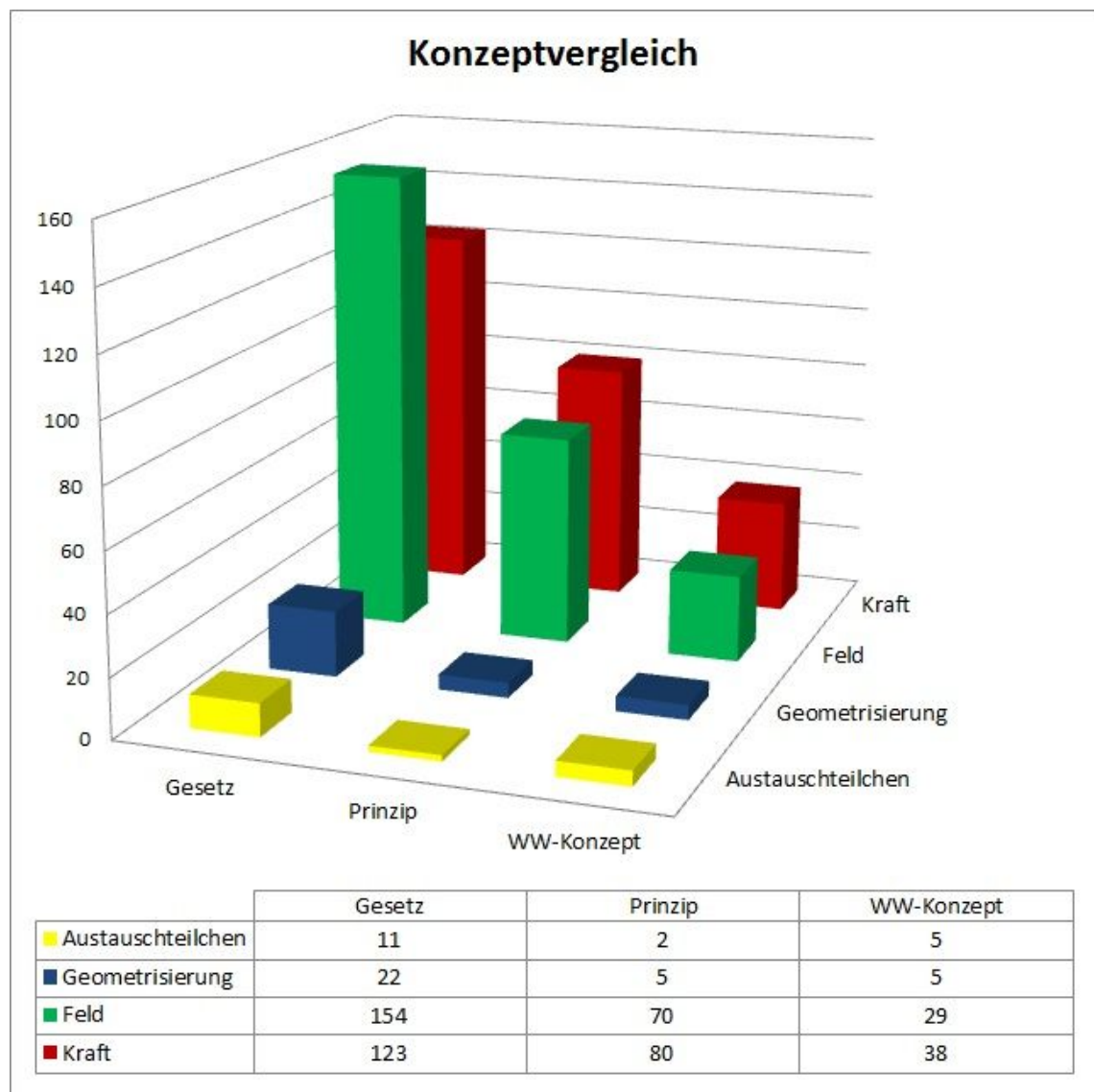


Abbildung 6.10.: Konzeptvergleich mit ihren Qualitäten

Mit insgesamt 241 Erwähnungen liegt das Kraftkonzept mit den 253 Erwähnungen des Feldkonzeptes relativ gleich auf. Das Geometrisierungskonzept mit 32 und das Austauschteilchenkonzept mit 18 Nennungen liegen sehr weit dahinter.

In der gymnasialen Oberstufe werden zum Großteil der Zeit makroskopische Größenordnungen untersucht, in denen das Kraft- sowie das Feldkonzept ihren Vorzug haben. Auch in den mikroskopischen Größenordnungen, in denen man sich in der Quanten-, Atom- und Kernphysik beschäftigt, werden eher das Feld und die Kraft benutzt, da die Beschreibungen gerade im Grundkurs sehr phänomenologisch sind

und keine genaue mathematische Behandlung möglich oder nötig erscheint. Astronomische Größenordnungen werden nur in der Einführungsphase recht kurz im Rahmen der Gravitation behandelt, die kaum über Newtons Gravitationsgesetz hinausgeht, welches seinerseits wiederum mit dem Feld- und dem Kraftkonzept adäquat zu beschreiben ist. Ein vertiefter Einblick ist in dieser Jahrgangstufe bei fehlender Kenntnis über Differentialrechnung problematisch.

Das heißt letztendlich, dass das Austauschteilchen- sowie das Geometrisierungskonzept in der gymnasialen Oberstufe eigentlich nicht bei der gegenwärtigen Stoffverteilung gebraucht werden und auch nicht in den Lehrplänen (zu Erscheinungsdatum des Buches) explizit erwähnt werden. Aus diesem Blickwinkel ist die Anzahl an Erwähnungen dieser Konzepte recht hoch und zeigt, dass die Bücher den Schülerinnen und Schülern eine Möglichkeit weitere Ausblicke in die Physik bieten wollen.

Den starken Abfall zwischen Erwähnung als Gesetz/Vorschrift, Prinzip und Wechselwirkungskonzept kann man wahrscheinlich dahingehend erklären, dass die Schullehrbücher im hohen Maße orientiert sind, handwerkliche Lösungen für physikalische Probleme zu bieten. Offensichtlich kommt der konzeptartige Charakter der Physik bislang nur sehr oberflächlich zur Sprache. Der Begriff der Wechselwirkung kommt an manchen Stellen in floskelhafter Verwendung vor - als Abkürzung einer eigentlich komplizierteren physikalischen Beschreibung, die auf Teilprozesse eingehen müsste. Ob damit immer die angestrebte textliche Vereinfachung erreicht wird, muss dahingestellt bleiben.

Noch eine Anmerkung bezüglich des Begriffs Wechselwirkung:

Zwei von den fünf untersuchten Büchern haben viel mit diesem Begriff über das gesamte Buch hinweg gearbeitet. Die drei anderen Werke benutzten es hingegen fast nur in der Atom-, Kern-, und Teilchenphysik zur Beschreibung von Sachverhalten. Man hatte fast das Gefühl, dass der Begriff immer dann zum Tragen kam, wenn eine nähere Erläuterung des Sachverhaltes zu kompliziert wäre bzw. zu viel Raum eingenommen hätte.

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

Erzähle mir und ich vergesse.
Zeige mir und ich erinnere
mich.
Lass es mich tun und ich
verstehe.

(Konfuzius)

In diesem Kapitel werden mögliche Unterrichtseinheiten zu den vier Wechselwirkungskonzepten vorgestellt. Alle Einheiten sind nach dem im zweiten Kapitel beschriebenen genetischen Prinzip Wagenscheins aufgebaut, um den Schülerinnen und Schülern ein historisch genetisches Lernen zu ermöglichen. Grund hierfür ist der zu verstehende konzeptuale Gedanke der jeweiligen Wechselwirkung, der nur in einem entwickelnden historischen Kontext adäquat zu verwirklichen ist. So viel wir auch in eine in der Welt vorhandene „wirkliche Physik“ rekurrieren mögen - ohne vom Geist des Menschen erfundene begriffliche Werkzeuge würde uns die Erklärung der Welt versagt bleiben. Gerade bei der Behandlung der physikalischen Grundprinzipien kommt man nicht umhin, das historisch Gewordene in der Formulierung und im Verständnis zu betonen. Eine geschichtliche Entwicklung physikalischer Grundlagen wird auch von vielen Fachdidaktikern, bspw. von Jung, Pukies und Kuhn unterstützt. Gerade die in Mode gekommenen prozessbezogenen Kompetenzen werden bei der Analyse historischer Erkenntnisprozesse stark angesprochen, diese Prozesse sind in vielen Lehrplänen sogar fest verankert.⁷⁴

Um verschiedene Konzepte als gleichberechtigte Beschreibungsweisen der Realität anzuerkennen, müssen Schülerinnen und Schüler zu verschiedenartigen Konzeptwechseln befähigt sein. Dies betrifft einerseits den freien Konzeptwechsel innerhalb der physikalischen Gedankenwelt - etwa vom Kraft zum Feldbegriff - andererseits den Wechsel von vorphysikalischen Konzepten zu fachwissenschaftlichen Konzepten. Gerade bei den Begriffen Kraft und Feld werden die Schülerinnen und Schüler aus Alltagsvorstellungen heraus falsche Präkonzepte - Misskonzepte - haben, die

⁷⁴z.B. NRW: SuS sollen naturwissenschaftliches Arbeiten reflektieren sowie Veränderungen im Weltbild und in Denk- und Arbeitsweisen in ihrer historischen und kulturellen Entwicklung darstellen.

aufgehoben werden und durch eine richtige physikalische Sichtweise ersetzt werden müssen. Der hierfür nötige Konzeptwechsel ist schwierig und kann nach Untersuchungen (vgl. [KIR09, 615]) die Vorstellungen der Schülerinnen und Schüler nicht völlig aufheben. Um dies doch ansatzweise zu verwirklichen, bieten es sich an, auf eine historische Entwicklung zu setzen. In der Geschichte gab es immer Gelehrte, die unsere heutigen falschen Vorstellungen teilten und diese aus den unterschiedlichsten Gründen aufgeben mussten. Dieses Aufgeben der Gelehrten soll den Schülerinnen und Schülern vor Augen geführt werden, um ihrerseits eine Transformation der eigenen Vorstellung zu ermöglichen. Somit sollen die Schülerinnen und Schüler zum einen Schritt für Schritt an das neue Konzept herangeführt werden und zum anderen das Betreffende auch als Konzept annehmen und verstehen. Auch Barth und Höttecke schreiben: „Gemäß eines moderat konstruktivistischen Lehr-Lern-Paradigmas, wie es sich in den letzten Jahrzehnten in den naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken etabliert hat, soll Fachunterricht Gelegenheitsstrukturen bereitstellen, innerhalb derer Lernende ihre vorunterrichtlichen Vorstellungen über Phänomene und ihre Erklärungen entwickeln. Dazu werden ihnen ihre [Konzepte] bewusst gemacht, reflektiert und hin zu physikalischen [Konzepten] entwickelt“ [HOE11, 6]. Die Phasen eines diesbezüglich entwickelten Phasenmodells von A. Widodo und R. Duit können von historischen Beispielen profitieren (vgl. [HOE11, 6]).

In den Unterrichtsreihen werden dabei historische Texte dann eingesetzt, wenn die Schülerinnen und Schüler Argumentationslinien verfolgen, die Parallelen zu Entwicklungsstufen der physikalischen Konzeptbildung aufweisen. Dieser Einsatz erfolgt unter den drei folgenden Gesichtspunkten:

- Die Texte regen die Schülerinnen und Schüler an, ihre Überlegungen mit physikalischen Theorieansätzen zu vergleichen und daran zu explizieren.
- Geeignete Texte zeigen Schülerinnen und Schülern, dass Physik nicht nur aus einer Sammlung von eindeutigen Fakten und Formeln besteht, sondern dass es auch gegensätzliche Standpunkte zu einem Problem geben kann, die kontrovers diskutierbar sind.
- Die Erfahrungen, dass physikalische Theorien, die über lange Zeit Bestand hatten und von anerkannten Physikern vertreten wurden, heute durch andere ersetzt oder verbessert sind, vermittelt den Lernenden, dass Physik eine dynamische fortschreitende Disziplin ist und auch der heutige Erkenntnisstand nicht unumstößlich ist. (vgl. [SCH85, 528])

Die Unterrichtseinheiten zu den Konzepten der Kraft und des Feldes werden mit 12-14 Unterrichtsstunden (etwa vier Wochen in einem Grundkurs) und die Konzepte der Austauschteilchen und der Geometrisierung mit jeweils etwa 10 Unterrichtsstunden vorgeschlagen. Die Zeiten sind den aktuellen Lehrplänen geschuldet, die kaum Platz für „Exkursionen“ in andere Teilbereiche der Physik erlauben, wodurch gerade eine Bearbeitung des letzten Konzepts etwas länger als 10 Stunden (zwei Wochen in einem Leistungskurs) nicht möglich scheint. Wie schon angesprochen etabliert sich

die Teilchenphysik zusehends in der gymnasialen Oberstufe. Vorreiter ist das Land NRW, hier ist die Elementarteilchenphysik integraler Bestandteil und wird in einem beispielhaften schulinternen Lehrplan des Ministeriums zeitlich mit einer elfstündigen Unterrichtssequenz versehen.

Die Unterteilung der Unterrichtsreihe findet in einzelne Schulstunden (45 Minuten) statt. Nachfolgend wird ein Überblick der Reihen geliefert, im Anhang (vgl. C) lassen sich detaillierte Verlaufspläne mit den zugehörigen didaktisch-methodischen Überlegungen zu jeder einzelnen Unterrichtsphase finden. Ferner sind dort auch Lesetexte, Arbeitsblätter und weitere Materialien für die jeweiligen Unterrichtsstunden aufgelistet. Da jede Schule ein anderes Buch benutzt, werden die Reihen ohne ein explizites Schulbuch dargestellt. Bei passend dargestellten Experimenten, Beispielen oder Aufgaben ist der Einsatz eines Buches zur Unterstützung natürlich wünschenswert.

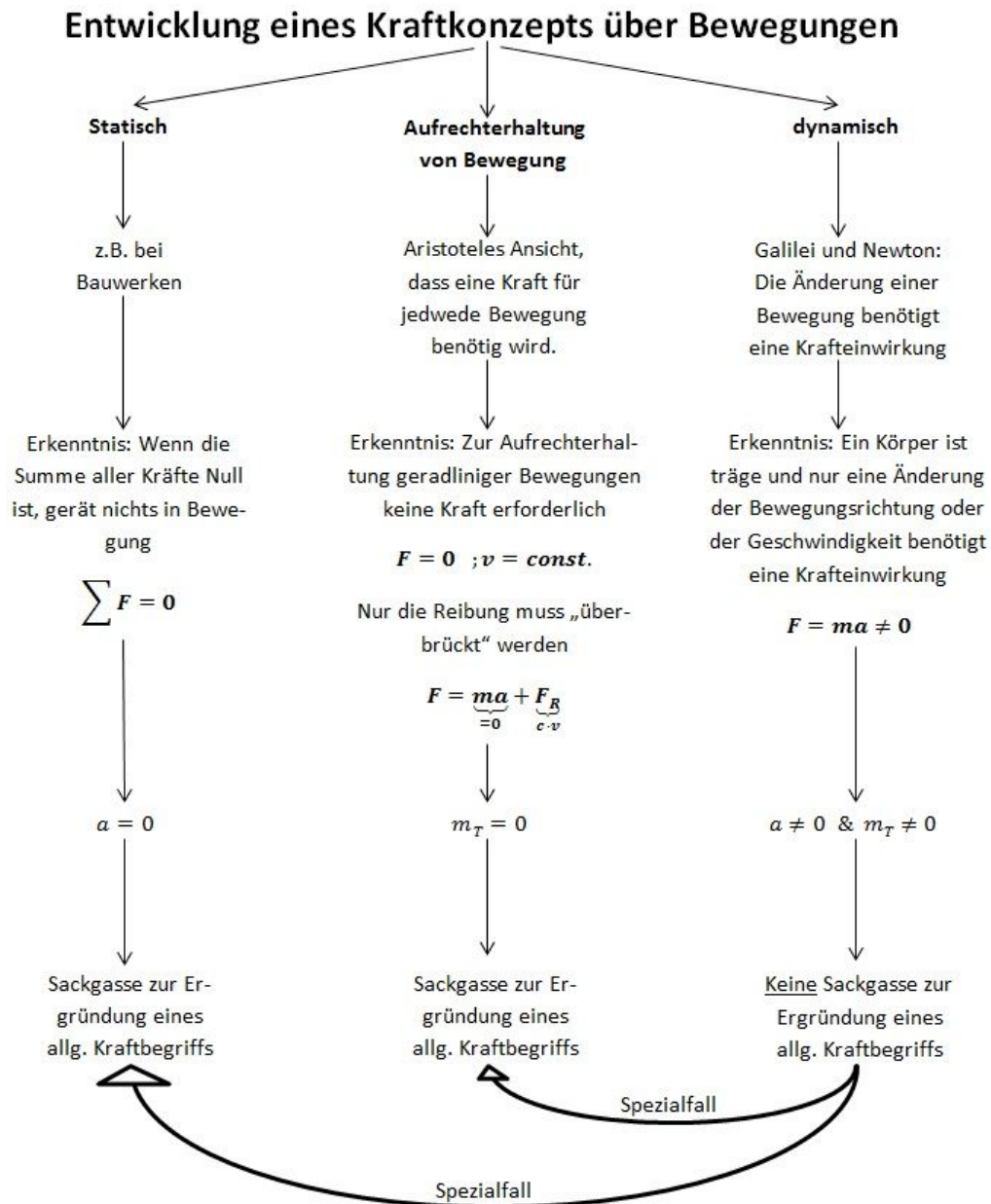
Der Erkenntnisgewinn ist bei Schülerexperimenten in der Regel immer höher als bei Demonstrationsexperimenten. Leider stehen nicht immer alle Experimente in ausreichender Zahl zur Verfügung oder benötigen zu viel Zeit. Bei Experimenten, die nur vorgeführt werden können, sollten sich alle Schülerinnen und Schüler, wenn die Sicherheit gewährleistet ist (Hochspannungsexperimente), räumlich dicht am Ereignis befinden. Die aktive Einbindung kann dabei arbeitsteilig stattfinden, so gibt es Gruppen, die das Experiment aufbauen, welche, die es durchführen und Gruppen, die das Ergebnis an der Tafel festhalten. Bleiben durch das Experiment bedingt Schülergruppen außen vor, kann ihr Auftrag sein, das Experiment sehr genau zu beobachten und die Ergebnisse im Anschluss detailliert zu erläutern. Somit ist zum einen gewährleistet, dass die Schülerinnen und Schüler bei Lehrerexperimenten nicht einfach nur dasitzen und zuschauen und zum anderen, dass sie durch die Selbsttätigkeit eine höhere Erkenntnisgewinnung verzeichnen können.

7.1. Das Kraftkonzept

Als Vorwissen für die Einführung des Kraftkonzeptes sollten gleichförmige und gleichmäßig beschleunigte Bewegungen (darunter freier Fall) thematisiert worden sein, sodass die physikalischen Begriffe der Strecke, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung bei den Schülerinnen und Schülern vorhanden sind. Nützlich wäre es auch, den eben genannten Größen den Vektorcharakter schon zugeschrieben zu haben.

7.1.1. Ein anderer Weg

Wie eben beschrieben wurde, sollen die Schülerinnen und Schüler das Kraftkonzept in einem historischen Rahmen aus den oben genannten Gründen vermittelt bekommen. Aus fachwissenschaftlicher Sicht soll an dieser Stelle eine andere interessante Herangehensweise kurz angeschnitten werden. Vom heutigen Standpunkt sind uns viele Irrungen und Wirrungen der geschichtlichen Entwicklung im Rahmen des Kraftbegriffs bekannt und alle nötigen Definitionen liegen mathematisch sauber formuliert vor. Damit hat man die Möglichkeit, einen Blick von „oben“ auf die Sachlage zu werfen, wodurch sich eine folgerichtige Struktur ergeben kann.



Die Entwicklung des Kraftbegriffs erfolgte in der Historie - wie so vieles - intuitiv. Grundlegend war immer die Betrachtung von Bewegungen. So kann man aus heutiger Sicht sagen, dass eine Aufgliederung in die drei Aspekte - Statik, Aufrechterhaltung von Bewegung und Dynamik - möglich ist.

- Statisch gesehen war gewünscht, dass es eben keine Bewegung geben durfte, Gebäude sollten stabil sein. Bei dieser Herangehensweise fokussierte man zwangsläufig ein Kräftegleichgewicht, bei dem die Summe aller angreifenden Kräfte gleich Null sein muss. Wir würden heute sagen, dass die einwirkende

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

Beschleunigung Null gesetzt wird, damit wird aber auch deutlich, dass aus der Statik heraus kein Zugang zum modernen Kraftbegriff möglich war. ($\sum F = 0$, da $a = 0$)

Mit diesem Verständnis - einer nicht vorhandenen Beschleunigung - war ein Ausbau des Kraftbegriffs nicht möglich.

- Zur Aufrechterhaltung einer Bewegung glaubte man - aus Alltagserfahrungen her auch gut begründbar -, dass eine Kraft bei jeder Bewegung von Nöten wäre. Letztendlich musste hier aber nur die Reibung kompensiert werden, sprich die eigentlich bewegende Kraft war, sofern eine konstante Geschwindigkeit vorlag, immer gleich Null. Hier wurde also die träge Masse nicht beachtet. ($F = 0$, da $m_T = 0$)

Mit diesem gegebenen Sachverhalt - einer trägen Masse von Null - war ein Ausbau des modernen Kraftbegriffs nicht möglich.

- Erst nachdem Newton die Änderung von Bewegungen in den Blickpunkt rückte, war die Voraussetzung zur Definition eines dynamischen Kraftbegriffes gelegt. Die Erkenntnis, dass die Aufrechterhaltung einer Bewegung keine Kraft erfordert, sondern allein durch die Trägheit der Masse gegeben ist, ermöglichte es, Kräfte zu betrachten, die nicht Null sind. ($F \neq 0$)

Mit dieser Ansicht waren allgemeine Schlüsse möglich, insbesondere wurden die anderen Sachverhalte als Spezialfälle der dynamischen Ansicht nun auch möglich zu untersuchen.

7.1.2. Stunden der Unterrichtseinheit

1. Schülervorstellungen sammeln und diskutieren.
2. Die Ideen des Aristoteles.
3. Schwächen des „Grundgesetzes der Aristotelischen Bewegungslehre“.
4. Die Kraftdefinitionen von Descartes und Leibniz - Schwächen und Stärken.
5. Weiterführung der 4. Stunde.
6. Das Galileische Trägheitsprinzip und seine Folgen.
7. Weiterführung der 6. Stunde.
8. Kraftwirkung bei Geschwindigkeitsänderung - Ausnutzung des Axioms zur Auffindung einer möglichen Kraftdefinition.
9. Wechselwirkung - Eine Untersuchung Newtons drittem Axiom.
10. Weiterführung der 9. Stunde.
11. Newton und seine Axiome.

12. Übungen.
13. Was wissen wir? - Wiederholung zur Geschichte des Kraftbegriffs und einen Transfer in Richtung Feldbegriff.
14. Weiterführung der 13. Stunde.

Da die vorgeschlagene Unterrichtsreihe höchstwahrscheinlich in der Einführungsphase (Klasse 11) angesiedelt würde, kann man das Kraftkonzept im Anschluss an die Betrachtung von Drehbewegungen, beispielsweise im Rahmen der Gravitation, weiter vertiefen. Des Weiteren sei gesagt, dass die Behandlung des Konzeptes auf den Impulsbegriff an sich verzichtet. Die abgeleitete Größe „ $m \cdot v$ “ wird zwar in der Reihe thematisiert und beim dritten Newtonschen Axiom als Wirkung beschrieben (s. 10. Std.), aber nicht nähergehend untersucht. Vielmehr soll der Impuls etwas später behandelt werden, wenn die Schülerinnen und Schüler Einblicke in die Differentialrechnung haben, um den Kraftbegriff als zeitliche Änderung des Impulses darzustellen und somit eine kurze vertiefende Wiederholung des Konzeptes zu ermöglichen.

Neben den fest eingeplanten Übungen können individuelle kleine Übungsphasen in den Unterrichtsstunden eingebaut werden, um eine kognitive Entlastung bei den folgenden Transferleistungen zu ermöglichen.

7.1.3. Inhalt der Stunden im Detail

Am Ende jeder Stunde wird kurz das erreichte Ziel auf dem Weg zum Kraftbegriff als Wechselwirkungskonzept notiert.

1. Stunde

Als erstes sollen die Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler evaluiert werden. Dies stellt einen wichtigen Aspekt zur Entwicklung des Kraftkonzeptes zur Auffindung problematischer Misskonzepte (vgl. 3.2.3) dar. Viele Schülerinnen und Schüler haben oft ähnliche Ansichten wie Aristoteles⁷⁵, diese können als schöner Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen genutzt werden. Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten eigenständig einen Fragebogen (s.A. B.1), dieser wird eingesammelt, gemischt und wieder im Plenum verteilt. Eine Bearbeitung nach der klassischen Think-Pair-Share-Methode hat sich in manchen Lerngruppen ebenfalls bewährt. Nun haben sie die Möglichkeit, ggf. andere Ansichten zu erkennen und ihre eigenen zu revidieren oder auszubauen. Dieser Vorgang kann nochmals wiederholt werden (bei TPS anderer Partner) oder man geht in die Plenumsphase in Form einer offenen Diskussion über. Im Anschluss daran werden alle möglichen Definitionen der Kraft (Sprachliche sowie in Formelsprache) an der Tafel notiert.

Der Autor konnte im Prinzip bisher als Schnittmenge in allen Kursen folgende Beschreibungen erhalten: „Kraft wird zum Bewegen gebraucht bzw. Bewegung braucht Kraft“, $F = m \cdot a$, $F = m \cdot g$, „Bewegung + Richtung = Kraft“. Es kommen somit immer Wissen aus der Sekundarstufe 1 und aristotelische Ansichten vor. Letzteres leitet sehr gut in die kommende Stunde über.

Den Schülerinnen und Schülern wird die Notwendigkeit eines adäquaten Kraftbegriffs zur Beschreibung von Wirkungen deutlich.

2. Stunde

Die Schülerinnen und Schüler bekommen nun einen Text zum griechischen Philosophen Aristoteles (s.A. A.1). Er beschreibt das damalige Weltbild in Bezug auf die Wissenschaft und die physikalischen Ansichten Aristoteles über das Zustandekommen von Bewegungen. Am Ende des Textes sollen die Lernenden in Gruppenarbeit Fragen beantworten. Eine der Fragen zielt auf die physikalische Beschreibung der Kraft im Rahmen einer Formel ab. Alle Lerngruppen beim Autor haben bis jetzt immer „Kraft gleich Masse mal Geschwindigkeit ($K = m \cdot v$)“ geantwortet und fühlten sich in ihren Annahmen aus der ersten Stunde bestätigt. Als nächstes wird vom Lehrer, wenn noch nicht von Seiten der Lernenden geschehen, auf das Problem des Widerstands bzw. der Reibung verwiesen. Historisch gesehen verwendet

⁷⁵bspw. Bewegung braucht Kraft

der Autor hier das Treidelproblem oder das Ziehen eines Karrens, um im Kontext zu bleiben. Zumeist wird schnell seitens der Schülerinnen und Schüler eben genannte Formel um einen Widerstandsfaktor ergänzt und man erhält das „Grundgesetz der Aristotelischen Bewegungslehre“ ($K = m \cdot v \cdot W$).

Die Schülerinnen und Schüler erkennen durch Reflexion von unmittelbar erfahrbaren Phänomenen das Kraft-Gesetz von Aristoteles zunächst als Versuch einer angemessenen Naturbeschreibung.

3. Stunde

Nach einer kurzen Rückblende werden die Schülerinnen und Schüler in Gruppen eingeteilt und sollen im Rahmen eines Expertenpuzzles⁷⁶ die Schwächen der Aristotelischen Bewegungslehre erörtern. Darunter sind:

- Die Bewegung im luftleeren Raum.
Ergebnis: Im Vakuum ist der Widerstand gleich Null und somit müsste jede Bewegung, egal durch welche minimalistische Kraft ausgelöst, unendlich schnell ablaufen. ⚡
- Wurfbewegung.
Ergebnis: Kraft müsste der Kugel mitgegeben werden. Speicherung von Kraft. ⚡
- Ausrollende Kugel:
Ergebnis: Am Ende einer schiefen Ebene wird die bewegende Kraft gleich Null und die Bewegung müsste sofort zum Stillstand kommen. ⚡

Nach der Vorstellung der Gruppenergebnisse werden Zweifel an dem momentanen Kraftbegriff bzw. der Bewegungslehre verbalisiert und mithilfe des dritten Beispiels (schiefe Ebene) auf das Prinzip der Trägheit eingegangen.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen die Zweifel an Aristoteles Überlegungen und fordern Verbesserungen daran.

⁷⁶Es werden bspw. fünf Gruppen mit jeweils fünf Lernenden gebildet, die sich mit einem Sachverhalt tiefergehend auseinandersetzen. In der nächsten Phase werden nun die Gruppen neu zusammengemischt, so dass Gruppen entstehen, bei denen jedes Mitglied sich in der ersten Phase einen anderen Sachverhalt erarbeitet hat, sprich Experte für sein Thema ist. Jeder der fünf Mitglieder erklärt nun den anderen vier seine Thematik. Vorteil gegenüber einer klassischen Gruppenarbeit ist die Zeitersparnis, da nicht jeder Lernende alle Lerngegenstände sich erarbeiten muss.

4. und 5. Stunde

Die folgenden zwei Stunden sind nur durchzuführen, wenn genügend Zeit vorhanden ist und man einen leistungsstarken Kurs hat. Ansonsten könnten die Lernenden durch den folgenden Erhaltungsansatz der Kraft verwirrt werden. Bei Zeitmangel kann die Thematik auch in einem kurzem Lehrervortrag dargestellt werden. Folglich ist eine Bearbeitung dieser beiden Stunden für einen stimmigen Fortgang der Reihe nicht zwingend notwendig.

Die Schülerinnen und Schüler teilen sich in zwei Gruppen. Eine Gruppe erhält einen Text zu Descartes' Kraftmaß und die andere zum Kraftmaß nach Leibniz 3.2.1. Die Arbeitsblätter (s.A. A.1), die sehr textlastige Beweisführungen enthalten, können zum besseren Verständnis mit der Placemat-Methode⁷⁷ eingehend untersucht werden. Anschließend bekommen die Lernenden jeweils eine Widerlegung zu ihrem Kraftbegriff. Erfahrungsgemäß sind selbstständige Widerlegungen, gerade zum Kraftmaß nach Leibniz, mit dem Wissenstand von den Schülerinnen und Schülern nicht zu erarbeiten, lediglich das Nachvollziehen vorgegebener Beispiele scheint hier möglich. Nachdem beides im Plenum vorgestellt wurde, ist eine ausführliche Diskussion über das Gehörte sehr wichtig. Den Schülerinnen und Schülern muss einerseits klar werden, dass beide Kraftmaße aus heutiger Sicht falsch sind, andererseits aber auch, dass die Gelehrten nicht töricht oder unintelligent waren, sondern vielmehr die von Ihnen genutzten Begriffe nicht adäquat definiert waren. Diese Begriffe lagen lediglich auf dem Weg auf der Suche nach einer richtigen Vorstellung des Kraftmaßes, man könnte sagen, dass die Historie hier ein Pendant zum heutigen problemorientierten Lernen aufzeigt. Es ist nachdrücklich herauszustellen, dass beide Maße heute ihre Verwendung unter einem anderen Namen in der Physik finden. Bis zum Ende des 19. Jahrhunderts wurde der Begriff Kraft (aufgrund der Tatsache, dass eine Erhaltung der Kraft angestrebt wurde) weitgehend als Synonym für den heutigen Energiebegriff verwandt. (Das wirkt bis in die heutige Zeit nach, wie man an dem Begriff Kraftwerk erkennt.)

Auf die Impetus-Theorie, die der Vollständigkeit halber eigentlich von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet werden müsste, da sie lange Zeit das Weltbild prägte, wird aus Zeitgründen verzichtet. Sie kann aber in der 4/5. Stunde im Rahmen eines Lehrervortrags angeschnitten werden.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen, warum die Theorien nach Leibniz und Descartes bei der Entwicklung des Kraftbegriffs nicht zielführend sind.

⁷⁷Ein DIN-A4-Blatt oder eine Flipchart wird mittels Linien in bspw. fünf Gebiete unterteilt. Nun werden Gruppen zu je vier Teilnehmern gebildet. Alle lesen sich den Text durch und notieren sich die wichtigsten Aspekte auf einem Teil des Papiere. Im Anschluss stellt jeder sein Ergebnis vor und auf dem verbliebenen Platz des Papiere wird die Essenz der Erarbeitung festgehalten. So erhält man ein Arbeitsergebnis, das jeder einzelne mitträgt.

6. und 7. Stunde

Der nächste wichtige Schritt zum heutigen Konzept der Kraft ist das Verstehen des Trägheitsprinzips und des Relativitätsprinzips. Die Erkenntnis, dass eine gleichförmige Bewegung keinen Prozess darstellt, sondern einen Zustand - wie die Ruhelage - ist wegbereitend für das weitere Verständnis. Begonnen wird mit der Analyse von drehenden Rädern; eines sehr gut gelagert, das andere weniger. Den Lernenden soll der Reibungseffekt zur Hemmung von Bewegungen anschaulich bewusst werden, so dass induktiv klar wird, dass bei schrumpfender Reibung die Bewegung anhaltender wird, bis zur hypothetischen absoluten Reibungsfreiheit eine Bewegung einmal angestoßen, ewig anhält. So kann, im historischen Kontext wieder ankommend, Galileos Gedankenexperiment zu zwei unterschiedlich geneigten Ebene behandelt werden. Zur weiteren Vertiefung bieten sich folgende Versuche an:

- **Stabile Eier:**
Ein dünner Holzstab liegt an seinen Enden auf Eiern. Nun können drei Versuche durchgeführt werden.
 1. Schneller Schlag mit einer Stativstange
 2. Langsamer Schlag mit einer Stativstange
 3. Schlag mit mehreren aneinander gebunden Stangen (schwere Stange)

Ergebnis:

zu 1. Der Holzstab kann der plötzlichen Bewegungsänderung nicht folgen und zerbricht, ohne die Eier zu beschädigen. Der Stab ist träge.

zu 2. Der Holzstab folgt der Bewegungsänderung und zerdrückt die Eier.

zu 3. Durch das hohe Gewicht der Stativstange ist sie selber sehr träge und kann keinen schnellen Schlag ausführen.

Mögliche Ergebnisse sollten vorher von den Lernenden geäußert und diskutiert werden, um den Effekt der heil gebliebenen Eier zu verdeutlichen. Der Versuch ist zudem äußerst motivierend, wenn die Schülerinnen und Schüler aktiv eingebunden werden und den Versuch selber ausführen dürfen.

- **Klassiker**
Die beiden folgenden Versuche sollen nur gezeigt werden, die Beschreibung und Deutung soll von jedem Lernenden alleine zu Hause erfolgen. Mit der selbständigen Beschäftigung nachmittags wird der Trägheitsgedanke weiter vertieft.

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien



Abbildung 7.1.: **Links:** Ändert der Wagen seine Bewegungsrichtung, so behält die Kugel im Raum ihre Geschwindigkeit und Richtung bei. **Rechts:** Beim langsamen Ziehen, reißt der obere Faden, da Zugkraft und Gewichtskraft auf die Kugel wirken. Beim schnellen Ziehen reißt der untere Faden, da die Kugel der abrupten Bewegungsänderung nicht sofort folgen kann.

Der jetzige Kenntnisstand sollte direkt durch Folgerungen ausgebaut werden. Für den anschließenden Versuch verlässt man den Kursraum und geht auf einen Flur. Durch die Bewegung und die neue Lernumgebung findet eine körperliche und motivationale Aktivierung der Lernenden statt.

Ein Schüler setzt sich auf einen Experimentierwagen, hat einen Glaskasten vor sich und wird gleichförmig vorwärts gerollt. Vor und während der Fahrt lässt er eine Kugel in den Glaskasten fallen (damit die Kugel keinen Luftwiderstand erfährt). Nichtbeteiligte Schülerinnen und Schüler stellen sich parallel zur Bewegungsrichtung auf und beobachten das Geschehen.

Der Kurs soll ohne viele Impulse das Ergebnis im Plenum verbalisieren. Bisher hat sich beim Autor im Unterricht immer relativ schnell das Relativitätsprinzip allein aus Schülerformulierungen ergeben und ein nachhaltiges Verständnis entwickelt.

Die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass eine Krafteinwirkung nicht direkt mit der absoluten Geschwindigkeit zusammenhängt.

8. Stunde

Nachdem die Schülerinnen und Schüler nun wissen, dass eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit ein Zustand ist, der keinerlei Krafteinwirkung benötigt, können nun weitergehende Überlegungen angestellt werden. Eine Abhängigkeit der Masse ist aus Alltagserfahrungen ersichtlich, die Geschwindigkeit fällt aus eben genannten Gründen heraus. Nun hat bisher jede Lerngruppe des Autors im Unterricht auf eine zusätzliche Beziehung zur Beschleunigung verwiesen. Dies gilt es dann zu verifizieren.

Bevor jedoch ein zugehöriges Experiment gemacht wird, sollte kurz der Unterschied

zwischen träger und schwerer Masse im Plenum thematisiert werden. Das Verständnis jenes Unterschieds ist nicht für alle Lernenden ersichtlich und es hat sich als nutzbringend erwiesen, im Rahmen dieser Diskussion auf die diffizile Ungleichheit von Masse und Gewicht einzugehen. Wenn genügend Zeit vorhanden ist, kann diese Thematik auch mit einem interessanten Arbeitsblatt weiter vertieft werden (s.A. A.1). Hier wird eine potentielle Mondkolonie betrachtet, die aufgrund der geringeren Schwerkraft ihre Gebäude wesentlich filigraner gestalten könnte. Bei dem Bau von Fahrzeugen muss aber aufgrund der Trägheit eine erdähnliche Stabilität erzeugt werden. Dieser Aspekt wird dann mit einer Analyse eines NASA-Videos, in dem der Astronaut *Charles Duke* mit einem Hammer eine Stange in die Monoberfläche schlägt, vertieft.

Sobald die Trennung von schwerer und träger Masse vor Augen geführt wurde, ist eine Separation von Trägheit und Schwere als Eigenschaft der Masse zumeist einsichtig.

Nun zum Experiment:

Auf der Luftkissenfahrbahn werden unterschiedliche Gleiter (Δm) durch unterschiedliche Antriebskörper (Δm) beschleunigt, wobei bei wechselnden Antriebskörpern die Gesamtmasse des Systems konstant bleibt.

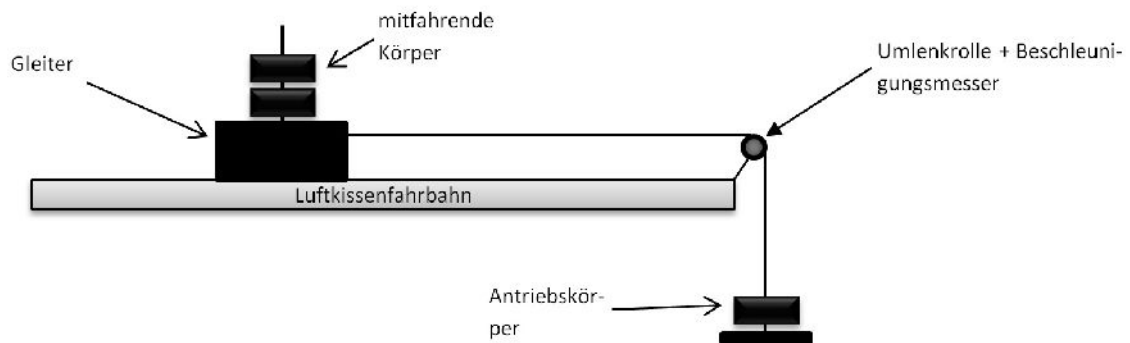


Abbildung 7.2.: Experiment zu Newton II

Bei einer graphischen Auswertung (vgl. 7.3) ergibt sich eine Proportionalität zwischen Antriebskraft F und der Beschleunigung, sowie bei drei unterschiedlich gewählten Gesamtmassen anhand der schwarz gestrichelten Linie die schon vorher vermutete Proportionalität zwischen F und m erkannt werden kann.

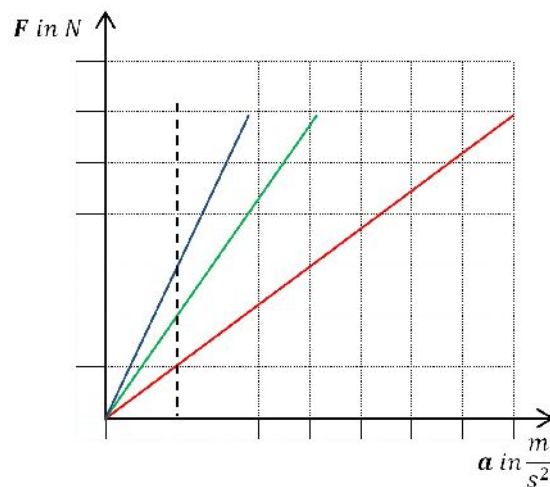


Abbildung 7.3.: Beschleunigung mit unterschiedlichen Antriebskräften

Sowohl Versuch als auch die Deutung der Graphik ist aus Schülersicht recht komplex und bedarf eines großen zeitlichen Rahmens. Aus diesem Grund erhält der Kurs ein Arbeitsblatt mit Versuchsskizze, Beschreibung und vorgefertigtem Koordinatensystem.

Beide erhaltenen Beziehungen

$$F \sim a \quad \text{und} \quad F \sim m \quad (7.1)$$

werden am einfachsten durch die Gleichung $F = m \cdot a$ beschrieben. Als Hausaufgabe wird ein Text zur Auseinandersetzung mit den Begriffen *Axiom*, *Gesetz* und *Prinzip* ausgeteilt (s.A. A.1).

Die Schülerinnen und Schüler verstehen den plausiblen Zusammenhang

$$F = m \cdot a$$

9. und 10. Stunde

Zunächst wird im Rahmen einer Wiederholung des Kraftbegriffs und auf Eingang der Hausaufgabe die Bedeutung der Begriffe *Axiom*, *Gesetz* und *Prinzip* im physikalischen Sinne thematisiert. Zu diesem Zeitpunkt haben die Schülerinnen und Schüler nun „frische“ Kenntnisse über das Fallgesetz; das Galileische Relativitätsprinzip und auch über die ersten beiden Newtonschen Axiome. Somit kann hier ein adäquater propädeutischer Ausflug über Theoriebildung in der Naturwissenschaft stattfinden. Danach wird das klassische Einführungsexperiment zur Aufstellung des dritten Newtonschen Axiom durchgeführt. Zwei etwa gleichschwere Schülerinnen und Schüler sitzen sich auf gut „rollbaren“ Experimentierwagen gegenüber und halten ein Seil zwischen sich. Nun werden unterschiedliche Szenarien durchgeführt: Beide ziehen, beide ziehen unterschiedlich stark, nur einer zieht etc. (zur Vertiefung werden auch

zwei unterschiedlich schwere Personen benutzt). Nicht beteiligte Personen beobachten aufmerksam. Anschließend wird das zugehörige Axiom gemeinsam formuliert und mit zwei Kraftmessern verifiziert.

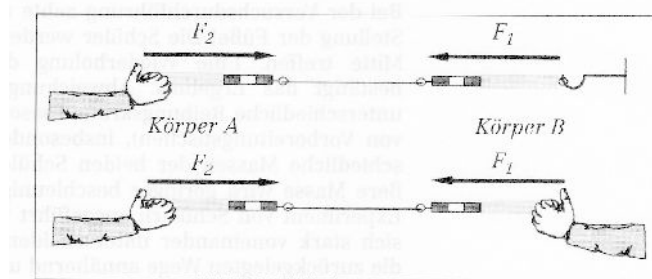


Abbildung 7.4.: Wechselwirkung: Sobald man am Seil zieht, zeigen beide Kraftmesser den gleichen Betrag. Körper A zieht mit der Kraft F_1 an B, Körper B zieht mit der Kraft F_2 an A. Beide Personen nehmen eine Kraft wahr. Beide Kräfte sind gleich groß und einander entgegengesetzt. [MET07, 47]

Da die beiden Kräfte im Rahmen des Wechselwirkungsprinzips an unterschiedlichen Körpern angreifen, muss sowohl in dem Merksatz notiert als auch bei den folgenden Versuchen und Diskussion immer wieder erwähnt werden. Der Begriff „actio gleich reactio“ bleibt gut im Gedächtnis, der überaus wichtige Zusatz wird von den Schülerinnen und Schülern aber immer gerne als erstes vergessen.

Von den Schülerinnen und Schülern kommt hierbei immer die Frage auf, wie bspw. eine Partei beim Tauziehen gewinnen kann, wenn beide Kräfte doch immer gleich groß sind. Es ist klar darauf hinzuweisen, dass die Kräfte gleich groß sind, aber sich in ihren Wirkungen deutlich unterscheiden können. Der oft gemachte Ansatz „Kraft = Wirkung“ ist nicht uneingeschränkt richtig. Hier muss ein Verweis auf den kommenden Impulsbegriff gemacht werden, dieser bringt neben der Kraft auch noch den zeitlichen Faktor ins Spiel. Eine ausführlichere Beschreibung ist zu dieser Zeit nicht nötig, da ein hier zusätzlich eingeführter Begriff die Lernenden nur verwirren würde.

Nachfolgend werden viele unterschiedliche Gegenstände auf dem Pult präsentiert (Zangen, Schraubenschlüssel, Schraubendreher, Aufziehaautos, Silvesterrakete, etc.). Je nach Zeit und Leistungsstärke des Kurses kann einerseits in Gruppen Versuche zum neu gelernten Axiom entwickelt und anschließend im Plenum vorgestellt werden oder andererseits von vornherein gemeinsam im Plenum mögliche Versuch durchgeführt und gedeutet werden. Dadurch entsteht ein Transfer des Gelernten und die Schülerinnen und Schüler erkennen die Allgemeinheit/Allgegenwärtigkeit der gegengerichteten Wirkung einer Gegenkraft. Daraus ergibt sich letztendlich eine Stärkung des wissenschaftlichen Prinzipiendenkens.

In der Hausaufgabe können folgende Aufgabenvorschläge bearbeitet werden. Bei den Erklärungen sollte immer auf das dritte Newtonsche Axiom eingegangen werden und die Begriffe Kraft und Gegenkraft fallen:

- Warum kann ein Auto bei Glatteis nicht fahren?
- Wie bewegt ein Ruderer sein Boot vorwärts?
- Mark sitzt auf einer Luftmatratze und wirft Wasserbomben nach seinem Freunden am Strand. Warum treibt er vom Ufer ab?
- Leonie bläst einen Luftballon auf und lässt ihn los. Warum fliegt er danach ein Stück weg?

Die Schülerinnen und Schüler deuten $F = m \cdot a$ als Axiom und mit der wechselseitigen Wirkung durch Newton III rückt der Begriff Wechselwirkung stärker in ihr Bewusstsein

11. Stunde

Zu Beginn der Stunde hält ein Schüler oder eine Schülerin ein Referat über Newton und seine Axiome. Dadurch wird zum einen der historische Kontext der Reihe gestärkt und zum anderen findet eine Reorganisation des Gelernten aus den letzten Stunden statt. Um die Kraft weiter als Wechselwirkungsgröße zu verdeutlichen, sollten nun Beispielsrechnungen auf Grundlage des Wechselwirkungsprinzips folgen. Im Unterricht hat sich gezeigt, dass bei vielen Schülerinnen und Schülern das Verständnis eines Inhalts durch handfeste Beispielrechnungen erheblich wächst. Dazu können folgende Beispiele gewählt werden:

- *Küssen im Weltraum*
Finden die Lernenden sehr erheiternd und die Reibung kann von vornherein ausgeschlossen werden.
Fragestellung in kurz:
Zwei Astronauten ($m_1 = 55\text{kg}$, $m_2 = 75\text{kg}$) auf der ISS küssen sich. Die Kontaktzeit sei 0,5 Sekunde und man geht von einer Kusskraft von 6 Newton aus. Wie schnell bewegen sich beide nach dem Kuss auseinander? Wie weit sind sie 8 Sekunden nach dem Kuss voneinander entfernt?
- *Fallender Apfel bewegt die Erde*
Mithilfe einer Skizze kann sehr gut auf den Unterschied zwischen Kompensationskraft (beide Kräfte greifen am selben Körper an) und Gegenkraft (Kräfte greifen an unterschiedlichen Körpern an) eingegangen werden.
Fragestellung in kurz:
Wie weit wird die Erde in Richtung eines Apfels gezogen, wenn er 100g schwer ist und aus einer Höhe von 2 Meter herabfällt?

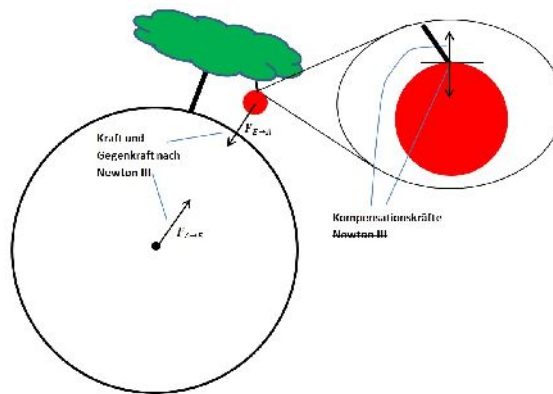


Abbildung 7.5.: Kräfte beim Wechselwirkungsprinzip gegenüber Kompensationskräften

Beide der Aufgaben sind so gewählt, dass die vorher behandelte Kinematik zur Lösung gebraucht und somit wiederholt wird.

Die Schülerinnen und Schüler vertiefen ihr Kraftverständnis und das Wechselwirkungsprinzip

12. Stunde

Nachdem in der letzten Stunde eine Wiederholung der Newtonschen Axiome stattgefunden hat und gemeinsam Beispiele zum Wechselwirkungsprinzip besprochen wurden, sollte nun eine reine Übungsstunde das Wissen der Schülerinnen und Schüler festigen. Der Verlauf ist hier individuell an der Lerngruppe und dem zur Verfügung stehenden Buch auszurichten.

Die Schülerinnen und Schüler werden sicherer im Umgang mit dem Wechselwirkungskonzept der Kraft.

13. und 14. Stunde

In dieser Stunde soll eine umfassende Reflexion der behandelten Unterrichtsreihe vonstatten gehen. Dabei wird der Kurs in Gruppen aufgeteilt und jede Gruppe soll ein Plakat mit der Überschrift „*Das Kraftkonzept*“ entwerfen. Die Schülerinnen und Schüler sollten frei von weiteren Einschränkungen sein und sich mithilfe ihrer Aufzeichnungen ein individuelles Bild über wichtige Eckpfeiler machen. Es hat sich gezeigt, dass manche Gruppen den kompletten Werdegang des Konzeptes darstellen und andere sich sehr stark auf die Newtonschen Axiome konzentrieren. Um trotzdem eine vollständige Reflexion für alle zu gewährleisten, eignet sich ein anschließender Galeriegang. Der funktioniert wie eine Postersession bei einer Fachtagung. Hier sehen die Schülerinnen und Schüler, wie die anderen Gruppen den Arbeitsauftrag

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

erfüllt haben und erweitern ihren eigenen Kenntnishorizont. Während der Plakatgestaltung sowie der Präsentation kann die Lehrperson nochmals auf individuelle Fragen eingehen.

Zum Abschluss der Reihe kann folgende Transferaufgabe an die Tafel geschrieben und mögliche Beobachtungen diskutiert werden.

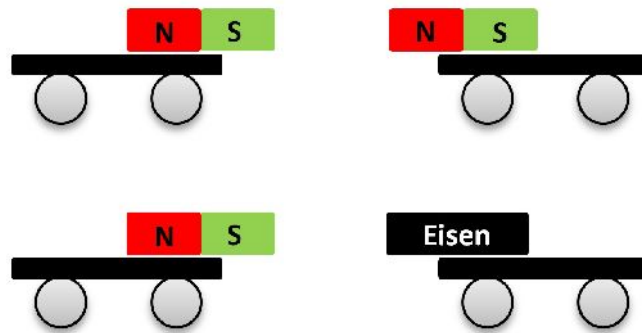


Abbildung 7.6.: Wechselwirkung nach Newton III mittels magnetischem Feld

Das Ergebnis und seine Erläuterung ist äquivalent zum Schülerversuch aus der 9. Unterrichtsstunde, in welchem derselbe Effekt mittels eines gespannten Seils erzielt wurde. Nun sollen die Schülerinnen und Schüler den Wechselwirkungsaspekt dieses Experiments qualitativ im Plenum erörtern.

Bei Erprobung zeigt sich, dass bei dieser Diskussion ebenfalls die Begriffe Kraft und Gegenkraft seitens der Lernenden benutzt wurden. Die Übermittlung wurde dem magnetischen Feld zugeschrieben. Erstaunlich war, dass manche leistungsstarke Schüler sagten, dass der Magnet „Kraftpunkte“ um sich herum habe. Diese wirkten dann an Gegenständen, die aus einem eisenhaltigen Material sind. Andere Schülerinnen und Schülern fanden diese Einschätzung plausibel. Somit scheint das Feldkonzept, das erklärt, wie sich Kraftwirkungen übertragen, schon im Erkenntnishorizont der Schülerinnen und Schülern angelegt sind. Dies gilt es bei der Behandlung der Elektrodynamik wieder mit diesem Beispiel (vgl. 7.6) neu aufzugreifen.

Neben einer kurzen Tangierung des Feldbegriffs wird zudem auch der Prinzipiengedanke bei den Schülerinnen und Schülern weiter vertieft. Es sollte nochmals darauf hingewiesen werden, dass das dritte Newtonsche Axiom auch oft Wechselwirkungsprinzip oder „actio = reactio-Prinzip“ genannt wird.

Die Schülerinnen und Schüler sehen nochmals die Entwicklung des Kraftbegriffs in der Gesamtschau und reflektieren den Werdegang des Konzeptes.

7.2. Das Feldkonzept

Bei der Behandlung des Feldkonzeptes sollte das Kraftkonzept in jedem Fall bekannt und gefestigt sein. Des Weiteren müssen die Schülerinnen und Schüler schon aus der Sekundarstufe I einen Einblick in die Elektrizitätslehre haben, sodass sie Kenntnisse von elektrischer Ladung, bewegter elektrischer Ladung, dem elektrischen Strom, dem Verhalten geladener Körper zueinander und Polarisierung haben. Aus der Einführungsphase (Klasse 11) sollten zudem die Gravitationskraft mit dem Newton'schen Gravitationsgesetz bekannt sein und rudimentär der Feldbegriff im Rahmen der Gravitation angeschnitten worden sein.

Am Anfang der hier dargestellten Reihe findet eine Wiederholung der Effekte im Rahmen einer historischen Entwicklung der Elektrodynamik statt, was gleichzeitig den Zweck verfolgt, die weiter oben genannten Begriffe in die gedankliche Präsenz zurückzurufen. Gleichzeitig wird dadurch verdeutlicht, dass das Feldkonzept zunächst eine individuelle gedankliche Schöpfung des Physikers Faraday war. Durch die historische Herangehensweise wird auf außerphysikalischer Weise verdeutlicht, dass die Entstehung des Feldbegriffs keiner historischen Stringenz folgt. Je nach Leistungsfähigkeit des Kurses kann/muss die Reihe um 2-3 Stunden zu Beginn verlängert werden, damit die eben genannten Grundlagen aus der Elektrostatik griffbereit sind.

7.2.1. Stunden der Unterrichtseinheit

1. Schülervorstellungen sammeln und diskutieren.
2. Die Ein- bzw. Zwei-Fluida-Theorie.
3. Versuche zur geistigen Vorstellung des elektrischen Feldes.
4. Michael Faraday und seine elastischen Schläuche.
5. Vertiefende Versuche zur Untersuchung des elektrischen Feldes.
6. Erste mathematische Beschreibung des Feldes.
7. Das radialsymmetrische Feld.
8. Das Coulombsche Gesetz und seine Verwandtschaft zum Gravitationsgesetz.
9. Spannung - Die elektrische Potentialdifferenz und ihre graphische Veranschaulichung.
10. Weiterführung der 9. Stunde.
11. Vertiefung des Feldbegriffs und Auffindung eines Ausbreitungsmediums.
12. Weiterführung der 11. Stunde.

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

13. Vertiefung durch Analogiefindung zwischen unterschiedlichen Feldern.
14. Weiterführung der 13. Stunde.

Das Feld als Konzept kann danach im weiteren Unterricht im Bereich der Elektrodynamik, bei der Behandlung des Plattenkondensators, der Lorentzkraft, der Induktion etc., vertieft werden.

7.2.2. Inhalt der Stunden im Detail

Am Ende jeder Stunde wird kurz das erreichte Ziel auf dem Weg zum Feldbegriff als Wechselwirkungskonzept notiert.

1. Stunde

Zu Beginn wird der Versuch (7.6) aus der letzten Stunde zum Kraftkonzept wiederholt. Die Ausführlichkeit ist individuell, da einerseits der Kurs die eben dargestellte Reihe ggf. nicht behandelt hat und andererseits je nach Lehrplan bzw. Schulcurricula zwischen den Behandlungen beider Konzepte bis zu einem Jahr zeitlicher Differenz liegen können.

Mithilfe des Versuchs soll das Wechselwirkungsprinzip wieder ins Bewusstsein gerufen werden und sich die Notwendigkeit/Nützlichkeit eines Wechselwirkungskonzeptes, welches Wirkungen über Entfernungen hinweg beschreibt, im physikalischen Denken der Schülerinnen und Schüler abzeichnen.

Anschließend sollen die Vorstellungen über den Feldbegriff bei den Schülerinnen und Schülern evaluiert werden. Dies stellt einen wichtigen Aspekt zur Entwicklung des physikalischen Feldkonzeptes dar. Mit der Auffindung von Misskonzepten können mögliche Probleme herauskristallisiert und diese von der Lehrperson adäquat thematisiert werden.

Die Schülerinnen und Schüler bearbeiten eigenständig einen Fragebogen (s.A. B.2), dieser wird eingesammelt, gemischt und wieder im Plenum verteilt. Eine Bearbeitung nach der klassischen Think-Pair-Share-Methode hat sich in manchen Lerngruppen ebenfalls bewährt. Nun haben diese die Möglichkeit, ggf. andere Ansichten zu erkennen und ihre eigenen zu revidieren oder auszubauen. Dieser Vorgang kann nochmals wiederholt werden (bei TPS anderer Partner) oder man geht in die Plenumsphase zu einer offenen Diskussion über. Im Anschluss daran werden alle möglichen Definitionen des Feldes (Sprachliche sowie bei der Feldstärke in Formelsprache) an der Tafel notiert. Die Tafel wird am Ende der Stunde von der Lehrperson fotografiert, so kann man am Ende der Reihe (oder auch währenddessen) immer mit den aktuellen Erkenntnissen vergleichen und die sich different ergebene Vorstellungen thematisieren, um den Schülerinnen und Schülern die physikalische Vorstellungen des Feldes stetig bewusst zu machen.

Die Schülerinnen und Schülern erkennen die Notwendigkeit zur Einführung eines neuen Wechselwirkungskonzeptes und entwickeln erste Vorstellungen dazu.

2. Stunde

Zum Aufbrechen von falschen Präkonzepten wird die historische Genese der „spukhaften“ Fernwirkung thematisiert. Zu Beginn der Stunde soll ein kurzer Lehrervortrag über Thales von Milet, William Gilbert und René Descartes und ihren Vorstellungen zur Fernwirkung gehalten werden, um die Schülerinnen und Schüler für das bevorstehende Thema zu sensibilisieren und eine selbstbestimmte Lernmotivation hervorzurufen.

In der nächsten Phase werden die Lernenden in zwei Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe liest einen Text (s.A. A.2) über die Zwei-Fluida-Vorstellung von Charles Dufay⁷⁸ und die andere Gruppe über die Ein-Fluida-Theorie von Benjamin Franklin. Anschließend sollen die wichtigen Punkte beider Theorien an der Tafel notiert und über Gemeinsamkeiten / Unterschiede im Plenum diskutiert werden.

Grund für diese Auseinandersetzung ist die Erstaunlichkeit, dass manche Schülerinnen und Schüler bei den Begriffen positiv / negativ geladen wirklich noch an zwei unterschiedliche Teilchenarten denken. Der Autor hat die Vermutung, dass die Schülerinnen und Schüler bei der Behandlung der Kernphysik Ende der Sekundarstufe I mit positiv und negativ geladenen Teilchen (Proton, Elektron) thematisch in Berührung kommen und dieses dann auf die Elektrostatik projizieren. Durch die Auseinandersetzung mit den eben genannten Fluida-Theorien wurde diese falsche Vorstellung in den Kursen des Autors immer behutsam und aktiv von den Lernenden angegangen und es wurde versucht, die richtige physikalische Deutung in das Denken der Schülerinnen und Schüler einzubringen.

Die Theorie nach Franklin bringt zudem den Erhaltungsgedanken der Physik wieder in den Blickpunkt der Schülerinnen und Schüler. Somit ist an dieser Stelle wieder die Möglichkeit gegeben, dass überaus wichtige Prinzipiendenken in der Physik anzusprechen.

Die Schülerinnen und Schüler erkennen die Notwendigkeit einer neuen Modellbildung.

3. Stunde

Zunächst wird in dieser Stunde auf ein Problem aufmerksam gemacht. Bisher wurde das Feld in der ersten Stunde mit einem Permanentmagneten angesprochen. Nun soll ein „ausschaltbares“ Feld mittels Bandgenerator betrachtet werden.

Vor dem Aufladen wird eine negative Probeladung in die Nähe der Hohlkugel gehalten und wie erwartet, ist nichts zu sehen. Selbiges wiederholt man, nachdem die Aufladung erfolgt ist. Nun wird die negative Probeladung von der positiv geladenen Kugel angezogen. Dieses wird die Schülerinnen und Schüler nicht weiter

⁷⁸Der Text zu Dufay ist etwas länger und schwerer zu verstehen, daher ist es ratsam, diesen von leistungstärkeren Gruppen bearbeiten zu lassen.

verwundern, da sie das Verhalten von elektrisch geladenen Körpern kennen. Jetzt wiederholt man den kompletten Versuch nochmal, ohne jeweils die negative Probeladung in die Nähe zu halten. Impulse der Lehrperson, etwa: „Was hat sich durch das Aufladen verändert?“ , „Ist ein Unterschied erkennbar?“ regen die Lernenden dazu an, die physikalischen Eigenschaften im räumlichen Umfeld der Kugel als verändert darzustellen und zu verstehen dass diese Veränderung mit unseren Sinnen nicht zu erfassen ist.

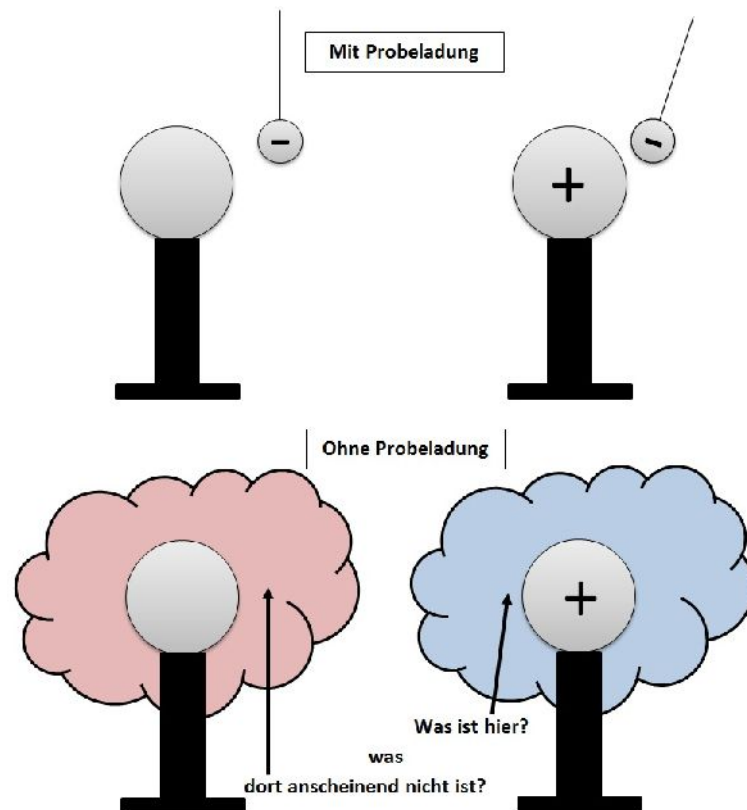


Abbildung 7.7.: Experiment zur Erkenntnisgewinnung einer Raumänderung um elektrisch geladenen Körper

Letzteres regt die Schülerinnen und Schüler zu einer neuen Modellbildung an und ermöglicht auch eine tiefere Diskussion über die Notwendigkeit von Modellen - wie veranschauliche ich Dinge, die für mich nicht erfassbar sind? Der Feldliniengedanke wird an dieser Stelle immer seitens des Kurses genannt, aber einen Grund für dieses Bild hört man selten. Des Weiteren erkennen die Lernenden, dass zur Untersuchung eines Feldes immer ein sogenannter Probekörper gebraucht wird.

Dies leitet genetisch zum nächsten Experiment über.

Zwei Konduktorkugeln werden an eine Hochspannungsquelle angeschlossen. Danach werden kleine Watteflocken auf eine der beiden entgegengesetzt geladenen Kugeln geworfen. Von dieser Kugel werden sie aufgeladen, abgestoßen und von der anderen

Kugel angezogen. Dort entladen sich die Watteflocken zunächst, werden dann umgekehrt aufgeladen und fliegen wieder zur ersten. Dieser Vorgang wiederholt sich, wobei die Watteflocken auf *scheinbar festen Bahnen* hin und her fliegen.

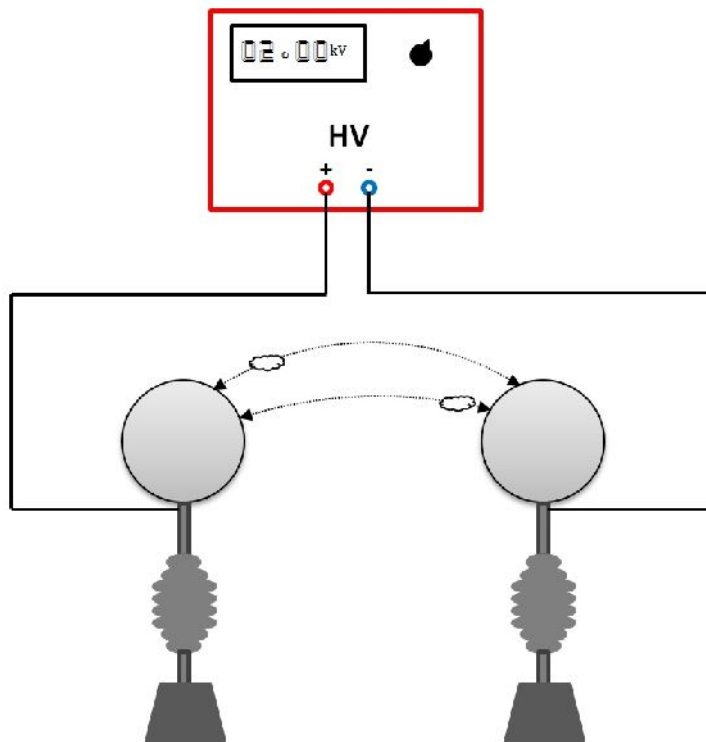


Abbildung 7.8.: Watteflocken die zwischen zwei mit Hochspannung geladenen Konduktorkugeln hin und her fliegen. Dabei fliegen die Watteflocken auf scheinbar diskreten Bahnen

Bei diesem Hochspannungsexperiment sind die Schülerinnen und Schüler immer hoch motiviert und verfolgen fasziniert die Bahnen der Watteflocken. Sie meinen, die von ihnen angesprochenen Feldlinien förmlich zu sehen. Zum Glück gibt es bei diesem Versuch auch immer Skeptiker in den Lerngruppen. Eine Überzeugung derer und eine weitere Bestätigung der anderen wird experimentell in der nächsten Stunde geliefert.

Die Schülerinnen und Schüler wissen, dass sich der Raum um einen Körper verändert, wenn dieser elektrisch geladen ist.

4. Stunde

Bevor man eben erwähntes Experiment durchführt, soll der historischen Genese der Reihe explizit angesprochen werden. Dafür bekommen die Schülerinnen und Schüler einen Auszug aus dem 1895 erschienenen Buch „*Über Faraday's Kraftlinien*“ [MAX95, 5 ff.] von James Maxwell, in dem er Faradays Deutung der Wechselbeziehung zwischen elektrisch geladenen Körpern beschreibt.

Der Teil über Maxwell's unzusammendrückbare Flüssigkeit zur Erläuterung der Intensität wird aus Elementarisierungsgründen weggelassen. Einerseits ist die zugehörige Erklärung recht schwer verständlich geschrieben (kognitiv leistbar, aber sehr zeiteinnehmend), andererseits soll hierdurch eine Aktivierung der Lernenden erreicht werden. Sie sollen selbst eine Möglichkeit zur Intensitätsdarstellung entwickeln und untereinander kommunizieren. Dabei haben bisher immer alle Lerngruppen des Autors - fachwissenschaftlich richtig - die Dichte der Linien (Schülerformulierung: Menge an Linien zwischen den Körpern) als Maß für die Intensität des Feldes interpretiert. Durch diese sachgemäße Eigenleistung wird das Selbstvertrauen der Schülerinnen und Schüler beträchtlich gestärkt; sie haben das Gefühl, den Feldbegriff in Teilen selbst entwickelt zu haben.

Dies wird durch folgenden klassischen Versuch verstärkt:

In eine Glasschale wird Rizinusöl gegeben, anschließend werden Grieskörner gleichmäßig verteilt. Die Schale wird auf einen Tageslichtprojektor gestellt und an zwei gegenüberliegenden Rändern werden Elektroden befestigt. Diese werden nun an die beiden Pole eines Hochspannungsnetzgerätes geschlossen. Nach dem Einschalten der Quelle richten sich die Grieskörner, die durch Influenz zu Dipolen werden, kettenförmig nach dem elektrischen Feld aus. Es wirkt also eine Kraft auf sie.

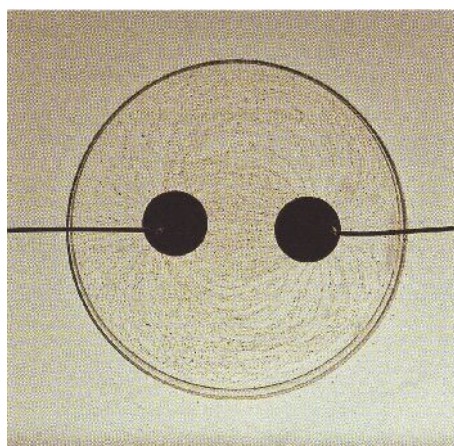


Abbildung 7.9.: Veranschaulichung des elektrischen Feldes. Grieskörner werden auf eine Ölschicht in einer Schale gestreut und schließen sich durch das wirkende elektrische Feld zu Ketten zusammen [MET98, 182].

Bei Variation der anliegenden Spannung sowie bei Veränderung des Elektrodenabstands kann die Verdichtung bzw. Ausdehnung der Feldlinien veranschaulicht werden und somit die gedankliche Leistung der Schülerinnen und Schüler experimentell falsifiziert werden. Somit wird eine starke Würdigung der Schülerarbeit erzielt.

Mit den bisherigen Erkenntnissen ist im Plenum herauszuarbeiten, dass eine durch ein Feld vermittelte Kraftwirkung zu einer sogenannten Nahwirkungsvorstellung führt, wodurch die historische Fernwirkungstheorie an Gültigkeit einbüßt. Als Hausaufgabe empfiehlt es sich, einen Text zur Feldvorstellung lesen zu lassen (s.A. A.2). Aus diesem soll nochmals deutlich werden, dass der Feldbegriff eine gedankliches Konstrukt ist, um die Phänomene zu deuten; und wir uns zur Vorstellung des Feldes nur adäquate Hilfen (bspw. Feldlinien) erdenken, für die es aber ein passendes Vergleichsobjekt im Alltag nicht gibt.

Die Schülerinnen und Schüler erkennen, dass um einen geladenen Körper elektrostatische Kräfte wirken und bezeichnen den zugehörigen Raumbereich als elektrisches Feld. Durch diesen Konzeptwechsel hinsichtlich der Raumvorstellung wird ihnen bewusst, dass die Fernwirkungs- durch eine Nahwirkungsvorstellung ersetzt wird.

5. Stunde

Zur Wiederholung der letzten Stunde kann der dort behandelte Versuch variiert werden, um unterschiedliche Felder zu klassifizieren. Wichtig hierbei ist, dass die dabei eingesetzte Glasschale möglichst groß gewählt wird, da sonst gerade Teilversuch d) schwer zu erkennen ist. Die richtige Menge an Grieskörner muss durch mehrmaliges Ausprobieren getestet werden.

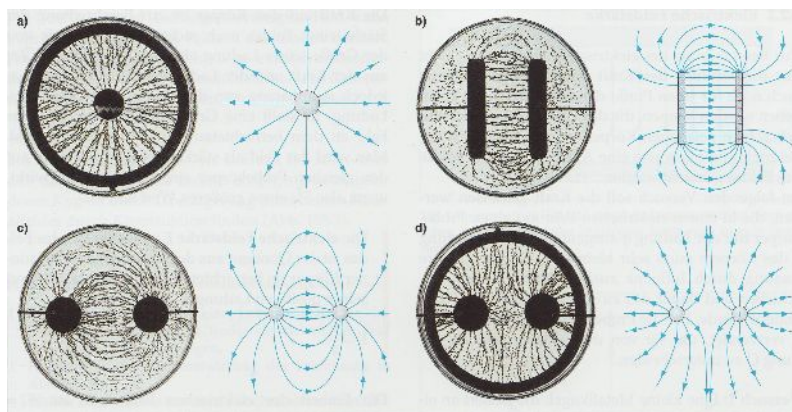


Abbildung 7.10.: Ebene Schnitte von Feldlinienbildern [MET98, 183]

Nach der Klassifizierung der Feldtypen lohnt es sich, kurz das Magnetfeld anzusprechen und dabei den nicht vorhandenen magnetischen Monopol als Unterschied

festzuhalten. Damit wird begonnen, das Feldkonzept auf andere Phänomene zu übertragen, wodurch es sich besser als allgemeines Wechselwirkungsprinzip im Denken der Lernenden etablieren kann.

Als Nächstes sollte der Kraftbegriff weiter in die Behandlung des Feldkonzeptes einfließen, dazu wird einerseits eine kleine Probeladung in die Schale mit Öl gelegt und man sieht, wie sie sich entlang der Linien bewegt und andererseits wird eine größere Spannung angelegt, wobei die Feldlinien sich verdichten und die Probeladung schneller bewegt wird. Dadurch erkennen die Schülerinnen und Schüler intuitiv, dass

- die Feldlinien tangential die Richtung der wirkenden Kraft angeben und
- je mehr Feldlinien pro Fläche vorhanden sind, die dort wirkende Kraft stärker ist.

Die durch Grieskörner erzeugten Feldlinienbilder (vgl. 7.10) werden die Lernenden in ihr Heft übernehmen, dabei müssen die Unterschiede zwischen Grießbild und Feldlinienbild klar diskutiert, kommuniziert und notiert werden. Das wäre, dass sich Feldlinien nicht schneiden⁷⁹ oder teilen - Grießkörnerketten können dies. Des Weiteren können Grießkörnerketten nicht exakt entlang einer Feldlinie laufen - die Grießkörnerketten werden durch die Feldrichtung (Kraft auf eine Probeladung) und die gegenseitige Beeinflussung der Grießkörner bestimmt, die Feldlinien werden nur durch die Feldrichtung und Feldstärke bestimmt.

Weitere Eigenschaften lassen sich im Unterrichtsgespräch relativ schnell entwickeln:

- Feldlinien enden senkrecht auf Oberflächen elektrischer Leiter.
- Je nach der Geometrie der Objekte liegen die Feldlinien unterschiedlich dicht.
↪ An den Spitzen von Leitern ist ihre Dichte besonders hoch.
(Eingang auf Blitzableiter, Verhalten während Gewitter)

Gerade an dieser Stelle sollte eine Unterscheidung zwischen Vektorfeldern und skalaren Feldern stattfinden. Der in dieser Stunde oft genutzte Kraftbegriff mit seinem Vektorcharakter impliziert für die Schülerinnen und Schüler einsichtig das elektrische Feld als Vektorfeld. Die Nennung möglicher skalarer Felder kann im offenen Unterrichtsgespräch seitens der Lernenden kommen, sodass die Unterscheidung für alle Beteiligten sehr einleuchtend erscheint. Diese skalaren Felder, bspw. Luftfeuchtigkeit und Temperatur, sollten auch im Alltagskontext, bspw. beim Wetterbericht, eingebettet werden. Ein nochmaliges Aufgreifen der Thematik ist bei der Behandlung des Potentials möglich.

In der Hausaufgabe sollen die Lernenden ein System aus zwei entgegengesetzten Ladungen analysieren. Dazu sollen sie die Feldlinien beider Ladungen (radialsymmetrisch) zunächst unabhängig voneinander skizzieren und danach mithilfe der Vektoraddition von Kräften ein mögliches Feld beider Ladungen konstruieren. Um dabei

⁷⁹Bei einer hier offen gestalteten Diskussion kann der Kraftbegriff gut mit dem Feldkonzept anschaulich verwoben werden.

den zeitlichen Aufwand in Grenzen zu halten, reicht die Konstruktion von zwei bis drei Feldlinien mithilfe von jeweils drei bis vier exponierten Raumpunkten.

Die Schülerinnen und Schüler können unterschiedliche Feldtypen klassifizieren und wissen, dass die Kraft tangential zur Feldlinie wirkt.

6. Stunde

In der letzten Stunde wurde zwar schon mit ihm gearbeitet, aber bevor man ins rechnerische Kalkül geht, sollte man den Begriff Probeladung (q) klar definieren. Anschließend kann der mathematische „Beschreibungsapparat“ mittels Definition der elektrischen Feldstärke aufgebaut werden. Viele Schülerinnen und Schüler während der Unterrichtsreihe die Mathematik vermisst und wünschten sich Konkretisierungen auf formaler Ebene. Andererseits war im bisherigen Unterrichtsgang die phänomenologische Darstellungsweise gerade für mathematisch Schwächere eine gute Gelegenheit, sich im Unterrichtsgespräch einzubringen. Die Lerngruppe erkannte zudem, dass die Physik nicht, wie so oft angenommen, eine Art angewandte Mathematik darstellt.

Die Definition der elektrischen Feldstärke kann mit Hilfe eines Versuches verständlich gemacht werden. Dazu wird eine kleine Metallkugel isoliert an einen Kraftmesser installiert und in die Nähe einer großen geladenen Kugel gebracht. Die Kraft wird bei unterschiedlichen Ladungen der kleinen Kugel gemessen. Bei tabellarischer Auswertung fällt ein gleichbleibendes Verhältnis zwischen $\vec{F}$ und q auf, welches nun als elektrische Feldstärke $\vec{E}$ definiert wird.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (7.2)$$

Der Versuch mit der Ladungsbestimmung mittels Galvanometer ist sehr schwierig, zeitaufwändig und liefert nur selten vernünftige Werte.⁸⁰ Wenn die Werte zu stark schwanken und kein Nachvollziehen der Definition 7.2. gestatten, wird der Versuchszweck, nämlich die Definition der Feldstärke zu veranschaulichen, konterkariert. Dadurch sinkt die Motivation erheblich und kann den weiteren Erkenntnisweg stark gefährden.

Ein Verzicht auf das Experiment würde eine ähnlich Reaktion auslösen - „Das fällt einfach vom Himmel“-, daher empfiehlt es sich, den Aufbau zu zeigen und mit Verweis auf die Schwierigkeit der Messung mit vorbereiteten Werten weiter zu arbeiten (s.A. A.2).

Danach kann eine weitere Formel für den Spezialfall des homogenen Feldes erörtert werden. Mit einer Erinnerung an den Versuch der letzten (Bild b)) und vorletzten Stunde (Dichte von Feldlinien) wurde festgestellt, dass:

⁸⁰Die Bedingungen ändern sich im Physikraum durch die vielen anwesenden Schülerinnen und Schüler fortwährend, was elektrostatische Experimente deutlich erschwert.

- Je größer U , desto dichter sind die Feldlinien, desto größer die wirkende Kraft im elektrischen Feld.
 $\hookrightarrow E \sim U$
- Je kleiner der Abstand der Elektroden, desto dichter sind die Feldlinien, desto größer die wirkende Kraft im elektrischen Feld
 $\hookrightarrow E \sim \frac{1}{d}$

Zusammenfassend ergibt sich für die elektrische Feldstärke im homogenen Feld:

$$E = \frac{U}{d} \quad (7.3)$$

Sehr wichtig ist eine Diskussion über die Kraftwirkung im homogenen Feld. Fast alle Schülerinnen und Schüler kommen zu dem nicht zutreffenden Schluss, dass die auf eine Ladung wirkende Kraft umso größer sein muss, je dichter die Ladung an der Kondensatorplatte steht. Diese Fehlvorstellung gilt es mit der Formelbetrachtung von 7.3 auszuräumen. Gerade in späteren Unterrichtsreihen, in denen Teilchen von magnetischen oder elektrischen Feldern abgelenkt werden, ist diese Fehlvorstellung bei Erörterungen hinderlich. Sehr einsichtig sind die Lernenden bei einem Vergleich mit dem Gravitationsfeld. In der Nähe der Erdoberfläche kann das Gravitationsfeld der Erde als homogen angenommen werden. Wenn die Fehlvorstellung der Schülerinnen und Schülern richtig wäre, würde das bedeuten, dass ein Körper im 4. Stock eines Gebäudes leichter wäre als im Erdgeschoss. Dies widerspricht aber natürlich den Alltagserfahrungen der Lernenden und hilft, diese Fehlvorstellung zu überwinden.

Im Anschluss bzw. in der Hausaufgabe sollten kleine Übungsaufgaben zu den erhaltenen Formeln $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ bzw. $E = \frac{U}{d}$ bearbeitet werden, damit der neue Begriff und seine Definition besser verinnerlicht werden.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen die Definition der elektrischen Feldstärke und deren Berechnung im homogenen Feld.

7. Stunde

Da in der letzten Stunde die Feldstärke für ein homogenes Feld aufgestellt wurde, wird in dieser Stunde das radialsymmetrische Feld einer Ladung untersucht und dadurch weitere Gesetzmäßigkeiten erarbeitet. Dazu wird der Versuch aus Stunde 6 mit zwei gleichgroßen und gleichgeladenen Kugeln durchgeführt. Gemessen wird die abstoßende Kraft $\vec{F}$ bei Variierung des Abstandes r .⁸¹

⁸¹Der Abstand r sollte laut Experimentiervorschlägen nicht kleiner als der doppelte Kugeldurchmesser sein, da sonst die Messwerte durch Influenzerscheinungen zu stark verfälscht werden. Aus Erfahrung liefern solche Experimente mithilfe von Schulexperimentiermaterial aber fast nie brauchbare Werte. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, die Zeit zu sparen und mit den Schülerinnen und Schülern das Experiment mittels Computerprogramm durchzuführen und dabei viel Wert auf die Analogie zum Gravitationsfeld zu legen.

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

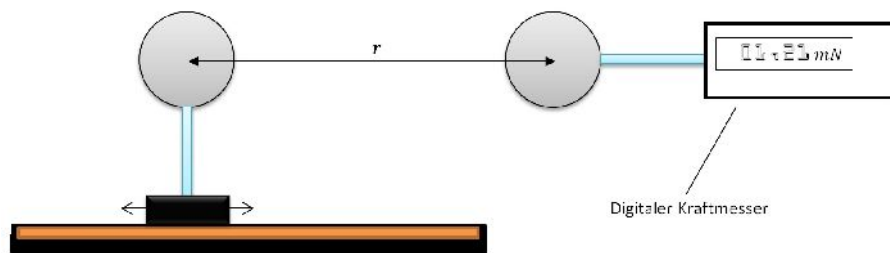


Abbildung 7.11.: Messung der Kraft, die das elektrische Feld in der Umgebung einer geladenen Kugel auf eine zweite ausübt.

Mithilfe einer digitalen graphischen Auswertung können unterschiedliche Achsenkonfigurationen ausprobiert werden. Die beiden wichtigsten sind nachfolgend zu sehen. Die Lernenden sind darauf hinzuweisen, dass die Gestalt des linken Graphen immer auf eine reziproke bzw. reziprok-quadratische Abhängigkeit der Abszissengröße hinweist.

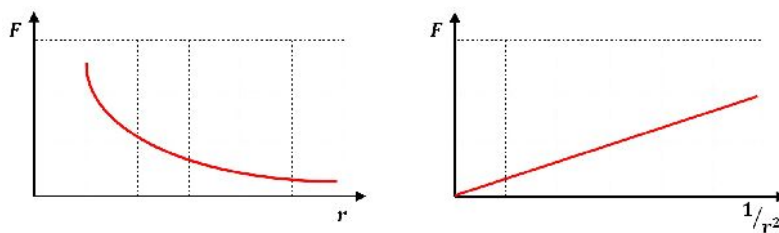


Abbildung 7.12.: Abhängigkeit des Betrages der Kraft, die eine elektrische Ladung im Feld einer anderen erfährt, *links* von r und *rechts* von r^{-2}

Erhaltenes Ergebnis: $F \sim \frac{1}{r^2}$

Dieses Ergebnis sollte nun, vom Lehrer angeregt, verglichen werden mit dem bekannten Gravitationsfeld. Durch die identische Abstandsabhängigkeit wird den Lernenden die Tragweite des Feldbegriffs vor Augen geführt und der Konzeptgedanke der Wechselwirkung gestärkt.⁸²

⁸²Sehr interessant finden die Schülerinnen und Schüler an dieser Stelle immer die gedankliche „Herleitung“ der Abstandsabhängigkeit über den Gaußschen Satz - der nicht näher erläutert wird - und der Kugeloberfläche. Dazu überlegt man sich bspw. 20 Feldlinien, die vom Mittelpunkt der Kugel ausgehen. Die Kugel mit Radius $r = 1$ hätte eine Oberfläche von rund 12,6 FE (also eine Dichte von $20/12,6 \approx 1,6$ Feldlinien pro FE), eine Kugel mit Radius $r = 2$ hätte eine Oberfläche von rund 50,3 FE (also eine Dichte von $20/50,3 \approx 0,4$ Feldlinien pro FE). D.h. der doppelte Radius, sprich doppelter Abstand, bedeutet eine viermal so kleine Feldliniendichte. Da diese Dichte an Feldlinien der Feldstärke entspricht, wird das Feld um den Faktor r^2 schwächer. Mit einfachen Überlegungen, ohne Experimente, Gesetzmäßigkeit zu erhalten fasziniert die meisten und schult das Prinzipiendenken. Gerade am Ende der Reihe, mit dem Vergleich verschiedener Kraftfelder, kann so auf die $\frac{1}{r^2}$ -Anhängigkeit für Magnetfelder geschlossen werden.

Bei selbigem Versuchsaufbau wird der Betrag von $\vec{F}$ in Abhängigkeit der Ladung Q gemessen. Die Ladung der Probeladung q und r bleiben konstant. Auch hier ergibt sich eine Proportionalität.

Erhaltenes Ergebnis: $F \sim Q$

Dieser abgewandelte Versuch mit unterschiedlichen Ladungsmengen sollte wiederum aus verschiedenen Gründen (vgl. 6. Stunde) mit vorbereiteten Werten analysiert werden, um die Proportionalität festzustellen. Ein geminderter Erkenntnisgewinn ist dadurch nicht zu erwarten.

Mit dem Ergebnis $F \sim q$ der letzten Stunde (Definition von $\vec{E}$) gilt insgesamt:

$$F \sim \frac{1}{r^2} \quad F \sim Q \quad F \sim q \quad (7.4)$$

Zusammengefasst im radialsymmetrischen Feld:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{k \cdot Q}{r^2} \quad (7.5)$$

Die Proportionalitätskonstante $k = (4\pi\epsilon_0)^{-1}$ kann ausführlich über die Flächenladungsdichte besprochen werden, ist aber aus Elementarisierungsgründen fragwürdig. Es wäre nur ein neuer zusätzlich verwirrender Begriff, der später nicht mehr für die Schülerinnen und Schüler relevant ist. Eine kurze Beschreibung der Lehrperson, dass ϵ_0 experimentell bestimmt werden kann und der Term 4π von der Kugeloberfläche herrührt, reicht an dieser Stelle vollkommen.

Somit erhält man insgesamt für die Feldstärke eines radialsymmetrischen Feldes:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \quad (7.6)$$

Die Schülerinnen und Schüler verstehen das Abstandsgesetz, ziehen erste Verbindungen mit dem Gravitationsfeld und können die Feldstärke in einem radialsymmetrischen Feld berechnen.

8. Stunde

Die Erkenntnisse der letzten Stunde sollen nun weiter vertieft und ausgebaut werden. Das Feldlinienbild zweier Ladungen (gleichnamig oder nicht) wurde in der 5. Stunde schon behandelt. Nun wird die wirkende Kraft zwischen diesen mathematisch mit dem Coulombschen Gesetz erfasst. Mit ihrem bisherigen Wissen sollten die Schülerinnen und Schüler die Kraft des radialsymmetrischen Feldes einer Ladung Q_1 auf eine zweite Ladung Q_2 selbst herleiten können.

Das von einer Ladung Q_1 erzeugte radialsymmetrische Feld $E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1}{r^2}$ (7.6) übt auf eine zweite Ladung Q_2 im Abstand r von Q_1 die Kraft $F = Q_2 E_1$ (7.2) aus.

Zusammengefasst ist die wirkende Kraft zwischen beiden Ladungen:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (7.7)$$

Das Wichtigste ist eine ausführliche Diskussion über diese Gesetzmäßigkeit. Die Lehrperson sollte sich so weit wie möglich aus dem Unterrichtsgespräch heraushalten - wenn nötig Impulse geben - und die Lernenden selber Schlussfolgerungen und Assoziationen ziehen lassen. Somit wird der Erkenntnisgewinn bei eigener Überlegung möglichst maximiert. Sowohl die Methode Think-Pair-Share als auch Placemat hat sich hierbei hervorragend bewährt.

Schlussendlich sollte Folgendes herauskristallisiert werden:

- Nach dem Wechselwirkungsprinzip (*actio = reactio*) ist die Kraft, die das Feld der Ladung Q_1 auf die Ladung Q_2 ausübt, entgegengesetzt gleich der Kraft, die das Feld der Ladung Q_2 auf die Ladung Q_1 ausübt. Vergleich mit dem magnetischen Feld aus dem Versuch der 1. Stunde (7.6).
- Das Coulombsche Gesetz entspricht dem Gravitationsgesetz. (Anderer Vorfaktor und elektrische Ladungen statt der Ladung „Masse“)
- Die Kraft kann, anders als die nur anziehende Gravitationskraft, sowohl anziehend als auch abstoßend sein. (Ladung, Masse immer positiv; elektr. Ladung kann positiv oder negativ sein)

Um das Prinzipiendenken der Physik und das Wechselwirkungskonzept des Feldes bei den Schülerinnen und Schülern weiter zu festigen, ist auf die unterschiedlichen Größenordnungen elektrischer und gravitativer Wirkungen zu verweisen. Das Coulombsche Gesetz gilt mikroskopisch im Atom zwischen positivem Kern und negativen Elektron, makroskopisch bspw. bei den Schulversuchen und theoretisch bei astronomischen Längen, wobei im Bereich der Astronomie die Gravitationskraft vorherrscht, welche aber auch im makroskopischen Bereich unser Leben lenkt und nur im mikroskopischen schwach wirkt. Ein erster Austausch über die unterschiedliche Stärke und Ladungskopplung zweier fundamentaler Kräfte ist hier sehr gut möglich und

bereitet das Konzept der Austauschteilchen vor.⁸³

Das neue Gesetz sollte mit Übungen in der Hausaufgabe vertieft werden und somit sollten die Lernenden auch ein Gefühl für die Größenordnungen der wirkenden Kraft entwickeln.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen das Coulombsche Gesetz, können es anwenden und ziehen Analogien zum Newtonschen Gravitationsgesetz.

9. und 10. Stunde

In dieser Stunde soll der Alltagsbezug zu bekannten Größen der Elektrizität näher betrachtet werden, damit die Lernenden auch einen besseren Bezug zur „Wirklichkeit“ bekommen und letztendlich die Motivation aufrecht erhalten wird.

In der letzten Stunde wurden die Analogien zum Gravitationsfeld diskutiert, dieser Bezug wird nun weiter verfolgt.

In Analogie zur potentiellen Energie bzw. zur mechanischen Arbeit im Schwerfeld wird jetzt die Arbeit im elektrischen Feld betrachtet. Um einen geladenen Körper im homogenen elektrischen Feld eines Kondensators von der einen Platte zur anderen Platte zu bewegen (Abstand d), muss Arbeit vom Feld verrichtet werden. Die Kraft $F_{el} = q \cdot E$ wirkt in Richtung des Weges. Daher beträgt die Arbeit längs der Wegstrecke d :

$$W_{el} = F_{el} \cdot d = q \cdot E \cdot d \quad (7.8)$$

In Analogie zum Anheben eines Körpers im homogenen Schwerfeld (Nahe der Erdoberfläche):

$$W_{pot} = F_g \cdot h = m \cdot g \cdot h \quad (7.9)$$

Die potentielle Energie wird jeweils in kinetische Energie umgewandelt.

Wie schon bei der Definition der elektrischen Feldstärke ist eine Abhängigkeit von der zu bewegendenden Ladung q ungeeignet. Hingegen der Quotient $\frac{W}{q} = E \cdot d$ unabhängig von der transportierten Ladung ist. Dieser Quotient eignet sich neben der Feldstärke zur Beschreibung von elektrischen Feldern und wird als Potential φ bezeichnet.

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad (7.10)$$

⁸³Die elektrische sowie die gravitative Kraft haben eine unendliche Reichweite. Das die doch wesentlich stärkere elektrische Kraft auf astronomischen Größenordnungen anscheinend keine Rolle mehr spielt, muss den Schülerinnen und Schülern damit erklärt werden, dass die Elemente (Atome) und die daraus aufgebauten Moleküle in der Regel elektrisch neutral sind, da sie immer das Bestreben des Ausgleichs haben. Somit sind natürlich die Erde und alle anderen Planeten nach außen hin auch elektrisch neutral, was dazu führt, dass Planeten nicht elektrisch wechselwirken

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

Somit erhält man für ein beliebiges elektrisches Feld den Potentialunterschied $\Delta\varphi_{1,2}$ zwischen zwei Punkten P_1 und P_2 , indem man die Überführungsarbeit $\Delta W_{1,2}$ für eine Probeladung q durch den Betrag der Ladung dividiert. Diesen *Potentialunterschied* bzw. *Potentialdifferenz* zwischen zwei Punkten eines elektrischen Feldes nennt man *Spannung*:

$$\Delta\varphi_{1,2} = \frac{\Delta W_{1,2}}{q} = U \quad (7.11)$$

Diesen Begriff werden die Schülerinnen und Schüler aus dem Alltag gut kennen und wissen nun, woher er stammt. Auch eine Verbindung zwischen den Formeln $E = \frac{F}{q}$ und $E = \frac{U}{d}$ ist nun hergestellt und diese stehen nicht einzeln nebeneinander.

Oft tauchen Fragen seitens der Lernenden auf, warum man denn eine zweite Größe zur Beschreibung des elektrischen Feldes definiert hat und ob nicht eine der beiden ausreicht. Den Schülerinnen und Schülern ist verständlich zu machen, dass mithilfe der elektrischen Feldstärke die Kraftwirkung im Feld erklärt wird, aber deren Bestimmung mit Kraftmessern experimentell schwierig und generell ungenau ist (vgl. Versuche der letzten Stunde). Das elektrische Potential ist zur Beschreibung des Feldes gleich gut geeignet und hat den Vorteil, dass eine Spannungsmessung zur Bestimmung der Potentialdifferenz zwischen zwei Punkten leicht und sehr genau durchzuführen ist. Weiterhin hat diese Messmethode den sehr wichtigen Vorteil, dass man auf einen Probekörper verzichten kann. Letztlich hat sich im Alltag deshalb der Begriff der Spannung auch durchgesetzt.

Bei Herleitung des Potentials im radialsymmetrischen Feld muss der Integralbegriff vorhanden sein, was in den meisten Fällen nicht gegeben ist. Daher sollte hier eine schlichte Nennung der Zusammenhänge reichen. Wichtig ist nur, dass der Bezugspunkt P_2 weit entfernt von der Ladung gewählt wird und somit der Term mit der $\frac{1}{r_2}$ -Abhängigkeit verschwindet. Dies wird fast allen Schülerinnen und Schülern aber erst bei der graphischen Betrachtung von Potentialen klar.

$$W_{pot} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot Q}{r} \quad \text{bzw.} \quad \varphi = \frac{W}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \quad (7.12)$$

Folgende Graphiken werden im Unterricht diskutiert und analysiert. Es sind jeweils die Feldlinien mit Potentiallinien dargestellt sowie daneben das dreidimensionale Potentialgebirge. Der Begriff Äquipotentiallinie bzw. Fläche wird von der Lehrperson nur gezeigt, das Interessante daran - eine mögliche Erklärung - sollte durch die Schülerinnen und Schülern erfolgen. Die Bilder wurden mit einem Applet der TU München erstellt.⁸⁴ Im Unterricht können die fertigen Bilder mit dem OHP gezeigt werden oder live mit PC und Beamer konstruiert werden. Letzteres ist für die Schülerinnen und Schüler greifbarer und beantwortet viele Fragen von vornherein, bspw. dass die Potentiallinien nicht immer denselben Abstand haben, sondern hier selbst gewählt sind etc.. Des Weiteren kann man sich die elektrische Feldstärke anzeigen lassen und damit deren betraglichen Verlauf in vielerlei Hinsicht - bspw. zur Aufzeigung des Abstandsgesetzes - verfolgen.

⁸⁴http://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/programme/e_feld/E_Feld.html

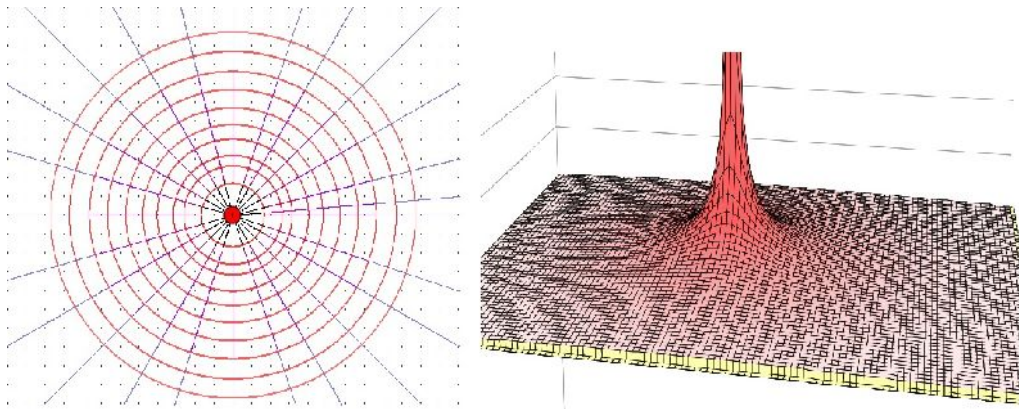


Abbildung 7.13.: Eine positive Punktladung

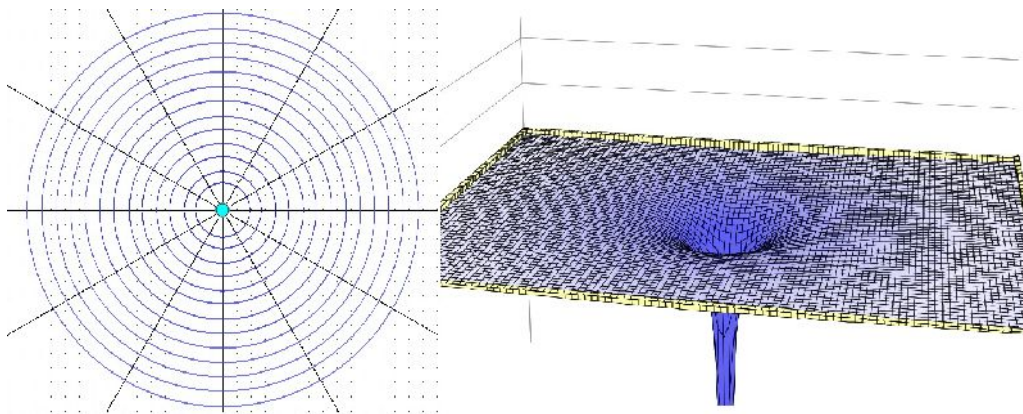


Abbildung 7.14.: Eine negative Punktladung

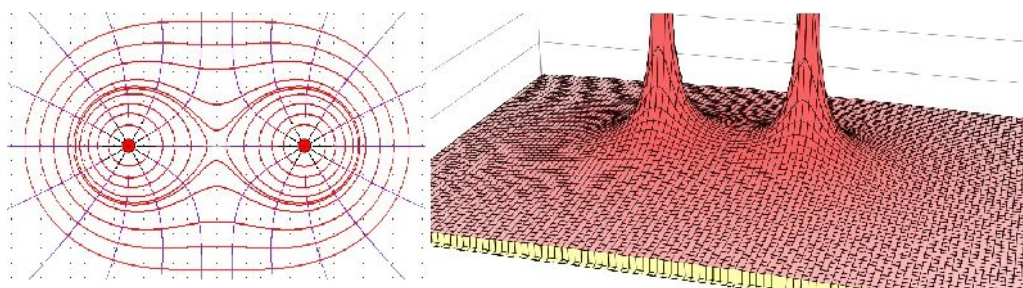


Abbildung 7.15.: Zwei positive Punktladungen

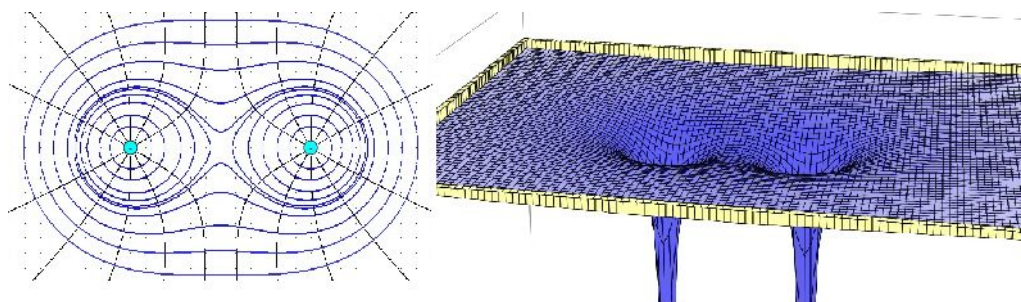


Abbildung 7.16.: Zwei negative Punktladungen

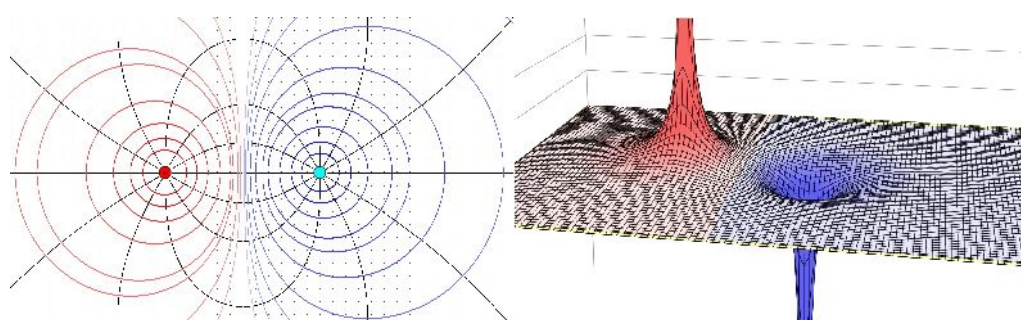


Abbildung 7.17.: Eine positive und eine negative Punktladung

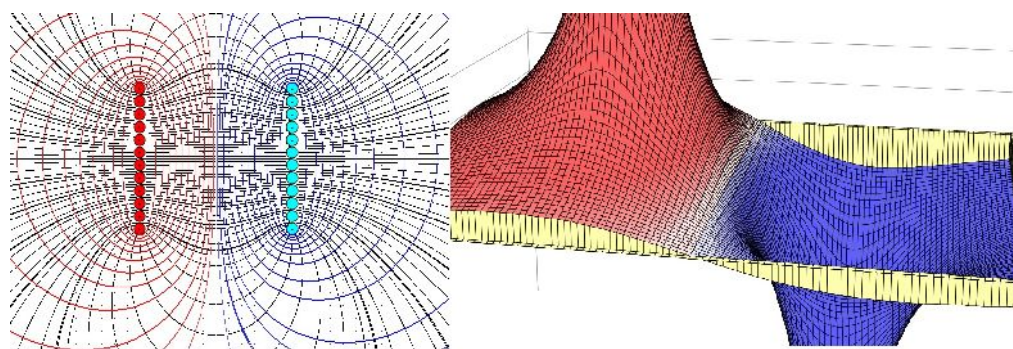


Abbildung 7.18.: Feld zweier entgegengesetzter Platten, wobei die Platten Sitz einzelner Punktladungen sind

Gerade in Hinsicht auf das Geometrisierungskonzept können hier Brücken geschlagen werden. Hier können die Schülerinnen und Schüler den Zusammenhang zwischen Geometrie des Objektes (Steigungsverlauf) und einer wirkenden Kraft erkennen. Je steiler die Kurve des Potentials (nahe der Punktladung), desto größer die Feldstärke bzw. die wirkende Kraft. D.h. statt der Dichte der Feldlinien, die eh unmittelbar neben einander liegen und schlecht normiert werden können, ist nun die Steigung

des Potentials von Interesse. Auch fächerübergreifend in Hinsicht der Differentialrechnung in der Mathematik ist für die Lernenden der Steigungsbegriff bekannt und wurde hiermit um eine Anwendungsmöglichkeit erweitert. Dies unterstützt nicht zuletzt das Aufzeigen der Stärke der Mathematik für die Physik.

Im Sinne der fortschreitenden Erkenntnisgewinnung und der damit verbundenen Festigung des Wissens sollten die Schülerinnen und Schüler das Potential als ein skalaras Feld identifizieren können (vgl. Std. 5).

In kognitiv leistungsfähigen Kursen ist es auch möglich, das Potential und die elektrische Feldstärke mathematisch über die Differentialrechnung zu verbinden. Den Zusammenhang bspw. in 7.12 kann man dann wie folgt definieren:

$$E(r) = -\frac{d}{dr}\varphi(r) \quad (7.13)$$

gilt. Dadurch findet ferner eine weitere horizontale Vernetzung zum Fach Mathematik statt. Auf eine vektorielle Schreibweise würde der Autor verzichten, sie erregt zu große Verwirrung und ist nicht zielführender als der skalare Ausdruck. Man sollte aber darauf hinweisen, dass es sich eigentlich um vektorielle Größen handelt und somit die Formel noch komplizierter wäre.

Im Anhang (vgl. A.2) lässt sich noch ein Arbeitsblatt finden, in der das elektrische Potential und die elektrische Spannung über eine Analogie zum Gravitationsfeld anschaulich hergeleitet wird. Diese Vorgehensweise ist recht empfehlenswert, wenn die Gravitation schon im Rahmen einer Feldvorstellung behandelt wurde. Dieses Arbeitsblatt kann entweder an dieser Stelle oder am Ende der Reihe beim Vergleich unterschiedlicher Felder eingesetzt werden. Mit diesem Zusatz ist die Tragweite des Feldkonzeptes über mehrere Theorien hinweg den Schülerinnen und Schülern wesentlich bewusster und vertieft den Feldbegriff als umfassendes Wechselwirkungskonzept.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen das elektrische Potential, dessen Nutzen und graphische Darstellung.

11. und 12. Stunde

Damit die Schülerinnen und Schüler den gedanklichen Faden der vorangegangenen Stunden wieder aufnehmen können, wird eine kleine Wiederholung zu elektrischen Potentialen vorangestellt und anschließend mit der Klärung weiterer Fragen vertieft. Mögliche Fragen sind:

- Warum werden stets alle Äquipotentialflächen/linien von den elektrischen Feldlinien senkrecht geschnitten?
- Warum zeigen Feldlinien stets in Richtung des abnehmenden elektrischen Potentials?

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

- Warum ist im elektrostatischen Gleichgewicht die Leiteroberfläche stets eine Äquipotentialfläche?

Im Anschluss soll folgendes Bild gezeigt werden:

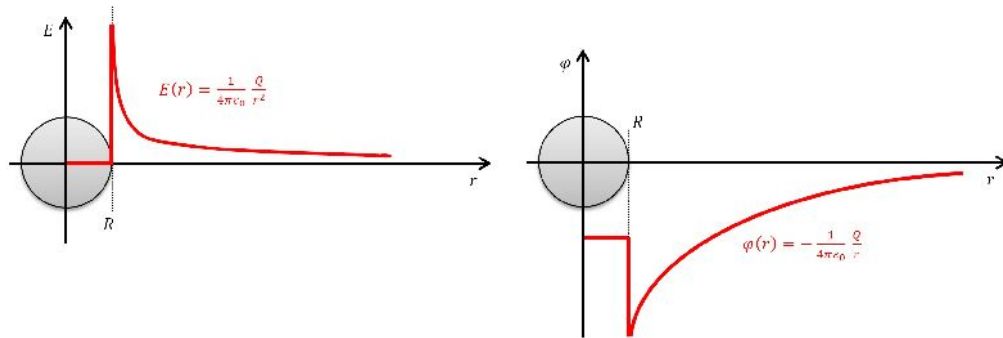


Abbildung 7.19.: Elektrisches Potential und Feld einer Hohlkugel

Mithilfe der Graphik soll hier nochmals auf die mathematische Verbundenheit zwischen Potential und Feldstärke eingegangen werden, bspw. dass das Änderungsverhalten eines konstanten Potentials ein verschwindendes elektrisches Feld bedeutet. Dies sollte in der folgenden Diskussion auf ein mögliches Ausbreitungsmedium des elektrischen Feldes führen. Warum ist innerhalb der Hohlkugel kein elektrisches Feld vorhanden? Entweder durch einen Schülerbeitrag oder durch einen Lehrerimpuls wird die Frage aufgeworfen, ob im Inneren der Kugel möglicherweise keine bzw. zu wenig Luft ist und dies die Erklärung für das fehlende Feld sein könnte. Anschließend wird das klassische Experiment mit einer Vakuumglocke und einer Drahthaube vorgeführt.

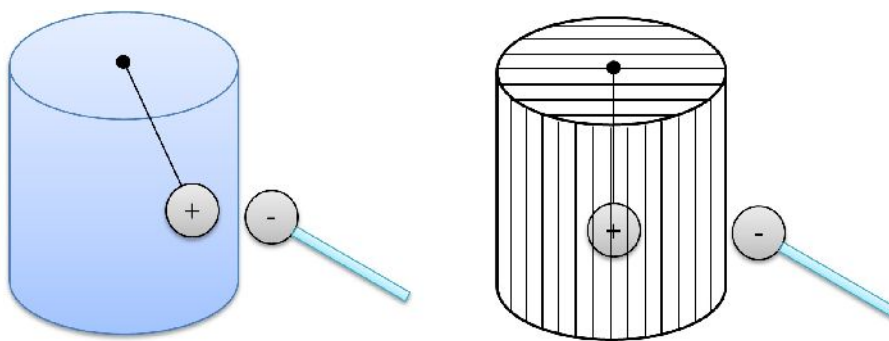


Abbildung 7.20.: Links: Vakuumglocke Rechts: Drahthaube

Sowohl vor als auch nach dem Vakuumieren ist eine Auslenkung der positiv geladenen Kugel im Inneren in Richtung der negativ geladenen Kugel zu sehen. Somit

ist gezeigt, dass das elektrische Feld sich auch im Vakuum ausbreitet und kein Trägermedium benötigt. Nach diesem Versuch kamen jeweils viele Beiträge seitens der Lernenden, die die Ansicht äußerten, dass man sich diesen Sachverhalt hätte denken können. Es werden Verweise, dass Wechselwirkungen auch in anderen Fällen, bspw. das Erdmagnetfeld und das Gravitationsfeld, welche beide auch im Weltall im luftfreien Raum - Vakuum - vorhanden sind, genannt. Dies müsste dann auch bedeuten, dass man das Feldkonzept auch in solchen Fällen zur Anwendung bringen könnte. Auch an dieser Stelle sollte nochmals der Hinweis seitens der Lehrperson erfolgen, dass die Wirkungen über den Raum selbst erfolgen und nichts stoffliches - kein Medium - gebraucht wird.

Selbiger Versuchsaufbau wird nochmals verwendet, um einen weiteren, sehr wichtigen Aspekt eines Feldes zu demonstrieren, den Aspekt einer möglichen Abschirmung. Hierfür wird statt der Glasglocke ein Drahtkäfig verwendet. Wenn nun die positiv geladene Kugel im Drahtgeflecht aufgehängt und die negativ geladenen Kugel von außen in die Nähe des Käfigs gehalten wird, ist keine Auslenkung zu sehen. Somit wirkt keine Kraft auf die innere Kugel. Das heißt, das Feld wird abgeschirmt. Aus diesem Grund ist auch im Inneren einer geladenen Hohlkugel, welche als sehr sehr dichtes Drahtgeflecht angesehen werden kann, kein Feld vorhanden. Auch diesen Sachverhalt kannten die Lernenden schon aus dem Alltag, diese Erscheinung wird als Faradayscher Käfig bezeichnet.

Die Schülerinnen und Schüler vertiefen ihre Erkenntnisse zum Potentialbegriff und wissen, dass Felder kein Ausbreitungsmedium benötigen.

13. und 14. Stunde

In dieser Stunde soll eine umfassende Reflexion der behandelten Unterrichtsreihe vonstattengehen. Dabei wird der Kurs in Gruppen aufgeteilt und jede Gruppe soll eine Folie mit der Überschrift „*Das Feldkonzept*“ entwerfen. Sie können kurz die historischen Entwicklungsschritte des Konzeptes darstellen, aber das Hauptaugenmerk soll einerseits auf die Beschreibung der Feldbegriffe und andererseits auf die Untersuchung verschiedener Feldarten gelegt werden. Letzteres zielt darauf ab, dass die Schülerinnen und Schüler Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen dem elektrischen, dem magnetischen und dem Gravitationsfeld herausarbeiten.

Die Schülerinnen und Schüler haben bereits gelernt, elektrische Felder mit geeigneten Modellbegriffen und Rechengrößen vollständig zu beschreiben. Zudem sind ihnen sowohl die magnetischen Phänomene aus der Mittelstufe als auch die Gravitationskraft aus der Einführungsphase bekannt und beide wurden mit dem physikalischen Begriff des Feldes beschrieben.

Ein wichtiges Ziel ist es, dass Sie erkennen, welche Phänomene am sinnvollsten als Grundlage für die Definition einer magnetischen und gravitativen Feldstärke geeignet sind. Sie sollen in diesen Gruppenauftrag keine fertigen Definitionen - etwa aus

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

dem Lehrbuch oder Internet - nachlesen und abliefern, sondern sich die unübersehbaren Analogien zwischen den Feldern ins Gedächtnis rufen und sich somit vertieft mit dem Feldkonzept auseinandersetzen. Die Bearbeitung der Aufgabe ist natürlich individuell an die Lerngruppe anzupassen. Von vornherein sollten heterogene Gruppen gebildet werden, bspw. ist eine homogene Gruppe aus leistungsschwachen Schülerinnen und Schülern dieser Aufgabe nicht gewachsen. Des Weiteren sollte, gerade im Grundkurs, sofern sich keinerlei Resultate einstellen, das Lehrbuch zu Rate gezogen werden dürfen, aber mit dem Hinweis, dass eine ausführliche Erklärung des Sachverhalts bei der Präsentation obligatorisch ist und reines Abschreiben keine sonderliche Leistung darstellt. Von einer Internetrecherche sollte man erfahrungsgemäß Abstand nehmen, die Informationsfülle und der unterschiedliche Schwierigkeitsgrad - inklusive verschiedener, nicht bekannter Schreibweisen - der Darstellung sind enorm und verwirrt die Lernenden offensichtlich.⁸⁵

Mögliche Aufgabenstellung:

Versuchen Sie, möglichst viele Gemeinsamkeiten/Unterschiede zwischen den drei Ihnen bekannten Feldern zu finden. Verwenden Sie hierzu eine Tabelle.

- Beginnen Sie zunächst mit Grunderscheinungen, die Sie beobachten können.
- Versuchen Sie anschließend Modellbegriffe vom elektrischen auf das magnetische und gravitative Feld zu übertragen.
- Überlegen Sie sich, ob Sie Definitionen oder Rechengrößen sinnvoll übertragen können.

Übertragen Sie die gefunden Analogien auf eine Folie und präsentieren Sie ihre Ergebnisse im Plenum (vgl. [STA09, D.1.15]).

Eine Schülerlösung, die am Ende der Präsentation durch weitere Plenumsbeiträge ergänzt wurde, lässt sich im Anhang (vgl. A.2) finden.

Die Schülerinnen und Schüler vertiefen den Feldbegriff als Wechselwirkungskonzept und als Prinzip der Physik durch Auffrischung des vorher Behandelten und Analogiebildung mit anderen Feldern.

Die Reihe sollte währenddessen und / oder am Ende mit einem Anwendungskontext über Gewitter, Kopierer, Laserdrucker, Gefahren durch Elektrosmog, Spannung in der Medizin, Rauchgasreinigung etc. versehen werden, um den Alltagswert für Schülerinnen und Schüler konkreter zu machen. Die Themenauswahl kann von den Lernenden ausgehen oder man nimmt die Beispiele aus dem vorhandenen Schulbuch, um dessen Nutzen weiter zu unterstreichen.

⁸⁵Bei intelligent gewählten Suchbegriffen lässt sich zudem eine tabellarische Lösung der Aufgabe schnell finden und setzt somit den Erkenntnisgewinn nahe Null.

7.3. Das Geometrisierungskonzept

Eine Behandlung des Geometrisierungskonzeptes ist erst gegen Ende der Oberstufe vorstellbar, da viele fachliche Vorkenntnisse benötigt werden. Diese kleine Unterrichtsreihe ist qualitativer Natur mit quantitativen Aspekten. Eine mathematisch saubere Ausführung wäre nicht möglich, da die beinhaltete Tensorrechnung erst ab dem vierten Semester eines Physikstudiums bekannt ist. Des Weiteren müssen die Schülerinnen und Schüler eine Reihe an Vorkenntnissen aufweisen, sodass eine Behandlung des Themas in einem Grundkurs schwierig scheint, da hier schon die spezielle Relativitätstheorie nicht sehr umfangreich im Lehrplan verankert ist.

Benötigte Vorkenntnisse sind: Gravitationsgesetz nach Newton, Kenntnisse von Quantenphysik, Inertialsysteme, Galileisches Relativitätsprinzip, Galilei-Transformation, die zwei Postulate Einsteins (Relativitätsprinzip und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit), Lorentz-Transformation, Spezielle Relativitätstheorie (Zeitdilatation, Längenkontraktion, relativistischer Dopplereffekt). Des Weiteren sollten aus der Mathematik Kenntnisse über analytische Geometrie und Differentialrechnung vorliegen.

Die Unterrichtseinheit ist auf einen Leistungskurs zugeschnitten, wodurch die etwa zehn vorgeschlagenen Stunden nur etwa zwei Wochen am Ende der QII (Klasse 13) einnehmen und somit gut zu realisieren sind. Optimal wäre die Behandlung direkt nach der Speziellen Relativitätstheorie, so sind die Schülerinnen und Schüler schon mit den Grundprinzipien vertraut. Sie sind es zu diesem Zeitpunkt gewohnt, Gedankenexperimente zu deuten und zwischen Inertialsystemen geistlich hin und her zu springen. Eine wiederholte Beschäftigung mit der Relativitätstheorie mit den ständig wechselnden Koordinaten erfordert auch immer eine gewisse Eingewöhnungszeit. Überhaupt lernt man nur bei der Beschäftigung mit der Relativitätstheorie das Konzept des Beobachterwechsels kennen, das darauf beruht, physikalische Prozesse von unterschiedlichen Inertialsystemen aus zu analysieren.

7.3.1. Kurze Legitimation

In vielen Bundesländern ist die Allgemeine Relativitätstheorie mit dem einhergehenden Geometrisierungskonzept als möglicher Exkurs vorgesehen. In Nordrhein-Westfalen ist über „Einfluss der Gravitation auf die Zeitmessung“ (vgl. 5.3.1) die Allgemeine Relativitätstheorie sogar fest mit vier Unterrichtsstunden im Lehrplan verankert. Wenn man nun noch mit einbezieht, dass im Laufe der Reihe unter anderem die Spezielle Relativitätstheorie, die Wurfparabel (vgl. Ablenkung geladener Teilchen im Kondensator) etc. teilweise wiederholt werden, wobei Wiederholungen am Ende der QII (Klasse 13) vor den Abiturklausuren auf der Tagesordnung stehen, ist die vorliegende Reihe mit etwa zehn Unterrichtsstunden realisierbar und legitim.

7.3.2. Stunden der Unterrichtseinheit

1. Geometrie und Kausalität - Eine Einführung in die Raumzeit und Minkowskidiagramme.
2. Der Lichtkegel - Einteilung der Raumzeit in den Kausalitäts-Minkowski-kegel.
3. Die nichteuklidische Geometrie - Untersuchung der Längeninvarianz eines Stabes in zwei unterschiedlichen Systemen.
4. Einsteins Motivation - Beweggründe zur Aufstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie.
5. Himmel- und Erdlabor - Gruppenteilige Erarbeitung der zugrundeliegenden Gedankenexperimente.
6. Weiterführung der 5. Stunde.
7. Einstein mit Newton - Gruppenarbeit zur Berechnung der Raumzeit-Effekte mithilfe der Newtonschen Physik.
8. Weiterführung der 7. Stunde.
9. Der Geometrische Aspekt - Experimentelle Untersuchungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie und ihre geometrische Deutung.
10. Das Schwarze Loch - Erläuterung der Schwarzschildmetrik, der Einsteinschen Feldgleichung und ihre jeweiligen geometrischen Deutungen .
11. Weiterführung der 10. Stunde.
12. Der Flammsche Paraboloid - Vereinfachte Herleitung des Krümmungsgraphen und mögliche Interpretationen.

7.3.3. Inhalt der Stunden im Detail

Am Ende jeder Stunde wird kurz das erreichte Ziel auf dem Weg zur Geometrisierung als Wechselwirkungskonzept notiert.

1. und (2.) Stunde

Zu Beginn der Reihe sollen wieder Vorerfahrungen der Schülerinnen und Schüler begutachtet werden. Dazu kann eine Mindmap mit der Überschrift *Raumzeit* an der Tafel angelegt werden. Im Laufe dieser Gestaltung wird eine Bild einer dreidimensionalen Raumzeitkrümmung aufgelegt, um den Lernenden einen weiteren Impuls zu geben. Es werden hierbei zumeist die Effekte der Speziellen Relativitätstheorie, x-t-Diagramme und die Vierdimensionalität genannt, aber auch geometrisch bedingte Wechselwirkung angesprochen. Aussagen wie „die Erde macht einen Trichter in der Raumzeit, da drin dreht sich dann der Mond und kann nicht weg“ werden geäußert. Das letztendliche Wissen beschränkt sich aber natürlich auf rudimentäres phänomenologisches Wissen aus populärwissenschaftlichen Artikeln oder Fernsehreportagen (vgl. 5.3). Bei Betrachtung des Bildes muss von vornherein und im Verlauf der Reihe immer wieder klar gemacht werden, dass hier versucht wird, ein vierdimensionales Problem auf zwei Dimensionen darzustellen und dies nur recht schlecht die Wirklichkeit widerspiegelt.

Um die Gedankengänge der Schülerinnen und Schüler zu ordnen und geometrische Aspekt einzugliedern, werden nun Minkowski-Diagramme besprochen. Die Ausführlichkeit hängt davon ab, ob und wenn ja, wie detailliert sie in der Speziellen Relativitätstheorie eingeführt wurden. Gegebenenfalls muss hier eine zusätzliche Stunde dafür veranschlagt werden.

Durch die Mindmap sind die Effekte der Zeitdilatation und der Längenkontraktion wieder im Bewusstsein. Auch die Lorentztransformationen ist bekannt:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot \left(t - \frac{v}{c^2} \cdot x \right) \quad (7.14)$$

Hierdurch wird nochmals formal die Verwebung von Zeit t und Raum x deutlich. Im Unterrichtsgespräch wird eine mögliche Geometrisierung besprochen. Als Möglichkeit wird eine Einbeziehung der Zeit in die drei Raumkoordinaten genannt, wie es schon Minkowski vorgeschlagen hat. An dieser Stelle wird der Beginn seiner Rede vor der Versammlung der Naturforscher und Ärzte am OHP aufgelegt und im historischen Kontext bzw. mit Einbeziehungen damaliger Weltanschauungen diskutiert.⁸⁶ Den Schülerinnen und Schülern muss an dieser Stelle die Tragweite vor Augen geführt werden, damit überhaupt ein adäquates Grundverständnis der vierdimensionalen Raumzeit möglich ist. Die Relativität von Raum und Zeit muss immer wieder

⁸⁶vgl. Minkowski, Hermann: Raum und Zeit, 80. Versammlung Deutscher Naturforscher (Köln, 1908). In: Physikalische Zeitschrift. 10, 1909, S. 104 - 111.

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

in das Gedächtnis gerufen werden, um die Unterrichtsreihe zielführend durchführen zu können.

Um den Schülerinnen und Schülern die Sinnhaftigkeit zu verdeutlichen, kann folgendes Experiment gezeigt werden:

Hierzu benötigt man lediglich ein kurzes Stück Rohr $d \approx 10\text{cm}$, einen transparenten Luftballon und zwei Magnete. Den Luftballon schneidet man in der Nähe des Mundstückes auf und stülpt ihn über das Rohr. Aus Anschauungsgründen ist es zweckdienlich, ein Polarkoordinatensystem auf das Gummi zu skizzieren. In der Mitte des Ballons kann man nun einen Magneten von oben und einen anderen von unten (am besten einen langen Magneten) zusammenführen. Wenn man nun an dem unteren Magneten zieht, kann man die Ballonhaut nach unten ausdehnen und sie bildet einen Trichter innerhalb des Rohres.⁸⁷



Abbildung 7.21.: Utensilien

Hiermit kann nun Folgendes veranschaulicht werden: Man denkt sich ein Maß von bspw. einem Zentimeter in Drehrichtung und einen in Richtung Drehzentrum. Wenn das Rohr um seine Symmetrieachse nun sehr schnell gedreht würde, so könnte ein entfernter Beobachter aufgrund der Bahngeschwindigkeit eine Längenkontraktion in Drehrichtung feststellen. In Richtung Zentrum tritt diese Verkürzung nicht auf.

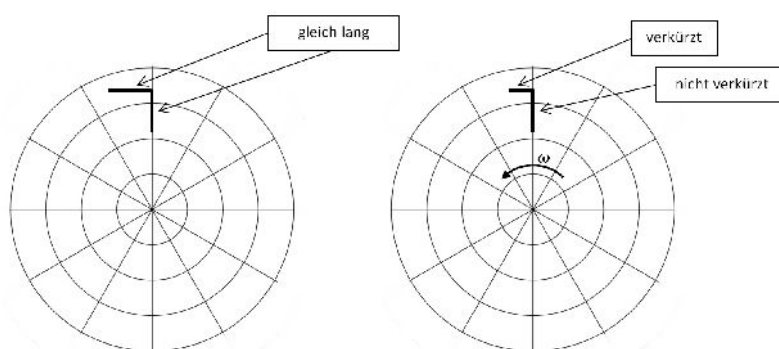


Abbildung 7.22.: Grundlagen zum Krümmungsexperiment

⁸⁷Andere Gummitücher können auch verwendet werden, aber durch die runde Gestalt des Ballons ist die Spannung in der Mitte etwas schwächer als in den äußeren Bereichen, dadurch ist die Krümmung nicht linear von außen nach innen, sondern sie ist in Richtung Mitte etwas steiler werdend.

Des Weiteren würde der entfernte Beobachter aufgrund der Drehung eine nach innen gerichtete Zentripetalkraft feststellen, die somit einer gravitativen Anziehungskraft gleichkommen würde. Wie könnte man nun dafür Sorge tragen, dass beide Maßstäbe wieder gleich lang sind?

Die sehr anschauliche Idee ist, dass beide Maße wieder gleichlang erscheinen würden, wenn das Gummi nach unten gedehnt wäre, sprich der Raum, in denen die Maße liegen, eine Krümmung aufweisen würde.

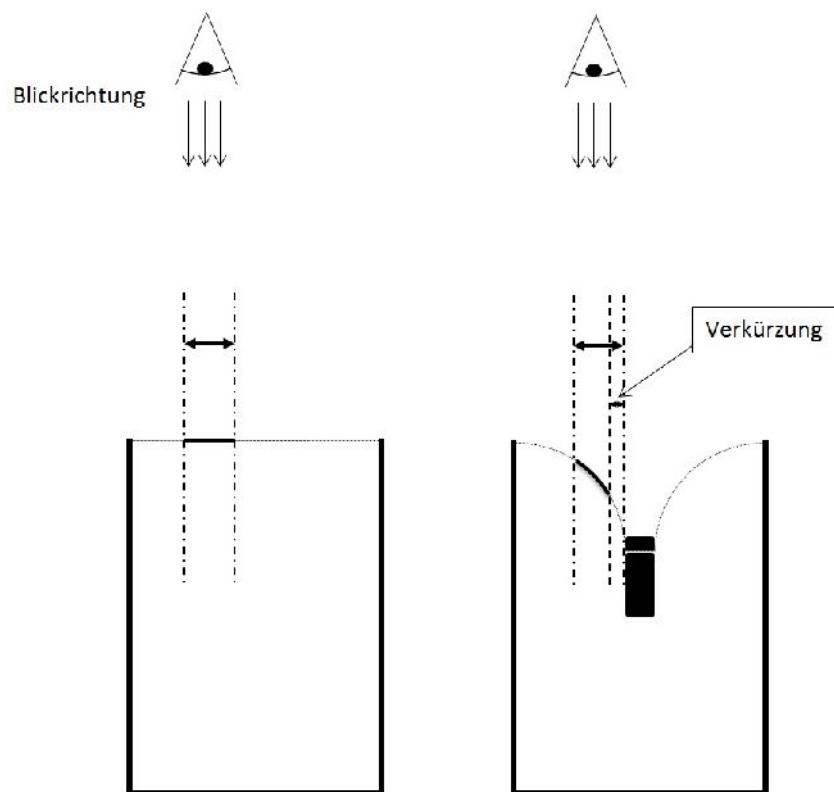


Abbildung 7.23.: Verkürzung durch Raumkrümmung

Dies kann mit dem oben dargestellten Experiment ansatzweise veranschaulicht werden (vgl. 7.24).

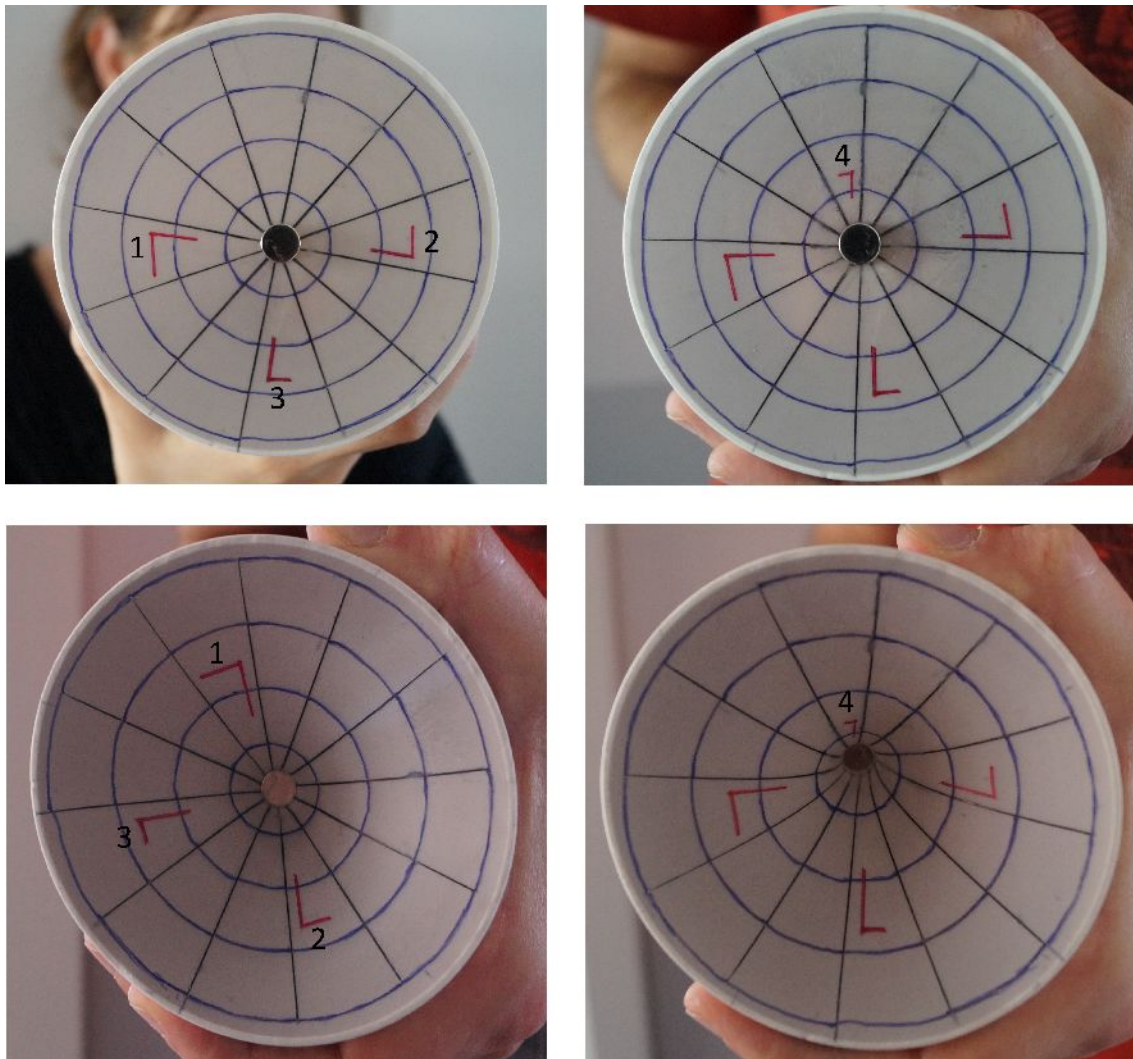


Abbildung 7.24.: Krümmungsexperiment

Folgendes ist beim Experiment zu beachten:

- Oben links im Bild ist die Gummihaut ungekrümmt und es wurden Maßstäbe von 1 (1cm zu 1cm), 2 (1cm zu 0,7cm) und 3 (1 zu 0,5cm) dargestellt. Unten links wird der Ballon nun gekrümmt und die Striche Richtung Mitte werden natürlich durch die Dehnung des Gummis länger. Leider scheint die Projektionslänge auch länger zu werden, was unserer Annahme widerspricht. Das Problem ist hierbei die zu kurze Entfernung zum Rohr. Wenn man den Abstand deutlich vergrößert, ist der Effekt aber aufgrund der großen Entfernung nicht mehr klar zu erkennen.
- Oben rechts im Bild ist das Tuch ungekrümmt und es wurde näher am Zentrum ein Maßstab 4 von (0,5cm zu 0,3cm) ergänzt. Unten links ist der Ballon nun

gekrümmt und man kann das eben dargestellte Problem etwas nivellieren. Beide Maßstäbe wirken aufgrund der Krümmung gleich lang.

Im Folgenden sollen nun erste mathematische Ansätze erarbeitet werden. Aus Anschauungsgründen ist es ratsam, zunächst ein zweidimensionales Koordinatensystem, indem die y -Achse die Zeit t darstellt und die x -Achse unsere Raumkoordinate repräsentiert, zu verwenden.

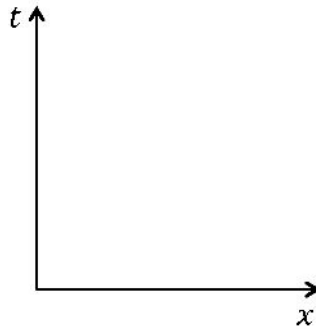


Abbildung 7.25.: Minkowski x - t -Diagramm

Nun sollen die Schülerinnen und Schüler überlegen, welche Aussagen sich über Geraden im (x, t) -Diagramm machen lassen. Zur Vereinheitlichung der Dimension wird die Zeitachse durch ct ersetzt. Auf die Hinzufügung der imaginären Einheit, wie im Minkowski-Diagramm ja eigentlich erforderlich, muss hier natürlich verzichtet werden. Entsprechend eingeschränkt sind die Möglichkeiten, korrekte Schlussfolgerungen zu ziehen. Somit können folgende Geraden im (x, ct) -Diagramm betrachtet werden:

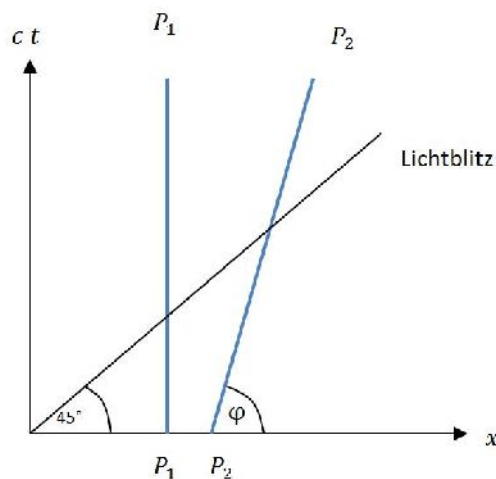


Abbildung 7.26.: Zweidimensionales Minkowski-Diagramm mit den Ereignissen P_1 und P_2

Der Punkt P_1 verändert seine Position bezüglich der x -Achse nicht, er beschreibt eine parallele Gerade zur ct -Achse. Somit bleibt er am selben Ort bei fortschreitender Zeit, es ist beispielsweise ein ruhender Gegenstand. Der Punkt P_2 beschreibt eine Gerade, die einen Winkel φ mit der x -Achse einschließt. Also ändert sich sowohl die Zeit, als auch der Ort des Punktes gleichmäßig. Er bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit. Ein Maß für die Geschwindigkeit ist der eingeschlossene Winkel (vgl. 7.26).

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{c \cdot t}{x} = \frac{c}{\frac{x}{t}} = \frac{c}{v} = \tan \varphi \quad (7.15)$$

Die maximal Geschwindigkeit ist durch die Lichtgeschwindigkeit c gegeben. Diese oben eingesetzt, liefert die Gerade eines Lichtblitzes / Lichtimpulses, der im Ursprung startet:

$$\begin{aligned} \tan \varphi &= \frac{c}{c} = 1 \\ \iff \varphi &= \arctan 1 = 45^\circ \end{aligned}$$

Um Verwechslungen mit Geraden aus der Mathematik zu vermeiden, sollten diese im Unterricht immer als Weltlinien bezeichnet werden, die Aussagen über Ort *und* Zeit machen. Sie beschreiben zeitliche Ausbreitung von Ereignissen beziehungsweise von Körpern, die sich in der Raumzeit aufhalten. Des Weiteren werden mit diesen Diagrammen die Feynman-Graphen, die im Rahmen des Austauschteilchenkonzeptes erscheinen, vorbereitet. Zum besseren Verständnis sollten die Schülerinnen und Schüler ein Minkowski-Diagramm zeichnen und verschiedene Ereignisse darstellen und interpretieren, darunter zur Vorbereitung auf die nächste Stunde auch unwirkliche Ereignisse mit $\varphi \geq 45^\circ$

Die Schülerinnen und Schüler bekommen ein Gefühl für die Verwebung von Raum und Zeit zur Raumzeit und verstehen erste geometrische Deutungen im Rahmen von Minkowski-Diagrammen.

2. Stunde

Es wird an die vorherige Stunde angeknüpft um sowohl das Verständnis als auch den Nutzen von Minkowski-Diagrammen zu vertiefen. Die KMK sowie viele Lehrpläne fordern als prozessbezogenen Kompetenz das „Verstehen von kausalen Zusammenhängen“. Dies bedeutet einen tieferen Einblick in das Gebiet der Wechselwirkungen, da hier die Kausalität von Ereignissen, beispielsweise beim Konzept der Austauschteilchen, ebenso wie beim Geometrisierungskonzept auf kausale Zusammenhänge fokussiert. Zur graphischen Interpretation der Kausalität von Ereignissen wird Bild 7.27 im Unterricht entwickelt. Zur Motivation kann zu Beginn eine Problemstellung konstruiert werden, bspw. ob die NASA (auf der Erde) ihre Astronauten auf dem Mond rechtzeitig vor einschlagenden Meteoriten warnen kann.

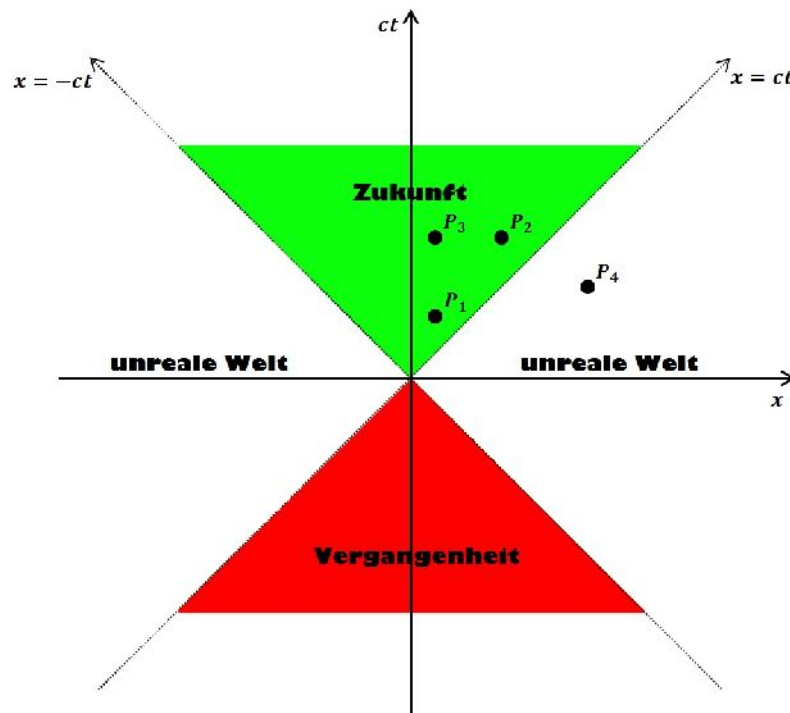


Abbildung 7.27.: Zweidimensionaler Minkowski-Kegel

Zunächst wird die Lichtgeschwindigkeit c nochmals als die obere Grenze in allen Naturvorgängen besprochen. Die Übertragung von Signalen zwischen zwei Raumzeit-Ereignissen mit Lichtimpulsen erfolgt im materiefreien Raum auf einer Geraden, die parallel zur $x = \pm ct$ Geraden verläuft (Wiederholung letzte Stunde). Diese Rekapitulation soll den Schülerinnen und Schülern erlauben Raumzeit-Ereignisse danach einzuteilen, ob sie ursächlich (kausal) mit einander verknüpft werden können oder nicht. Die gestrichelten Weltlinien der Lichtimpulse werden im Plenum dargestellt, weitere Einteilungen sollten die Lernenden, bspw. nach der Think-Pair-Share-Methode, selbst erarbeiten. Augenscheinlich wirkt die Klassifizierung einleuchtend, auch wenn sie vom Lehrer vorgegeben wird, aber für eine Verinnerlichung dieser Thematik reicht erfahrungsgemäß nicht, somit ist an dieser Stelle eine eigenständige Erarbeitung unabdingbar. Folgende Ergebnisse sollten erarbeitet werden.

- Raumzeitpunkte mit $(x > 0, t > 0)$ und $|x| \leq ct$ können vom Nullpunkt ausgehend an einer Kausalitätskette teilhaben (Punkte im grünen Dreieck).
- Raumzeitpunkte mit $(x < 0, t < 0)$ und $|x| \leq |ct|$ können Ausgangspunkt für eine Kausalitätskette zum Nullpunkt sein (Punkte im roten Dreieck).
- Raumzeitpunkte, die obige Eigenschaften nicht erfüllen, gibt es keine Ursache-Wirkung-Verbindung, sie sind zwar Teil der Realität, gehören aber Realitätsbereichen an, die keinen Einfluss aufeinander ausüben bzw. erst zu einem späteren Zeitpunkt Einfluss ausüben können (weiße Fläche).

Weitergehend sollen die Lernenden die Ereignisse P_1 , P_2 , P_3 und P_4 eigenständig in Verbindung setzen und Beispiele dafür finden, wodurch die sehr theoretische Darstellung mit einem schülernahen Alltagskontext verbunden wird und der Erkenntnisgewinn zusätzlich gestärkt wird.

Ein Beispiel aus dem Unterricht des Autors wäre, dass P_1 das Tätigen eines Anrufknopfes ist und P_2 das Klingeln des angerufenen Mobiltelefons.

Den Schülerinnen und Schülern sollte aber auch an dieser Stelle klar gemacht werden, dass bei Betrachtung eines dreidimensionalen Raumzeitdiagramms (x, y, ct) die einschließenden Geraden $x = \pm ct$ zu den Kegelflächen $x^2 + y^2 = (ct)^2$ würden (Minkowskischer Lichtkegel) und unsere reale Welt (x, y, z, ct) zu einem vierdimensionalen Gebilde, welches sich jeglicher Anschauung entzieht.

Die besprochene Variante in der Ebene reicht aber völlig aus, um den Schülerinnen und Schülern ein Gefühl für das Raumzeit-Kontinuum zu vermitteln. Es mindert auch nicht den Erkenntnisgewinn oder führt auch nicht zur Ablehnung, mit dem kleinen Hinweis auf die Kinematik, in der ebenso überwiegend eindimensionale Bewegungen betrachtet wurden.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen den physikalischen Rahmen innerhalb dessen sich kausale Zusammenhängen vollziehen können und können diese geometrisch in Minkowski-Diagrammen deuten.

3. Stunde

Das Geometrisierungskonzept wird nun weiter verfolgt und die Schülerinnen und Schüler sollen anschaulich geprägte Einblicke in die Minkowski-Geometrie erhalten. Es wurde mit Schülerinnen und Schülern erarbeitet, dass die Zeit als zusätzliche Koordinate neben die Raumkoordinate gesetzt werden kann. Diese Idee wird Hermann Minkowski zugeschrieben, der erkannte, dass man die Spezielle Relativitätstheorie in einen vierdimensionalen nichteuklidischen Raum betten kann. Diese Idee kann anhand eines Beispiels sehr gut veranschaulicht werden. Dazu ist es zunächst erforderlich mit den Schülerinnen und Schülern die Invarianz⁸⁸ zu thematisieren, wofür ein geometrisches Beispiel, nämlich die Länge eines Stabes gewählt sei. Wenn man einen Stab mitten ins Klassenzimmer legt und ihn von unterschiedlichen Orten des Klassenzimmers oder aus unterschiedlichen Winkeln betrachtet, ändert sich seine Länge offensichtlich nicht. Diese Eigenschaft ist nun mathematisch zu fassen. Unsere Augen entsprechen dem Koordinatenursprung, womit der Wechsel von Beobachtungsorten / Blickwinkeln zu Translationen / Rotationen von Bezugssystemen wird.

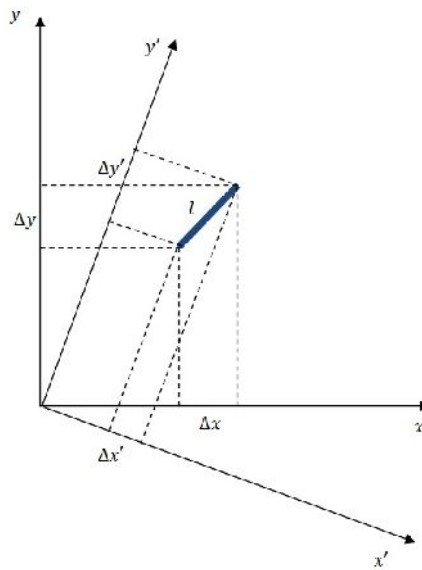


Abbildung 7.28.: Invarianz der Länge in unterschiedlichen Bezugssystemen

Der Stab wird aus zwei zueinander gedrehten Koordinatensystemen betrachtet. Mit den Projektionen des Stabes auf die jeweiligen Achsen kann wie gewohnt mittels des Satzes von Pythagoras die Länge l des Stabes bestimmt werden:

$$l^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2$$

$$\Leftrightarrow l = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$$

⁸⁸Die Invarianz sollte kurz als weiteres Prinzip in der Physik angesprochen werden.

aber l ist auch gegeben durch:

$$\begin{aligned} l^2 &= (\Delta x')^2 + (\Delta y')^2 \\ \Leftrightarrow \quad l &= \sqrt{(\Delta x')^2 + (\Delta y')^2} \end{aligned}$$

Somit hat man auch mathematisch die Invarianz von Längen unter Drehungen erfasst⁸⁹. Diese Tatsache ermöglicht es, von der Länge einer Strecke zu sprechen, ohne jedesmal angeben zu müssen, in Bezug auf welches Koordinatensystem diese Angabe gemacht wird. Die Projektionen Δx und Δy der Strecke hängen von der Wahl des Koordinatensystems ab und haben in jedem System verschiedene Werte, sie sind also relativ (vgl. [SEX79, 111]). Ein Sonderfall ist ein System, in dem die y' -Achse parallel zum Stab ist. Hier wäre $\Delta x' = 0$ und man könnte die Länge direkt an der y' -Achse über $l = \Delta y'$ ablesen.

Dieser Spezialfall wird nun genauer in einem zweidimensionalen Minkowski-Diagramm betrachtet. Die Stablänge wird in diesem Diagramm zu einem Raumzeit-Abstand zwischen zwei Ereignissen, beispielsweise die Verbindungslinie in Abbildung 7.27 von P_1 nach P_2 . Diese beiden Ereignisse werden aus zwei verschiedenen Inertialsystemen betrachtet, dem ruhenden Inertialsystem I und dem dazu mit konstanter Geschwindigkeit v bewegten Inertialsystem I' . Auch dieser Raumzeit-Abstand ist invariant gegenüber Translation und Rotation, was aus der Lorentzinvarianz folgt, die den Schülerinnen und Schülern aus der Behandlung der Speziellen Relativitätstheorie bekannt ist.

Die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit muss in jedem Inertialsystem denselben Wert haben oder besser gesagt, egal in welchem Inertialsystem (bewegt oder nicht) ein Beobachter die Lichtgeschwindigkeit misst, erhält er denselben Wert. Da ein Lichtblitz immer durch die Winkelhalbierende gegeben ist (vgl. 7.27), sind die Achsen von zueinander bewegten Inertialsystemen zur Winkelhalbierenden hin um den Winkel φ gedreht (siehe 7.29).

⁸⁹Eine Betrachtung der Invarianz unter Translationen ist offensichtlich und bedarf keiner Veranschaulichung.

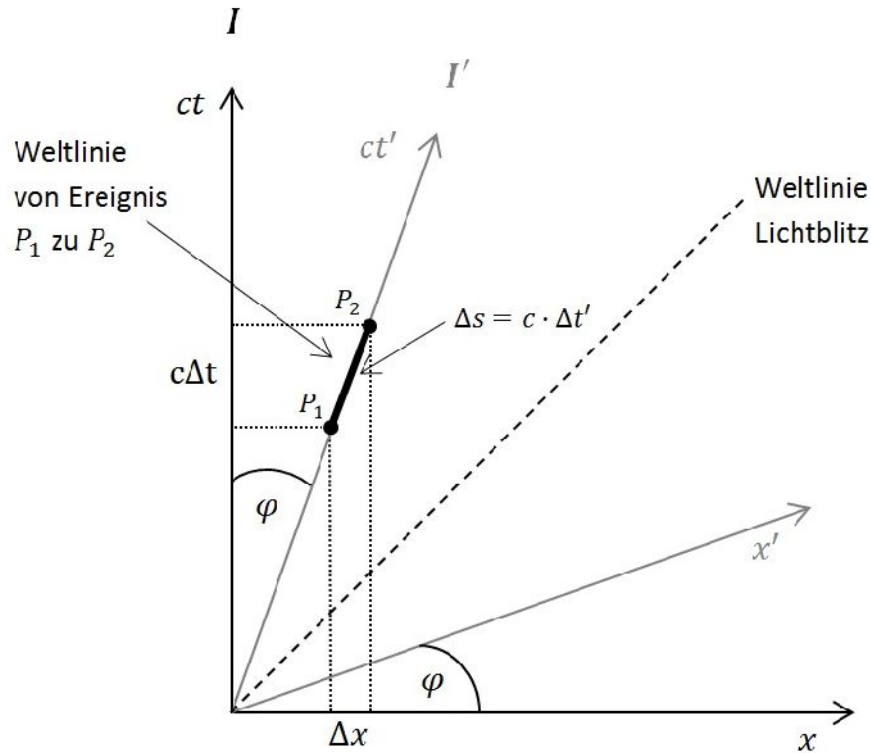


Abbildung 7.29.: Länge einer Weltlinie zwischen zwei Ereignissen

Das Inertialsystem I' soll dem oben erwähnten Spezialfall genügen: Die ct' -Achse sei parallel oder hier sogar auf der Raumzeit-Strecke $\overline{P_1 P_2}$. Die Länge dieser Weltlinie lässt sich nun einfach auf der ct' -Achse ablesen, sie entspricht somit der vergangenen Zeit Δt und es gilt:

$$\Delta s \hat{=} \Delta t' \quad (7.16)$$

Ebenso wie ein Metermaß ein Streckenmesser ist, kann man hier eine Uhr als „Weltlinienmesser“ auffassen [SEX79, 112].

Die Länge, also die vergangene Zeit, lässt sich nun recht einfach mit Hilfe der bekannten Zeitdilatation folgendermaßen bestimmen:

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \frac{1}{\gamma} = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (7.17)$$

Die Zeitdifferenzen Δt beziehungsweise $\Delta t'$ sind die vergangenen Zeiten zwischen den Punkten P_1 und P_2 in den Inertialsystemen I beziehungsweise I' . Damit die Schülerinnen und Schüler aktiv eingebunden werden, sollen sie die nächsten Schritte selbst unternehmen. Dazu erhalten sie folgende Hinweise:

- Δt in die Wurzel ziehen.

- Gleichung mit c multiplizieren und in die Wurzel ziehen.
- bekannte Gesetzmäßigkeit $s = v \cdot t$ bzw $x = v \cdot t$ benutzen.

Die Lehrperson kann währenddessen hilfreich zur Seite stehen. Der Verzicht auf einen Lehrervortrag hat das Ziel, die mathematischen Kompetenzen der Lernenden zu fördern und somit zusätzlich die Motivation der anschließenden Interpretation der eigens hergeleiteten Formel zu steigern.

Folgenden Schritte erhalten die Lernenden:

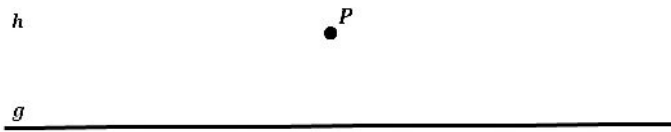
$$\begin{aligned}
 \Delta t' &= \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \\
 \Leftrightarrow \Delta t' &= \sqrt{\Delta t^2 - \Delta t^2 \frac{v^2}{c^2}} \\
 \Leftrightarrow c\Delta t' &= c \cdot \sqrt{\Delta t^2 - \Delta t^2 \frac{v^2}{c^2}} \\
 \Leftrightarrow c\Delta t' &= \sqrt{c^2 \Delta t^2 - \Delta t^2 v^2} \\
 \Leftrightarrow c\Delta t' &= \sqrt{(c\Delta t)^2 - (\Delta t v)^2} \\
 \Leftrightarrow c\Delta t' &= \sqrt{(c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2}
 \end{aligned}$$

Zusammengefasst erhält man:

$$\overline{P_1 P_2} = c\Delta t' = \sqrt{(c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2} \quad (7.18)$$

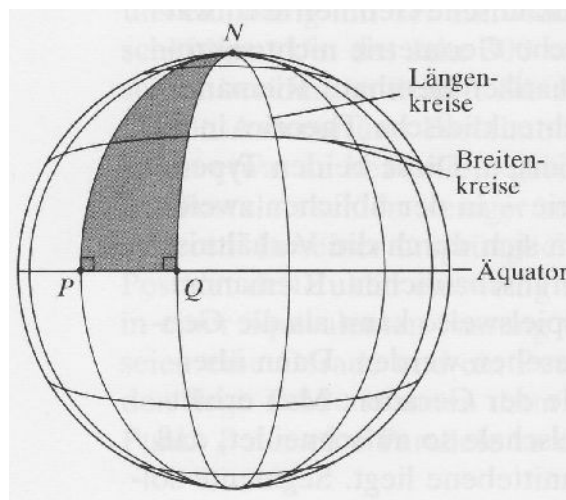
Den Unterschied zur pythagoreischen Formel wird von den Schülerinnen und Schülern in dem Minuszeichen zwischen den Projektionen erkannt, wird aber zunächst eher als Fehler abgetan, statt es als Besonderheit der Raumzeit anzusehen. Erwähnenswert ist, dass oft die Größe ict statt ct auf der Ordinatenachse verwendet wird. Dadurch wird bei der Quadratur die Größe mit einem Minuszeichen versehen, wodurch die Lorentzinvarianz erfüllt ist.

Damit die Schülerinnen und Schüler diesen anderen metrischen Ausdruck besser annehmen, kann gegen Ende oder auch während der Stunde kurz eine mögliche Veranschaulichung bspw. einer nicht-euklidischen Geometrie von der Lehrperson gemacht werden. Dabei wird zunächst das Parallelenaxiom nach Euklid dargestellt, welches für alle Schülerinnen und Schülern sofort ersichtlich ist.



Abbildungung 7.30.: Darstellung des Parallelenaxioms nach Euklid. Wenn man eine Gerade g und einen beliebigen Punkt $P \notin g$ betrachtet, gibt es zu g genau eine Parallele, die durch P läuft. Diese beiden Geraden werden sich in der euklidischen Geometrie niemals berühren.

Dies wird verglichen mit der nicht-euklidischen Geometrie einer Kugeloberfläche. Als Beispiel werden die Längen- und Breitenkreise der Erde benutzt.



Abbildungung 7.31.: Eingeteilte Erdoberfläche: Die Längenskreise entsprechen den Geraden der euklidischen Geometrie und stellen Großkreise dar. Unter den Breitenkreisen findet man nur einen Großkreis, den Äquator. Bei Betrachtung der Strecken $\overline{PN}$ und $\overline{QN}$ fällt auf, dass sie beide senkrecht auf dem Äquator stehen - parallel sein müssen - aber dass sie sich am Norpol im Punkt N schneiden. $\Rightarrow$ nicht euklidisch [HOF88, 176]

Somit ist für alle Schülerinnen und Schüler anschaulich und leicht verständlich gezeigt, dass die euklidische Geometrie auf gekrümmten Flächen ihre Gültigkeit verliert und es neben dieser (Schul)-Geometrie auch andere gibt, bei denen bspw. wie oben gezeigt die Längenberechnung durch einen modifizierten pythagoräischen Lehrsatz funktioniert.

Folgend sollte der Begriff Metrik behandelt werden, um den Schülerinnen und Schülern auch das Verständnis hinter der neuen Erkenntnis zu ermöglichen. Hierzu kann aus Zeitgründen hervorragend eine Internetrecherche als Hausaufgabe dienen.

Die Schülerinnen und Schüler verinnerlichen den Begriff der Invarianz und verstehen Grundzüge der Minkowski-Geometrie.

4. Stunde

In der Hausaufgabe wurde der Begriff der Metrik von den Lernenden erarbeitet. Nun sollten zur Wiederholung die bekannten Metriken an der Tafel nochmals deutlich festgehalten werden. Die Schülerinnen und Schüler finden zu dem Begriff Metrik sehr viel im Internet und vieles davon ist zu komplex, gerade in den verwendenden unbekannten mathematischen Schreibweisen. Aus Elementarisierungsgründen reicht hierbei völlig, dass die Metrik den Abstand zwischen zwei Punkten angibt. Als schülernahes Anschauungsobjekt sei der Satz des Pythagoras als Metrik im flachen⁹⁰ dreidimensionalen Koordinatensystem herausgestellt.

- **Euklidische Metrik** (räumlich $\mathbb{R}^3$)

$$d(x, y, z) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (7.19)$$

bzw.

$$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 \quad (7.20)$$

Invariant gegenüber Galilei-Transformation, aber nicht bei Lorentz-Transformationen

- **Minkowski Metrik** (in der Raumzeit)
Erweiterung von 7.18 um eine Dimensionen ($\mathbb{R}^3 + \text{Zeit}$)

$$(\Delta s)^2 = c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2 \quad (7.21)$$

Somit sind die ersten mathematischen Vorbereitungen getroffen und die Spezielle Relativitätstheorie mit der einhergehenden Aufstellung der vierdimensionalen Raumzeit wiederholt und vertieft worden.

Als Nächstes sollen die Beweggründe Einsteins zur Aufstellung einer Allgemeinen Relativitätstheorie aufgezeigt werden. Dieser Weg gibt zum einen den historisch-genetischen Werdegang wieder und zum anderen lockert es die Unterrichtsreihe etwas auf, da nun die Mathematik kurz in den Hintergrund rückt. So können jetzt auch gerade die mathematisch Leistungsschwächeren wieder voll im Unterrichtsgeschehen eingreifen und gut Beiträge liefern. Insgesamt wird durch diesen „Groß-Methodenwechsel“ eine Motivationsauflebung bei den Lernenden erzielt.

Der erste Ansatzpunkt kann aus Zeitgründen ein kleiner Lehrervortrag sein:

In der Speziellen Relativitätstheorie wurde gezeigt, dass gleichförmige Bewegungen relativ zueinander sind. Man kann nicht unterscheiden, ob man in einem mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Zug oder in einem ruhenden sitzt. Wie sieht es aber mit beschleunigten Systemen

⁹⁰Dieser Begriff mit Hinweis auf die Kugeloberfläche der letzten Stunde

aus? Sind nur gleichförmige Bewegungen relativ? Diese Fragen stellte sich auch Albert Einstein. Er hielt ein Relativitätsprinzip, das sich auf gleichförmig bewegte Inertialsysteme beschränkte, für zu speziell. Er suchte die Einfachheit in der Natur. Sein Problem an dieser Stelle ist gut nachvollziehbar, wenn man sich einen beschleunigten Zug vorstellt. In einem ruhenden Zug oder in einem mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Zug spürt der Insasse keine Trägheitswirkung. Während des Überganges vom ruhenden zum bewegten Zustand findet jedoch eine Beschleunigung statt, die man als Mitfahrer sehr wohl merkt. Aber warum soll der eine Zustand feststellbar sein und die beiden anderen nicht?

Aus diesem Grund postulierte Einstein sein Allgemeines Relativitätsprinzip:

Die Gesetze der Physik müssen so beschaffen sein, daß sie in Bezug auf beliebig bewegte Bezugssysteme gelten. [EIN16]

Klarstellung im Plenum: Vorher war das Relativitätsprinzip auf sich zueinander *gleichförmig* bewegte Bezugssysteme beschränkt.

Ein weiterer Ankerpunkt, der sich aus dieser Aussage ergibt, ist die Verknüpfung von der Speziellen Relativitätstheorie und der Gravitation. Warum diese Bindung äußerst hilfreich ist, sollten die Schülerinnen und Schüler eigenständig überlegen. Im Plenum wird herausgestellt, dass die Gravitation allgegenwärtig ist und immer eine Beschleunigung in Richtung eines Massenzentrums hervorruft. Wenn nun eine Verknüpfung gelänge zwischen Spezieller Relativitätstheorie und Gravitation, hätte man das Ziel einer Allgemeinen Relativitätstheorie, die beschleunigte Bewegungen beinhaltet, vielleicht erreicht.

Neben dem Relativitätsprinzip nimmt Albert Einstein die Äquivalenz von träger und schwerer Masse an. Dieses Prinzip sollte aus der Behandlung der Newtonschen Axiome in der Einführungsphase (Klasse 11) bekannt sein und bedarf wahrscheinlich nur einer kleinen Wiederholung.

Am Ende der Stunde stehen die beiden grundlegenden Prinzipien, auf die sich die Allgemeine Relativitätstheorie stützt, an der Tafel, dass *Allgemeine Relativitätsprinzip* und das *Äquivalenzprinzip*.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen den vereinfachten Begriff der Metrik und können die Beweggründe zur Allgemeinen Relativitätstheorie mit den grundlegenden Prinzipien erfassen.

5. und 6. Stunde

Die bisherigen Stunden, waren immer recht lehrerzentriert, deshalb werden die folgenden Ideen Einsteins mithilfe von Lesetexten von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet. Dazu werden diese in acht Gruppen aufgeteilt und vier unterschiedliche Materialien verteilt. Anschließend werden die Ergebnisse im Plenum vorgestellt, wobei das Los entscheidet, welche Gruppen vortragen. Auf den jeweiligen Arbeitsblättern (s.A. A.3) werden Gedankenexperimente nach Einstein vorgestellt. Dabei wird immer ein kleines Labor betrachtet, welches fernab jeglicher gravitativer Einflüsse im All mit $a = g$ beschleunigt wird - das Himmelslabor - und daneben ein äquivalentes Labor auf der Erdoberfläche - das Erdlabor. Die Begründung zur Forderung eines kleinen Laboratoriums sollten die Schülerinnen und Schüler selbst erbringen, es wird zur Verdeutlichung kurz an der Tafel skizziert.

1. Fallende Körper im Himmels- und Erdlabor

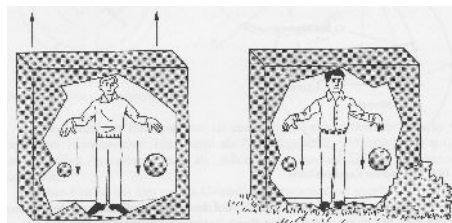


Abbildung 7.32.: Gedankenexperiment zu fallenden Körpern. Links im Himmelslabor, rechts im Erdlabor [KUH01b, 387]

2. Schwerelosigkeit im Himmelslabor und im frei fallenden Erdlabor

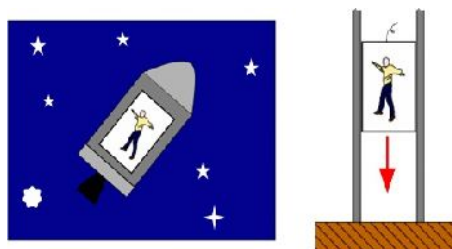


Abbildung 7.33.: Gedankenexperiment zur Schwerelosigkeit. Links im Himmelslabor, rechts im Erdlabor [EIN14]

Nach der Präsentation wird zur Veranschaulichung ein Demonstrationsexperiment gezeigt. Dabei wird eine Plastikflasche unten angebohrt, sodass Flüssigkeit aus den Löchern ausfließen kann. Füllt man die Flasche und hält sie in die Höhe, so sieht man die Flüssigkeit ausfließen. Lässt man die Flasche fallen, so tritt während des Fallens keine Flüssigkeit aus den Löchern aus.

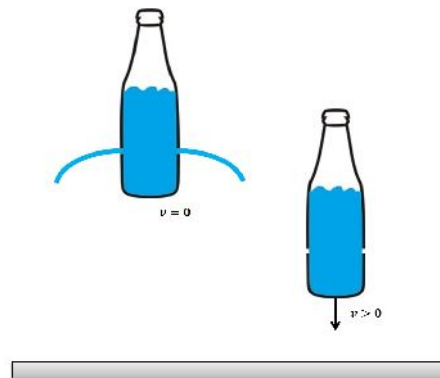


Abbildung 7.34.: Fallende Flasche. Innerhalb eines frei fallenden System (Flasche) wirkt keine Gravitation. Das Wasser ist schwerelos.

3. Laufzeitvergleich von Uhren im Himmels- und Erdlabor

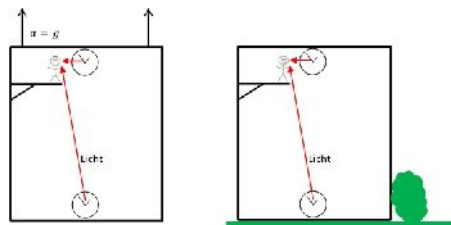


Abbildung 7.35.: Gedankenexperiment zur Rotverschiebung. Links im Himmelslabor, rechts im Erdlabor.

4. Lichtablenkung im Himmels- und Erdlabor

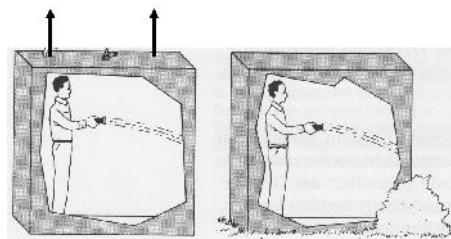


Abbildung 7.36.: Gedankenexperiment zur Lichtablenkung. Links im Himmelslabor, rechts im Erdlabor [KUH01b, 389].

Am Ende jeder Vorstellung sollen die Schülerinnen und Schüler überlegen, wo bei den dargestellten Gedankenexperimenten die zwei grundlegenden Prinzipien genutzt werden. Damit wird der Charakter von Prinzipien weiter verdeutlicht und auch die Kenntnis zur Physik als Prinzipienwissenschaft gestärkt, vielmehr wird auch weiter eingeübt, Prinzipien als Denkwerkzeuge zu nutzen. Nach der Präsentationsphase

werden die Experimente, die Lichtablenkung während der Sonnenfinsternis 1919, dass *Pound-Rebka-Experiment* in den 60er Jahren zur Rotverschiebung und das *Hafele-Keating-Experiment* anfang der 70er Jahre zur Laufzeitverlängerung von der Lehrperson vorgestellt. Mit der nochmaligen Auseinandersetzung mit den Gedankenexperimenten mit den zugehörigen experimentellen Befunden werden die grundlegenden Effekte tiefergehend in den Horizont der Lernenden gerückt. Je nach Zeit oder Lerngruppe können die Experimente auch im Rahmen von Schülerreferaten vorgestellt werden. Hiermit können sich besonders intrinsisch Motivierte tiefergehend mit der Thematik auseinandersetzen oder Leistungsschwächeren wird eine zusätzliche Verbesserungschance gegeben.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen die Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie anhand von Gedankenexperimenten und beurteilen sie im Rahmen der zugrundeliegenden Prinzipien sowie in deren experimenteller Bestätigung.

7. und 8. Stunde

Nach einer kleinen Wiederholung bzw. dem Hören der vorgeschlagenen Referate der letzten Stunde sollen in diesen beiden Stunden kleine Herleitungen und Berechnungen von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet werden.

Da sie auf den Arbeitsblättern vorkommt, sollte kurz die Fluchtgeschwindigkeit $v_F = \sqrt{\frac{2\gamma M}{R}}$ eines Himmelskörpers thematisiert werden und daraus der Rückschluss auf ein schwarzes Loch - mit dem Schwarzschild-Radius - gezogen werden. Die Ausführlichkeit richtet sich nach den schulischen Vorkenntnissen, aber auch bei einigen Wissenslücken der Schülerinnen und Schülern bedarf eine adäquate Bearbeitung im Rahmen eines Lehrervortrags nur rund 10 Minuten.

Weniger Beachtung können in diesem Rahmen hingegen genaue quantitative Analysen der Effekte aus der letzten Stunde finden. Demzufolge zielen die Arbeitsaufträge meistens auf das Feststellen von Größenordnungen ab, ohne jedoch den Bezug zur Wissenschaft und zu Theorieergebnissen zu verlieren.

Es werden jeweils die schon bekannten Gedankenexperimente kurz dargestellt und mit zusätzlichen Informationen, die zur Berechnung benötigt werden, versehen. Durch die Mischung aus Bekanntem und Neuem sind alle Lernenden kognitiv in der Lage, die Herleitungen zu verstehen. Die mathematischen Schritte und Näherungen sind zum Teil relativ ausführlich dargestellt, sodass mehr oder minder nur nachvollzogen werden muss. In den anschließenden Bearbeitungsaufgaben sollen aber die komplexen mathematischen Umformungen Schritt für Schritt nachgerechnet werden, um zu gewährleisten, dass die Schülerinnen und Schüler nicht nur die letztendliche Formel betrachten, sondern auch deren Entwicklung verstehen.

Der Kurs wird wieder in Gruppen aufgeteilt, sodass fünf verschiedene Arbeitsaufträge adäquat bearbeitet und später präsentiert werden können.

Folgende Aufträge werden gestellt, die zugehörigen Arbeitsblätter sind im Anhang (vgl. A.3) zu finden:

1. Die Gravitations-Rotverschiebung im Rahmen kleiner Längeneinheiten mithilfe eines Fahrstuhl-Gedankenexperiments.

Benötigte Zusammenhänge (auf AB dargestellt):

- Dopplergleichung: $\lambda_E = \lambda_S \cdot \sqrt{\frac{1+\frac{v}{c}}{1-\frac{v}{c}}}$
- Näherung: $\frac{1}{1-x} \approx 1+x$ für kleine x
- Maßzahl: $z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S}$

Ergebnis: Die Maßzahl $z = \frac{gh}{c^2}$

2. Die Gravitations-Rotverschiebung mit astronomischen Längeneinheiten.

Benötigte Zusammenhänge (auf AB dargestellt):

- Gravitationsgesetz: $F = \gamma \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$
- Energie-Masse-Beziehung: $E = mc^2$
- Schwarzschildradius: $R_S = \frac{2 \cdot \gamma \cdot M}{c^2}$
- Maßzahl: $z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S}$
- Näherung: $\frac{1}{1-x} \approx 1+x$ für kleine x

Ergebnis: Die Maßzahl $z = \frac{R_S}{2R} = \frac{\gamma M}{Rc^2}$

Mit nochmaliger Näherung kann auch das exakte Ergebnis der Allgemeinen Relativitätstheorie den Schülerinnen und Schülern genannt werden.

$$z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R_S}{R}}} - 1$$

3. Die Gravitations-Zeitdilatation im Gedankenexperiment mithilfe zweier Uhren in unterschiedlichen Höhen plus einer Vergleichsuhr.

Benötigte Zusammenhänge (auf AB dargestellt):

- Maßzahl: $z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S}$
- Ergebnis Blatt 1: $z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{gh}{c^2}$

Ergebnis: Für kleine Zeitintervalle $T_E = \left(\frac{gh}{c^2} + 1\right) \cdot T_S$ und für astronomische Zeitintervalle $T_E = \left(\frac{R_S}{2R} + 1\right) \cdot T_S$

4. Die Gravitations-Lichtablenkung am Rand unserer Sonne.

Benötigte Zusammenhänge (auf AB dargestellt):

- Wurfparabel: $y = \frac{1}{2}g\frac{x^2}{v^2}$
- Gravitationsgesetz: $F = \gamma \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$

- Kleinwinkelnäherung: $\tan(\alpha) \approx \alpha$ für kleine α

Ergebnis: Ablenkungswinkel: $\alpha = \frac{2\gamma M}{c^2 R}$

Später kann den Schülerinnen und Schülern das exakte Ergebnis (Einschließung der Raumzeit-Krümmung), das um den Faktor 2 größer ist, genannt werden.

5. Die Gravitations-Längenkontraktion: Mathematische Herleitung sehr schwierig, daher wird sie qualitativ behandelt und angenommen, dass der Kontraktionsfaktor dem Dilatationsfaktor entspricht. Probleme seitens der Schülerinnen und Schüler ergeben sich hierbei nicht, da sie die Allgemeingültigkeit von Faktoren aus der SRT kennen.⁹¹

Ergebnis: Längenkontraktion $L = \left(1 - \frac{\gamma M}{Rc^2}\right) \cdot L_0$

bzw. (ohne Näherung) $L = \sqrt{1 - \frac{R_S}{R}} \cdot L_0$

Bei der Präsentation der Gruppenergebnisse ist auf die Reihenfolge zu achten. Gruppe eins zeigt ein Ergebnis, das Gruppe zwei als Voraussetzung braucht, bzw. Gruppe fünf braucht den Dilatationsfaktor von Gruppe drei. Für die vorherige Bearbeitung ist dies nicht relevant, hier wird dies als gegeben vorausgesetzt, aber die Präsentation sollte durch Einhaltung der Reihenfolge in sich schlüssig sein und somit ein didaktisch rundes Ergebnis liefern.

Die Schülerinnen und Schüler sollen die Größenordnungen der allgemein relativistischen Effekte erkennen und diese angeleitet mithilfe der Newtonschen Theorie herleiten können.

9. Stunde

In dieser Stunde geht es um die mögliche geometrische Vorstellung der eben genannten Effekte. Dazu wird auf folgende Abbildung zurückgegriffen:

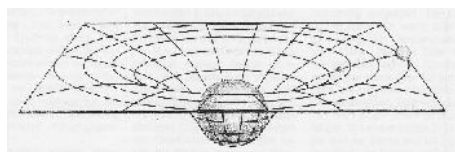


Abbildung 7.37.: Raumzeit nach Einstein [WIN07, 17]

und im Plenum mögliche Folgen dieser Darstellung diskutiert. Man selbst sollte hierbei in den Hintergrund treten, damit die Schülerinnen und Schüler ihre eigenen Geometrisierungsvorstellungen erklären können. Dabei werden immer sehr interessante

⁹¹Aufgrund der fehlenden mathematischen Herleitung kann dieses Themengebiet von leistungsschwächeren Schülerinnen und Schülern bearbeitet werden.

Aspekte genannt.

Am Anfang der Unterrichtsreihe wurde besprochen, dass man sich die Raumzeit, in der wir leben, als einen vierdimensionalen Raum vorstellen kann. Zur Veranschaulichung lässt man eine Raumkoordinate weg und gibt den dreidimensionalen Raum als zweidimensionale Fläche wieder. Die Gravitation wird nun in der Allgemeinen Relativitätstheorie anhand einer Raumzeit-Krümmung beschrieben, wobei die Krümmung die Gravitation repräsentiert. Zur Veranschaulichung der Gravitation kann man nun die dritte Dimension benutzen. Die Schülerinnen und Schüler wissen, dass die Stärke der Gravitation proportional zur Masse ist und somit eine größere Masse in der geometrischen Veranschaulichung einer stärkeren Krümmung entspricht (tieferer Trichter). Sehr wichtig für das Verständnis ist, dass die Schülerinnen und Schüler die Gravitation nicht als Ursache der Krümmung verstehen, sondern erkennen, dass die Gravitation die Krümmung selbst ist. Die Gravitation tritt demnach nicht - wie in Newtons Verständnis - als Kraft auf, denn sie ist eine Folge der Geometrie unserer Raumzeit.

Die Planeten in unserem Sonnensystem werden nicht direkt von der Sonne angezogen, vielmehr drehen sie sich in dem von der Sonne verursachten "Trichter". Wo sie sich im Trichter drehen, hängt von der Masse und ihrer Geschwindigkeit ab. Eine gute Veranschaulichung bietet folgender Versuch:



Abbildung 7.38.: Schematischer Gravitationstrichter

- Die große Kugel in der Mitte repräsentiert die Sonne.
- Der Trichter steht für die Krümmung der Raumzeit.
- Die kleinen Kugeln sind Planeten unseres Sonnensystems.
- Die Drehgeschwindigkeit des Akkuschaubers stellt die Geschwindigkeit der Planeten dar.

Nun können drei unterschiedliche Aspekte betrachtet werden.

1. Man legt nur die „Sonne“ in den Mittelpunkt und wirft eine kleine Kugel bei niedriger Drehzahl des Akkuschraubers in den Trichter. Bei dieser kleinen Geschwindigkeit rollt die Kugel sehr schnell in Richtung Mitte. Vergleichbar mit schnellen Kometen, die in der Sonne einschlagen.
2. Bei mittlerer Geschwindigkeit beschreibt die kleine Kugel eine Kreisbewegung auf dem Trichter. Je nach Wahl der Masse beziehungsweise Größe der Kugel und Drehgeschwindigkeit ergeben sich unterschiedliche Höhen im Trichter der Kreisbewegungen. Vergleichbar mit den Umlaufbahnen unserer Planeten
3. Bei sehr hoher Geschwindigkeit beschreibt die Kugel nur einen kleinen Bogen im Trichter bis sie herausgeschleudert wird. Vergleichbar mit schnellen Asteroiden die nur kurz in unser Sonnensystem eintreten.

Der Verfasser hat sich an dieser Stelle für dieses Experiment und gegen das „Gummituch“ entschieden, da die nötigen Utensilien einfacher zu beschaffen sind und sich durch das Gummituch seitens der Schülerinnen und Schüler oft folgende Frage entwickelt:

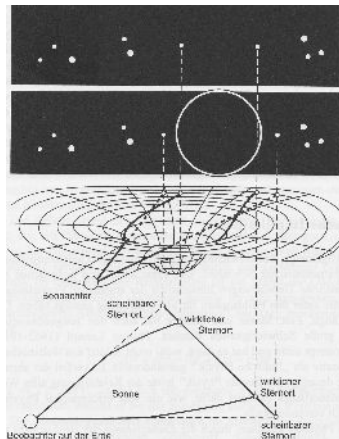
Massereiche Objekte krümmen das Raumzeit-Tuch, weil sie nach unten gezogen werden durch ... was?

Diese Frage wird schon dadurch suggeriert, da in diesem Modell das Tuch durch das aufliegende Gewicht (Schwerkraft) nach unten gekrümmt wird, aber die Krümmung eigentlich die gravitative Wechselwirkung repräsentieren soll. Es muss den Lernenden schnell klar gemacht werden, dass es keine adäquate Veranschaulichung gibt und ggf. weitere Modelle aus der Physik nennen, die auch Schwierigkeiten bei manchen Erklärungen aufweisen (bspw. Bohrsches Atommodell, etc.).

Die in den Gedankenexperimenten besprochenen Effekte können im Rahmen der geometrischen Vorstellung folgendermaßen besprochen werden. Die Erarbeitung erfolgt in einem fragend-entwickelnden-Unterrichtsgespräch mit passenden Lehrerimpulsen. Eine selbstständige Erarbeitung durch die Schülerinnen und Schüler ist für sie kognitiv sehr schwierig und manche Fehldeutungen geraten oft zu Misskonzepten, um diesem vorzubeugen und Zeit zu sparen ist dieser Unterrichtsschritt sehr lehrerzentriert gehalten.

Die Phänomene können aber gut mit den unter 3.4.3 dargestellten Computerprogrammen unterstützt werden, da bewegte Animationen die Vorstellungskraft der Schülerinnen und Schüler wesentlich besser fördern als einfache (ruhende) Graphiken.

Die *gravitative Rotverschiebung* geschieht infolge des Durchquerens von Licht entgegen einer wirkenden Beschleunigung. Geometrisch kann man sich dies so vorstellen, dass das von der Sonne ausgesandte Licht die Krümmung des Trichters überwinden



Für uns als Menschen ist es unglaublich schwierig, die Krümmung der Erde nachzuvollziehen. Wenn wir nicht irgendwo gelernt hätten, dass die Erde annähernd eine Kugel ist, würde uns dies nur schwerlich auffallen. Wir würden eher nach unserer täglichen Erfahrungswelt davon ausgehen, dass die Erde eine Scheibe ist. Für eine Ameise wäre diese Vorstellung noch schwieriger nachzuvollziehen. Aus diesem Grund können wir uns auch nicht leicht überlegen, ob unser dreidimensionaler Raum genau gerade ist oder ob er eine Krümmung hat.⁹³

Die Schülerinnen und Schüler können die besprochenen Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie ikonisch geometrisch deuten.

10. Stunde

In dieser Stunde sollen die Schülerinnen und Schüler einen mathematischen Einblick in die Allgemeine Relativitätstheorie bekommen. Die bisherigen Rechnungen zielten nur auf die Bestimmung von Größenordnungen ab und geschahen in einer krümmungslosen, flachen Raumzeit. In der bisher erlangten geometrischen Modellvorstellung haben die Lernenden aber gesehen, dass sich Körper oder Licht auf einer dreidimensional gekrümmten Fläche bewegen. In der Raumzeit gibt es eine vierdimensionale Krümmung. Bevor man Bewegungen in dieser Modellvorstellung berechnen kann, muss man erst einmal die Geometrie dieser mathematisch beschreiben. Bewegungen sind durch Start und Endpunkt bzw. Zwischenpunkte charakterisiert. Zur Beschreibung dessen muss der Abstand zwischen beliebigen Punkten bestimmt werden können. Diesen Abstand haben die Schülerinnen und Schüler schon unter dem Begriff der Metrik in der 4. Stunde kennen gelernt. Nun soll dieser in den mathematischen Apparat der Allgemeinen Relativitätstheorie überführt werden.

Um den Lernenden einen einfachen Einstieg zu ermöglichen, startet man am besten mit dem Abstand auf der Ebene.

In unserem zweidimensionalen kartesischen Koordinatensystem, welches der euklidischen Metrik unterliegt, wird $d(x, y)$ mit dem Satz des Pythagoras berechnet:

$$d(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (7.22)$$

Für Rechnungen mit komplizierteren Metriken bedarf es metrischer Tensoren, im Prinzip Matrizen. Der obige Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten $P_1(x, y)$ und $P_2(x + dx, y + dy)$ kann folgendermaßen dargestellt werden:

⁹³Einen Anstoß für diese Idee hat der Autor durch [WAL89, 66] bekommen.

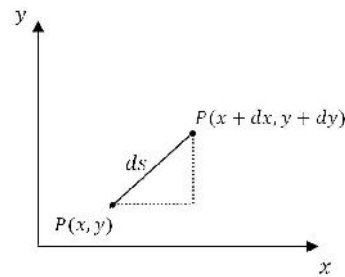


Abbildung 7.40.: Abstand im kartesischen Koordinatensystem

Für den Abstand ds gilt:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \quad (7.23)$$

Diese Gleichung lässt sich äquivalent umformen zu:

$$ds^2 = 1 \cdot dx^2 + 1 \cdot dy^2 + 0 \cdot dx dy + 0 \cdot dy dx \quad (7.24)$$

Grund hierfür ist, dass die Nullen und Einsen bzw. die Koeffizienten gerade den Komponenten des metrischen Tensor entsprechen. Allgemein ausgedrückt könnte man es auch so

$$ds^2 = g_{11}dx^2 + g_{12}dx dy + g_{21}dy dx + g_{22}dy^2 \quad (7.25)$$

mit

$$\begin{aligned} g_{11} &= g_{22} = 1 \\ g_{12} &= g_{21} = 0 \end{aligned}$$

schreiben. Diese Komponenten lassen sich nun in den metrischen Tensor (Matrix) einfügen:

$$\begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Damit die Schülerinnen und Schüler später die Winkelfunktionen in der Schwarzschild-Metrik besser einordnen können, werden an dieser Stelle kurz die Kugelkoordinaten eingeführt. Hierbei soll nur die Punktangabe mithilfe von (r, ϑ, φ) im Vergleich zu (x, y, z) im kartesischen KS thematisiert werden. Genauere Analysen führen zu weit, brauchen zu viel Zeit und sind an dieser Stelle auch nicht weiter zweckdienlich. Ziel hierbei ist die Möglichkeit zur Aufstellung einer weiteren Metrik - der Kugelmetrik -. Die folgende Abbildung zeigt, dass der krummlinige Abstand auf einer Kugel durch

$$ds^2 = dr^2 + r^2 d\vartheta^2 + r^2 \sin^2 \vartheta d\varphi^2 \quad (7.26)$$

gegeben ist.

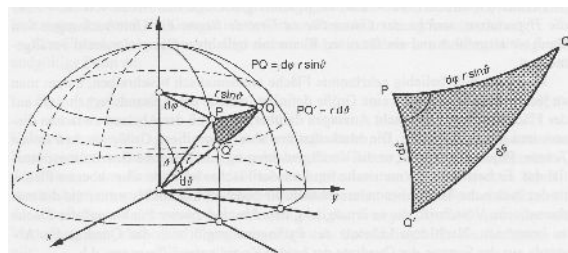


Abbildung 7.41.: Zweidimensional gekrümmter Raum der Kugeloberfläche [KUH01b, 391]

Dadurch führt der metrische Tensor zu folgender Matrix:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & r^2 & 0 \\ 0 & 0 & r^2 \sin^2 \vartheta \end{pmatrix}$$

Sobald eine Krümmung vorliegt, werden die Komponenten variabel. Des Weiteren können auch Mischkomponenten (Werte neben der Diagonalen) bei ungleichmäßigen Krümmungen verschieden von Null sein.

Bisher wurden nur zweidimensionale Flächen bzw. dreidimensionale thematisiert, wodurch 2×2 -Matrizen bzw. 3×3 -Matrizen entstehen. Bei Bewegungen in der Raumzeit werden diese zu 4×4 -Matrizen. Nach diesem Lehrervortrag sollten die Schülerinnen und Schüler den metrischen Tensor der schon behandelten Minkowski-metrik selbst darstellen. Ergebnis:

$$(ds)^2 = c^2(dt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2 \quad \Leftrightarrow \quad g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Nun wird die erste exakte Lösung der Allgemeinen Relativitätstheorie - die Schwarzschild-Lösung - angesprochen. Hier hat man die erste Metrik, die die Raumzeit und die Effekte der Allgemeinen Relativitätstheorie beinhaltet bzw. die die Krümmung der Raumzeit um einen Körper mit gewissen Eigenschaften beschreibt. Damit die Motivation bei den Schülerinnen und Schülern aufrechterhalten wird, sollte im historischen Rahmen die Lösung als Beschreibungsmöglichkeit eines Schwarzen Lochs herausgestellt werden. Schon mit Nennung dieses Begriffs werden die Lernenden aktiviert, da in Filmen oder allgemein in populärwissenschaftlichen Medien oft Schwarze Löcher als zerstörerische astronomische Objekt dargestellt werden und somit unweigerlich Faszination hervorrufen (vgl. 5.3.2). An dieser Stelle wäre demnach auch ein kleines Referat über Schwarze Löcher zu empfehlen. Freiwillige gibt es bei diesem Thema genug und ggf. lässt sich ein stiller Schüler finden, der hiermit sogar seine

Note aufbessern kann. Vom Lehrer oder aus dem Referat heraus wird die Schwarzschildmetrik an die Tafel geschrieben:

$$ds^2 = c^2 \left(1 - \frac{2\gamma M}{c^2 r}\right) dt^2 - \left(\frac{1}{1 - \frac{2\gamma M}{c^2 r}}\right) dr^2 - r^2 d\vartheta^2 - r^2 \sin^2 \vartheta d\varphi^2 \quad (7.27)$$

Anschließend soll der Ausdruck im Plenum diskutiert / interpretiert werden. Mit den Schülerinnen und Schülern könnten folgende Aspekte erarbeitet werden:

- Beim Vergleich von 7.26 und 7.27 fällt auf, dass die räumlichen Koordinaten, bis auf die r -Komponente, die in der Schwarzschildmetrik den Vorfaktor $\left(1 - \frac{2\gamma M}{c^2 r}\right)^{-1}$ aufweist, übereinstimmen.

Folgerung: Die Schwarzschildmetrik beschreibt das Gravitationsfeld einer Kugel.

Der Lehrer erwähnt dabei, dass die Metrik nur das Feld einer homogenen, nicht geladenen und nicht rotierenden Kugel beschreibt. Es wurden später auch Metriken aufgestellt, die zusätzliche Ladungs- und Drehimpuls-Terme beinhalten.

- Bei Betrachtung des Definitionsbereichs fällt auf, dass der erste Summand im Term für die Werte $r = 0$ und $r = \frac{2\gamma M}{c^2}$ nicht definiert ist. Letzterer Radiuswert wird Schwarzschildradius genannt. Den Begriff haben die Schülerinnen und Schülern schon auf den behandelten Arbeitsblättern als Radius eines Schwarzen Lochs gegebener Masse kennen gelernt (Physik Newtons) und nun wird dieser aus geometrischer Sicht (Physik Einsteins) mit seiner weitreichenden Bedeutung interpretiert.

Folgerung

1. Die Metrik lässt sich bei $r = 0$ nicht beschreiben, denn dort müsste die Masse auf einen Punkte zusammengedrückt sein, sprich wir hätten einen Punkt mit einer unendlich hohen Massedichte. Dies stellt bei einem Schwarzen Loch eine Singularität im Mittelpunkt dar. Hierzu vergleicht man die bekannte Funktion $f(x) = 1/x$ bei $x = 0$.
2. Die Singularität an der Grenzfläche, am Schwarzschild-Radius, ist aus mathematischer Sicht einleuchtend, aber verwundert bei physikalischer Betrachtung. Im Inneren eines Schwarzen Lochs sollte die Krümmung doch drastischer sein, als am Rand. Die mathematische Behebung dieses Problems führt zu weit. Der Lehrer sollte an dieser Stelle aber sagen, dass diese Singularität bei passender Koordinatenwahl behebar ist und dabei ein Beispiel einer hebbaren Definitionslücke aufführen (z.B. bei $f(x) = \frac{x+1}{x^2-x-2}$ ist augenscheinlich bei $x = -1$ eine Definitionslücke, welche aber durch Faktorisieren zu beheben ist).

Nun haben die Schülerinnen und Schüler ein Gefühl für Metriken und ihre Darstellungen bekommen, somit kann ihnen nun die Einsteinsche Feldgleichung gezeigt und

grob erklärt werden:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \cdot R \cdot g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi\gamma}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (7.28)$$

Kurze Erläuterung durch den Lehrer: Alle Variablen mit Indizes sind Tensoren (Matrizen).

- $(T_{\mu\nu})$ ist eine Energie-Impuls-Tensor, er beschreibt die Energien, Impulse und die Eigenschaften der Materie.
- $g_{\mu\nu}$ ist ein Metrischer Tensor (Beschreibung von Abständen)
- R ist eine Konstante, die von der betrachteten Krümmung abhängt.
- $R_{\mu\nu}$ ist ein Tensor, der die Krümmung im Allgemeinen beschreibt.

Den Lernenden muss gesagt werden, dass Rechnungen mit dieser Gleichung ihre Fähigkeiten übersteigen, aber man auch als Laie Erstaunliches feststellen kann. Grob gesagt hat man rechts die Physik stehen, einen konstanten Faktor aus bekannten Konstanten und einen Tensor, der die physikalischen Eigenschaften widerspiegelt; links steht „nur“ die Mathematik zur Beschreibung von Krümmungen: Kurz gesagt, die Krümmung der Raumzeit (die Geometrie) entspricht/bestimmt das physikalische Verhalten von Körpern und umgekehrt. Die Behandlung der Formel soll den Schülerinnen und Schülern aufzeigen, dass die Physik durch die Geometrie beschrieben werden kann und somit das Geometrisierungskonzept als Wechselwirkungskonzept gestärkt wird.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen, dass die Physik in der Allgemeinen Relativitätstheorie durch die Geometrie beschrieben wird.

11. Stunde

In dieser Stunde soll mithilfe der Schulmathematik die Raumzeitkrümmung als darstellbare Funktion aus der Metrik hergeleitet werden. Somit wird den Schülerinnen und Schülern der Nutzen der behandelten Metrik klarer und der vorher phänomenologisch behandelte Stoff wird fassbarer. Um die Krümmung mit einer Formel darzustellen, vereinfacht man zunächst die bekannte Schwarzschildmetrik. Dazu betrachtet man hier nur die Äquatorebene ($\Rightarrow \vartheta = \frac{\pi}{2}$; $d\vartheta = 0$) zu einem festen Zeitpunkt ($\Rightarrow dt = 0$):

$$\Rightarrow ds^2 = \frac{1}{1 - \frac{2\gamma M}{c^2 r}} dr^2 + r^2 d\varphi^2 \quad (7.29)$$

Zudem kann man sich nur auf die Punkte der r -Halbachse beschränken:

$$ds^2 = \frac{1}{1 - \frac{2\gamma M}{c^2 r}} dr^2 \quad \text{bzw.} \quad ds^2 = \frac{1}{1 - \frac{R_S}{r}} dr^2 \quad (7.30)$$

Damit man hiermit an eine Funktion kommt, die die Krümmung darstellt, bedarf es eines kleinen Tricks (vgl. [TAU03, 90 ff.]). Man kann die Krümmung des Raums sichtbar machen, wenn man den gekrümmten Raum in einem „flachen“ dreidimensionalen Hilfsraum darstellt. Dazu definiert man sich einen dreidimensionalen *Normalraum* mit den Koordination (x, y, z) , wobei speziell die xy -Ebene durch $(x, y, 0)$ gegeben ist. Des Weiteren nimmt man sich einen vierdimensionalen *Superraum* mit den Koordinaten (w, x, y, z) . Der *Normalraum* sei in diesem als Unterraum eingebettet und lässt sich in den Koordinaten $(0, x, y, z)$ wiederfinden, insbesondere hat die eben genannte Fläche die Koordinaten $(0, x, y, 0)$. Zur besseren Vorstellung der Schülerinnen und Schülern, sollte als Beispiel die Einbettung der natürlichen Zahlen in die ganzen Zahlen genannt werden:

$$\mathbb{Z} = \{\dots, -3, -2, -1, 0, \underbrace{1, 2, 3, \dots}_{\mathbb{N}}\} \quad (7.31)$$

Das Koordinatensystem im *Superraum* ist so gelegt, dass dessen x - und y -Achse mit der x - und y -Achse des *Normalraums* zusammenfallen. Die xy -Ebene sei waagrecht und die w -Achse senkrecht nach oben orientiert. Die verbliebene z -Achse entzieht sich unserem Vorstellungsvermögen, welches aber für die weitere Behandlung nicht von belang ist. Nun soll die Krümmung der xy -Ebene mit einer darin liegenden Masse durch eine Fläche im *Superraum* wiedergegeben werden, wobei man diese Krümmung im Superraum wirklich sehen kann. Dazu wird die xy -Ebene derart in w -Richtung verbogen, dass die Punkte der deformierten Fläche nach Pythagoras die richtigen Abstände haben und somit der Schwarzschildmetrik genügen. Dieser Ansatz kann gemacht werden, da der dreidimensionale wxy -Unterraum nach Definition flach ist und somit der Satz des Pythagoras gilt. Zur weiteren Vereinfachung beschränkt man sich hierbei auch wieder zunächst auf die wx -Ebene und legt die x -Achse auf die bekannte r -Achse der Schwarzschildmetrik. Dadurch erhält man im *Superraum* nach dem Satz des Pythagoras⁹⁴:

$$ds^2 = dr^2 + dw^2 \quad (7.32)$$

mit:

- dr : Radialer Abstand in r -Richtung
- dw : zugehöriger Höhenunterschied in w -Richtung
- ds : Funktionaler Abstand von $(r; w)$ zu $(r + dr; w + dw)$

Hiermit können wir nun die Krümmung des Normalraums aus Sicht des Superraums sichtbar machen. Falls der Sachverhalt für die Lernenden kognitiv zu schwer ist, kann

⁹⁴Eigentlich ist die Legitimationserklärung des folgenden Zusammenhangs noch etwas komplexer, aber eine weitere Ausweitung würde die Schülerinnen und Schüler wahrscheinlich nur noch mehr verwirren, als sie es so schon tut.

die Beziehung auch rein aus der folgend dargestellten Abbildung entnommen werden, nämlich mit der Erklärung, dass r unseren Raum darstellt und w die Krümmung dieses Raumes widerspiegelt.

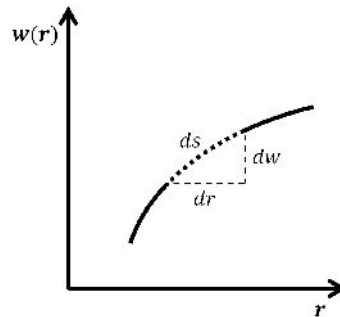


Abbildung 7.42.: Zur Berechnung des Flammischen Paraboloids. w sei die Höhe der Krümmung, r der Radialabstand und s die Länge des gekrümmten Stücks. Bei hinreichend klein gewählten Differentialen wird die Krümmung flach und der Satz des Pythagoras kann angewendet werden.

Dazu werden die Differentialgleichungen 7.30 und 7.32 gleichgesetzt und durch Umformungen eine Funktion in Abhängigkeit von r hergestellt. Man erhält also:

$$\frac{1}{1 - \frac{R_S}{r}} dr^2 = dr^2 + dw^2 \quad (7.33)$$

Man formt die Gleichung nach $\frac{dw}{dr}$ um:

$$\begin{aligned} dw^2 &= \frac{1}{1 - \frac{R_S}{r}} dr^2 - dr^2 \\ \Leftrightarrow dw^2 &= \frac{\frac{R_S}{r}}{1 - \frac{R_S}{r}} dr^2 \\ \Leftrightarrow dw^2 &= \frac{1}{\frac{r}{R_S} - 1} dr^2 \\ \Leftrightarrow dw &= \pm \frac{1}{\sqrt{\frac{r}{R_S} - 1}} dr \\ \Leftrightarrow \frac{dw}{dr} &= \pm \frac{1}{\sqrt{\frac{r}{R_S} - 1}} \end{aligned} \quad (7.34)$$

Auf beiden Seiten wird 7.34 nun integriert:

$$w(r) = \pm \int \frac{1}{\sqrt{\frac{r}{R_S} - 1}} dr = \pm 2R_S \sqrt{\frac{r}{R_S} - 1} + C \quad (7.35)$$

Im Folgenden sind Graphen für unterschiedliche Wert von R_S mithilfe der Software Geogebra dargestellt.

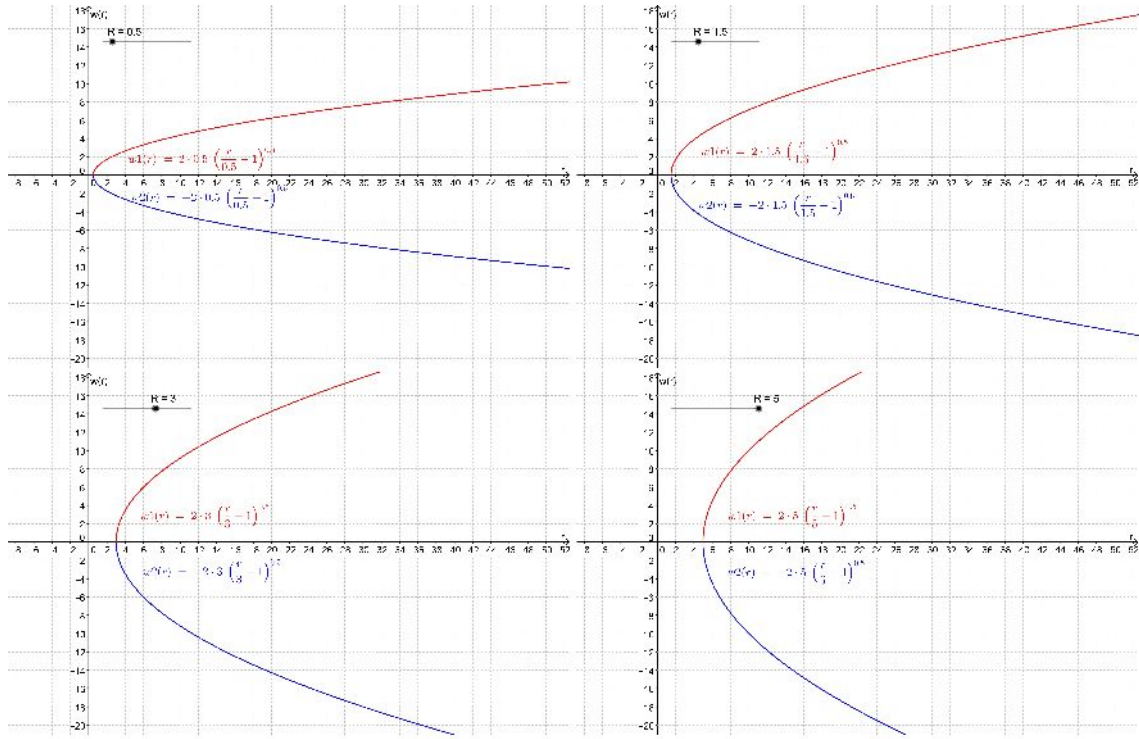


Abbildung 7.43.: Graphen der $w(r)$ -Funktion für $R_S = \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; 3; 5$

Das Problem wurde zu Beginn auf eine r -Halbachse reduziert. Für die Wiederaufnahme des Azimutwinkels φ muss die Funktion lediglich aus Symmetriegründen um den Ursprung rotieren. Daraus ergibt sich der Flammsche Paraboloid:

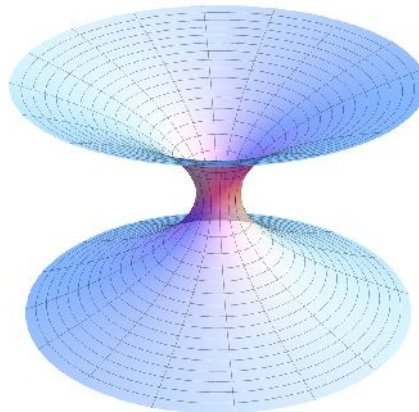


Abbildung 7.44.: Rotation der Einbettungsfunktion [FLA14]

Interpretation:

Die Integrationskonstante wird einfach gleich Null gesetzt.

- Interessant für die Schülerinnen und Schülern ist das unbestimmte Vorzeichen der Funktion. Dies entsteht nicht nur als rein mathematisches Phänomen, es kann auch physikalisch interpretiert werden. Diese Zweideutigkeit - Krümmungsspiegelung am Ereignishorizont der Raumzeit - lässt vermuten, dass hier zwei Universen durch ein Schwarzes Loch verbunden sind, ein sogenanntes Wurmloch. Eine gewisse Zeit lang dachte man, diese Wurm Löcher seien passierbar und man könnte sie für Zeitreisen nutzen. Heute „weiß“ man aber, dass es keine technische Realisierung für so eine Reise gibt.⁹⁵
- Des Weiteren sollte im Plenumsgespräch erarbeitet werden, dass hiermit eigentlich nur die äußere Lösung ($r > R_S$) betrachtet werden kann. Begründung:
 - Bei $0 < r < R_S$ drehen sich in der Zeit- und Radialkomponente die Vorzeichen $\Rightarrow$ Wechsel von raumartig zu zeitartig bzw. umgekehrt.
 - Die zugrundeliegende Metrik ist teilweise fehlerhaft. Erinnerung an die nicht verstandene Singularität bei ($r = R_S$)
- Zur vollständigen Beschreibung müsste noch eine innere Lösung erarbeitet werden und die Singularität am Rand durch geeignete Koordinatenwahl (Erinnerung vorherige Stunde) beseitigt werden.

Durch diese Einschränkungen sollen die Schülerinnen und Schüler aber nicht entmutigt werden. Die Lehrperson ist angehalten zu erklären, dass die äußere Schwarzschildmetrik für unser Sonnensystem sehr gute Ergebnisse liefert, die im Einklang mit experimentellen Messwerten sind. Dazu gehört die schon behandelte Lichtablenkung am Rand unserer Sonne und die Periheldrehung der inneren Planeten. Zur Untersuchung von Sternen hingegen muss die behandelte Schwarzschildlösung aber erweitert werden.

Beispielhaft kann die Vernachlässigung des Luftwiderstandes bei schulischen Experimenten sein. Auch hier liefern unsere theoretischen Annahmen gute Ergebnisse (kleine symmetrische Körper, kleine Geschwindigkeiten, etc.), sobald man aber bspw. Fallschirmsprünge analysiert, müssen unsere Berechnungsgrundlagen erweitert werden.

Die Schülerinnen und Schüler können die vereinfachte Geometrie der äußeren Schwarzschildlösung verstehen und deuten diese im betreffenden Zusammenhang.

⁹⁵An dieser Stelle ist den Schülerinnen und Schülern nochmals klar zu machen, dass die Naturwissenschaften nur eine Zeitaufnahme darstellen. Auch das heutige Wissen kann in naher Zukunft wieder teilweise verworfen werden.

Eine Doppelstunde am Ende zur Wiederholung und Reflexion der behandelten Reihe, wie zum Kraft- bzw. Feldkonzept, ist wünschenswert, aber aus zeitlichen Gründen schwer realisierbar. Die Behandlung der Reihe, wie zu Beginn angesprochen, ist zeitlich gegen Ende der Klasse 13 angesiedelt und liegt somit während der Wiederholungszeit für die kommenden Abiturprüfungen. So gilt es von Kurs zu Kurs abzuwägen, welche Prioritäten an was für Stellen zu setzen sind.

7.4. Das Austauschteilchenkonzept

Wie schon das Geometrisierungskonzept bedarf die Behandlung des Austauschteilchenkonzeptes viele Vorkenntnisse seitens der Schülerinnen und Schüler, dazu zählt ein Vorwissen in der Atomphysik, Kernphysik und Quantenmechanik.

Auch diese Unterrichtssequenz ist eher qualitativer Natur. Es gibt aber quantitative Aspekte, die besonders betont werden müssen, damit die Schülerinnen und Schüler keine falschen Vorstellungen zum Thema bekommen.

Des Weiteren müssen aber aufgrund der hohen Komplexität der Elementarteilchenphysik und den damit verbundenen Austauschteilchen aus zeitlichen Gründen viele Begriffe und Zusammenhänge übergangen oder nur grob behandelt werden.

Die Unterrichtseinheit kann sowohl in einem Leistungskurs als auch in einem Grundkurs unterrichtet werden.

7.4.1. Kurze Legitimation

In vielen Bundesländern ist die Elementarteilchenphysik mit dem einhergehenden Austauschteilchenkonzept als möglicher Exkurs vorgesehen. In Nordrhein-Westfalen ist mit „Was sind die kleinsten Bausteine der Materie? - Elementarteilchen und ihre fundamentalen Wechselwirkungen“ (vgl. 5.4.1) das Konzept der Austauschteilchen im Grundkurs sowie im Leistungskurs fest mit sechs bzw. 11 Unterrichtsstunden im Lehrplan verankert.

7.4.2. Stunden der Unterrichtseinheit

1. Bindung über Teilchen - Einführung des Austauschteilchenkonzeptes über das Yukawa-Teilchen.
2. Erweiterung von schon Bekanntem - Warum wird die Elektrodynamik zur Quantenelektrodynamik?
3. Weiterführung der 2. Stunde.
4. Vorstellungshilfe - Darstellungen von Prozessen mithilfe von Feynman-Diagrammen.
5. Beobachtungsmaschine - Funktionsweise und Gebrauch von Teilchendetektoren.
6. Weiterführung der 5. Stunde.
7. Nicht elementar - Der Aufbau der Nukleonen.
8. Nicht elementar - Der Aufbau der Teilchen und ihr Zusammenhalt.
9. Weiterführung der 8. Stunde.
10. Die schwache Kraft - Eine Erklärung des $\beta^\pm$ -Zerfalls mittels des Austauschteilchenkonzeptes.
11. Weiterführung der 10. Stunde.
12. Das Standardmodell - Wiederholung der Reihe mithilfe der Einführung des Standardmodells.

7.4.3. Inhalt der Stunden im Detail

Am Ende jeder Stunde wird kurz das erreichte Teilziel auf dem Weg des Verständnisses des Austauschteilchenkonzeptes notiert. Die Schülerinnen und Schüler erhalten zu Beginn einen Laufzettel (s.A. A.4). In diesem können Sie die im Laufe der Unterrichtreihe neu kennengelernten Teilchen eintragen.

1. Stunde

Zu Beginn der Reihe wird den Schülerinnen und Schülern die schematische Darstellung eines Atoms nach dem Bohrschen Atommodell mit umgebenden Elektronen in der Hülle sowie Protonen und Neutronen im Kern gezeigt.

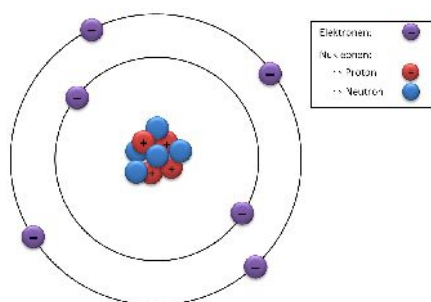


Abbildung 7.45.: Schematische Darstellung eines Atoms.

Die Frage nach dem Zusammenhalt der Elektronen und dem Kern wird immer mithilfe des Coulombgesetzes beantwortet (Planetenmodell), aber die Bindung zwischen den positiven Protonen und neutralen Neutronen im Kern kann seitens der Schülerinnen und Schülern nicht genau erklärt werden - die positiv geladenen Protonen im Kern müssten sich ja abstoßen. In der vorher behandelten Kernphysik wurde der Zusammenhalt mit dem Auftreten einer sogenannten Kernkraft abgetan. Deren Zustandekommen kann mit einer Analogiebetrachtung der kovalenten- bzw. Elektronenpaarbindung eines Moleküls veranschaulicht werden.

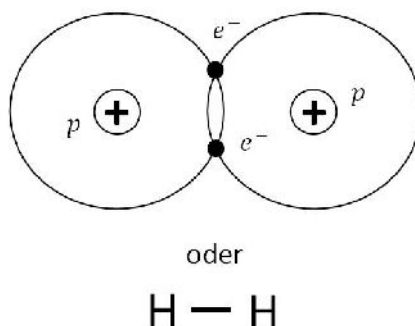


Abbildung 7.46.: kovalente Bindung zweier nach außen neutraler Atome

Zwei nach außen elektrisch neutrale Atome teilen sich ihre Elektronen und erreichen damit ihre Bindung. Dieses Wissen haben die Lernenden schon aus dem Chemieunterricht der Sekundarstufe I. Die Elektronen treten hier also als Bindeteilchen auf. Könnte dies ein Analogon zur Bindung im Atomkern sein?

Nun wird ein Blick in die Geschichte mit den Schülerinnen und Schüler unternommen. Der Physiker Hideki Yukawa hatte dieselbe Idee und postulierte 1935 ein Bindeteilchen - Yukawa-Teilchen genannt. Er stellte sich vor, dass ein Proton ein positives Yukawa-Teilchen aussendet und sich das Proton wegen der Ladungserhaltung in ein Neutron verwandelt. Ein anderes Neutron fängt dieses positive Yukawateilchen ein und verwandelt sich zu einem Proton.⁹⁶ Die zeitliche Abfolge kann folgendermaßen veranschaulicht werden:

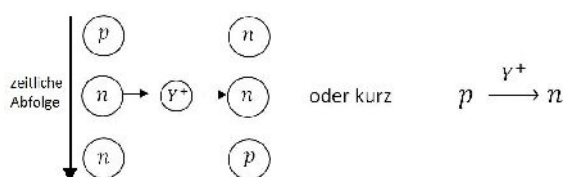


Abbildung 7.47.: Verwandelung eines Protons in ein Neutron über Aussendung bzw. Einfangen eines positiven Yukawa-Teilchens

Eine Proton-Neutron Bindung wäre damit geklärt. Aber aus symmetrischen Aspekten muss eine Neutron-Proton Bindung auch möglich sein. Weiterhin sind Neutronen und Protonen gerade in größeren Atomkernen nicht unbedingt gleichmäßig verteilt, was nahelegt, dass auch eine Neutron-Neutron- oder Proton-Proton-Bindung stattfinden können müsste. Mögliche Reaktionen können gemeinsam mit den Lernenden erarbeitet werden.

Am Ende sollte jedem klar sein, dass zur Gewährleistung der Ladungserhalten⁹⁷, zwei weitere Teilchen zu postulieren sind. Zur Motivationsunterstützung sei an dieser Stelle zu erwähnen, dass Yukawa früher denselben Gedanken verfolgte.

Damit ergeben sich folgende vier Austauschprozesse.

$$p \xrightarrow{Y^+} n$$

$$n \xrightarrow{Y^-} p$$

$$p \xrightarrow{Y^0} p$$

$$n \xrightarrow{Y^0} n$$

Am Ende wird den Schülerinnen und Schülern kurz die Tragweite dieser Erklärungsmethode dargelegt. In der Mechanik denken wir an die Kraft, die über Ziehen,

⁹⁶Aus der Kernphysik wissen die Schülerinnen und Schüler, dass Teilchen andere Teilchen emittieren (β^- , β^+ -Zerfall) bzw. absorbieren (K-Einfang) können.

⁹⁷Die Schülerinnen und Schüler verinnerlichen nochmals den in der Physik überaus wichtigen Aspekt des Erhaltungsprinzips.

Drücken oder Stoßen Wirkungen zwischen Körpern erzeugt; in der Elektrodynamik postuliert man das Feld, welches Änderungen an der Raumeigenschaft versinnbildlicht und diese Änderungen Wirkungen zwischen Körpern erzielen; jetzt in der Teilchenphysik sollen Wirkungen über entstehende und sofort wieder verschwindende Bindeteilchen erklärt werden. Wenn dem so ist bzw. die Annahme sinnvoll sein soll, müssen aber die schon bekannten physikalischen Sachverhalte der Wechselwirkung auch durch dieses neue Konzept begreiflich werden.

Bekannte Bestandteile der Welt:

γ , e^- , ν_e ⁹⁸, p , n , hypothetisch $Y^{\pm,0}$

Die Schülerinnen und Schüler verstehen die kovalente Atombindung und erkennen die Möglichkeit einer Wechselwirkung über Austauschteilchen.

2. und 3. Stunde

Um einen genaueren Einblick in die Welt der Austauschteilchen zu bekommen, betrachtet man im Folgenden mit den Schülerinnen und Schülern die Elektrodynamik. Dieses Themengebiet eignet sich aus zweierlei Hinsicht besser als die starke Kraft, um das Konzept näher zu erläutern. Zum einen haben die Schülerinnen und Schüler eine bessere Vorstellung von diesem Themengebiet und kennen das hier auftretende Feldteilchen als Photon mit seinen Eigenschaften und zum anderen ist die Vorstellung von Austauschteilchen des Yukawapotentials aus heutiger Sicht überholt und wird nur noch als grobes Modell genutzt.

Zur Vorbereitung des Konzeptes eignet sich ein kleines Schülerexperiment. In der Eingangshalle oder noch besser draußen auf dem Schulhof soll sich ein Schülerpärchen ein Ball immer wieder zuwerfen. Dazu werden zwei Schüler etwa sechs bis acht Meter auseinandergestellt mit dem Auftrag, sich einen Tennisball zuzuwerfen. Die übrigen Schülerinnen und Schüler beobachten dabei nur. Danach wiederholt man das Spiel mit einem Schüler und einer Schülerin.

Bei mehrmaliger Wiederholung des Experiments stellt man in fast allen Fällen fest, dass sich ein Schüler-Schüler-Paar bei dem Wurfspiel weiter auseinander bewegt und ein Schüler-Schülerin-Paar näher zusammenrückt. Nach Meinung des Autors ist der Grund hierfür, dass die Schüler tendenziell besser Werfen und Fangen können als die Schülerinnen und das reine Schülerpaar sich eher gegenseitig beweisen wollen, wie toll sie mit dem Ball umgehen können. Interessant ist die entstandene Vorstellung, dass sich zwei Körper über den Austausch eines Objektes sowohl auseinander bewegen können als auch darüber annähern können. Hierin steckt die Grundidee des Austauschteilchenkonzeptes.

⁹⁸Durch die Kenntnisse aus der schon behandelten Kernphysik wird das Neutrino meist auch schon seitens der Schülerinnen und Schüler genannt.

Am Ende der letzten Stunde wurde besprochen, dass das Betrachten von Wirkungen über Bindeteilchen nur sinnvoll erscheint, wenn die durch andere Modellvorstellungen gelieferten Erklärungen auch durch dieses Konzept erbracht werden können. So betrachten wir nun als Beispiel die Elektrodynamik.

Wenn schon ein neues Konzept „geprüft“ wird, kann man auch versuchen, neue Erkenntnisse einzugliedern. Mit den Schülerinnen und Schülern können fehlende bzw. nicht beachtete Aspekte in der klassischen Elektrodynamik im Plenum erörtert werden. Darunter:

- Kenntnisse aus der Speziellen Relativitätstheorie
- Auslöschung bzw. Entstehung von elektrischen Ladungen
- Heisenbergsche Unschärferelation, die für die beteiligten Teilchen gilt.

Was für ein Feldteilchen könnte eine elektrische Ladung, beispielsweise ein Elektron, aussenden, um in Wechselwirkung mit anderen geladenen Teilchen zu treten?

Die Schülerinnen und Schüler nennen erfahrungsgemäß (im aktuellen Lehrplan sind Teilchenbeschleuniger verankert) die Synchrotronstrahlung oder Röntgenbremsstrahlung und damit das Gammateilchen, also das Photon. Dieses Teilchen kann als guter Kandidat dargestellt werden, da es von elektrischen Ladungen emittiert (Synchrotronstrahlung, Röntgenbremsstrahlung) und absorbiert (Photoeffekt) werden kann, äquivalent zu den Prozessen bei Yukawa-Teilchen.

Das zu verdeutlichende Problem ist aber der Energieerhaltungssatz. Woher nimmt ein ruhendes Elektron die Energie, um ständig Photonen auszusenden bzw. wieder einzufangen? Anders ausgedrückt würde der Energiebetrag eines Elektrons die ganze Zeit schwanken, was aber noch nicht beobachtet wurde. Die Lösung dieses Problems liegt in der Heisenbergschen Unschärferelation zwischen Energie und Zeit.

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \quad (7.36)$$

Je nachdem wie viel Energie das Photon hat, hat es Δt Zeit, um vom Elektron weg- und wieder zu ihm zurückzufliegen, ohne dass der Energiesatz verletzt wäre. Aus diesem Grund werden die Austauschteilchen auch virtuelle Teilchen oder intermediäres⁹⁹ Teilchen genannt.

⁹⁹Bedeutung: in der Mitte liegend, dazwischen befindlich, ein Zwischenglied bildend

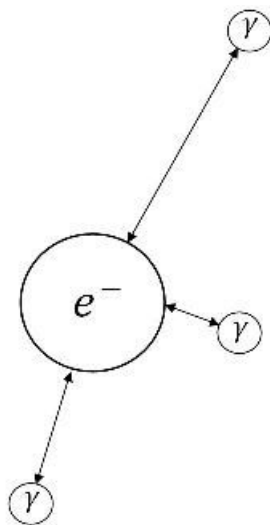


Abbildung 7.48.: Austauschteilchen in der QED. Energieärmere Photonen können sich weiter vom emittierenden Elektron entfernen.

Emission und Absorption unterliegen in der Quantenmechanik einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Diese Wahrscheinlichkeit ist den Schülerinnen und Schülern schon bei der Behandlung des Wasserstoffspektrums begegnet, zumeist haben sie aber nicht tiefer darüber nachgedacht.

$$\alpha = \frac{e^2}{2c\varepsilon_0 h} \approx \frac{1}{137} \approx 0,0073 \quad (7.37)$$

Für die Schülerinnen und Schüler einfacher zu verstehen wäre der Vergleich, dass, wenn man Kurzaufnahmen von der Elementarladung machen könnte, auf jedem 137. Bild ein Photon zu sehen wäre (vgl. [MET98, 532]).

Diese Wahrscheinlichkeit α wird auch Kopplungskonstante genannt. Sie kann als ein Maß für die Stärke der elektromagnetischen Wechselwirkung angesehen werden.

Ein mögliches Analogiebeispiel: Wir stellen uns ein Gefäß mit Wasser vor, welches 137 winzige Löcher im Boden hat. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Tropfen sich löst sei 1/137. Somit müsste in jeder Zeiteinheit genau ein Tropfen auf die darunter liegende Platte fallen.

Auf die Platte wirkt dann immer die „Kraft“ eines Tropfens.

Wenn man nun die Wahrscheinlichkeit des Tröpfelns auf 1/68 verdoppelt, müssten in jeder Zeiteinheit zwei Tropfen auf die Platte fallen und sie somit eine „Kraft“ von zwei Tropfen spüren. Das heißt, eine höhere Wahrscheinlichkeit entspräche eine Erhöhung der Stärke. Man kann hier nur von „pro Zeiteinheit“ sprechen und keine klar definierte Zeit angeben, da nur die Rede von einer Wahrscheinlichkeit - einer relativen Größe - ist, die nicht absolut bspw. in Newton angegeben werden kann.

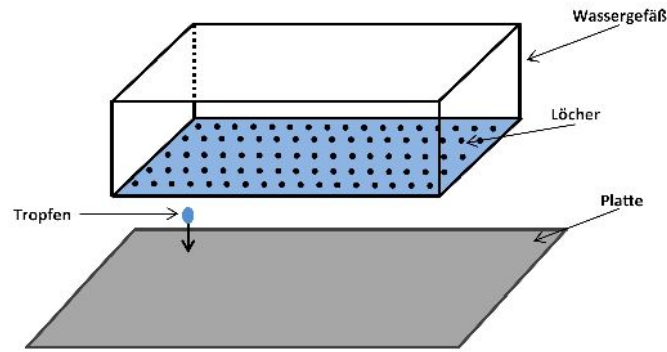


Abbildung 7.49.: Gedankenexperiment zum Tropfenversuch: Analogie zur relativen Stärke der em-Wechselwirkung

Diese ausgesendeten Photonen müssen nicht immer zwangsläufig zum Elektron zurückkehren. Wenn ein anderes geladenes Teilchen in die Nähe dieses Elektrons kommt und die Reichweite der ausgesendeten Photonen groß genug ist, kann das Photon auch von diesem Teilchen absorbiert werden. Somit findet eine elektromagnetische Wechselwirkung statt.

Nun gilt es diesen Prozess mit den Schülerinnen und Schülern genauer zu betrachten, denn, wie schon angesprochen, müssen die Ergebnisse der klassischen Elektrodynamik auch mithilfe des neuen Wechselwirkungskonzeptes erzielt werden können.

Abstandsabhängigkeit

Ein Photon muss wegen der Energieerhaltung in der Zeit Δt zurück sein, wenn es die Energie ΔE besitzt. Dabei legt es für Hin- und Rückflug die Strecke $2r$ zurück. Weiterhin fliegen Photonen bekanntermaßen mit Lichtgeschwindigkeit, wodurch sich folgender Zusammenhang ergibt:

$$2 \cdot r = c \cdot \Delta t \quad (7.38)$$

Die vermittelte Kraft auf das zweite geladene Teilchen ist gleich dem durch das Photon übertragenen Impuls ($p = \frac{E}{c}$), also:

$$F = \dot{p} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{c \Delta t} \quad (7.39)$$

Mit der nach ΔE umgestellten Unschärferelation 7.36 folgt:

$$\frac{\Delta E}{c \Delta t} \approx \frac{h}{2\pi c (\Delta t)^2} \quad (7.40)$$

Nun wird die Weg-Zeit-Abhängigkeit 7.38 nach Δt umgestellt und eingesetzt:

$$\frac{h}{2\pi c (\Delta t)^2} = \frac{hc}{\pi r^2} \quad (7.41)$$

Insgesamt erhält man mit 7.39 und 7.41:

$$F \approx \frac{hc}{\pi r^2} \quad (7.42)$$

Also liefert auch eine Betrachtung der elektromagnetischen Kraftwirkung durch Austauschteilchen eine Abhängigkeit von

$$F \sim \frac{1}{r^2}$$

wie man sie aus dem Coulomb-Gesetz kennt. Die Herleitung ist auch für die Schülerinnen und Schüler sehr verständlich und weist keinen zu hohen mathematischen Anspruch auf.

Die Reichweite

Im klassischen Feldkonzept wurde die Reichweite von elektromagnetischen Feldern qualitativ auf unendlich gesetzt. Dieses Dilemma kann nun mit Hilfe des Feldteilchenkonzeptes von den Schülerinnen und Schülern quantitativ gelöst werden. Nachdem obige Rechnung an der Tafel entwickelt wurde, hat man auch die Möglichkeit, die Reichweite R des ausgesandten Photons, mit Hilfestellungen von den Lernenden selbst herleiten zu lassen. Hier gibt es zwei mögliche Lösungen:

1. Möglichkeit:

Als Ansatz wählt man die Energieunschärfe:

$$E \cdot t \approx \frac{h}{2\pi} \quad (7.43)$$

Nun verwendet man Einsteins Energiebeziehung und erhält:

$$mc^2 \cdot t \approx \frac{h}{2\pi}$$

$$\Leftrightarrow c \cdot t \approx \frac{h}{2\pi mc}$$

Auf der linken Seite steht nun nach ($s = v \cdot t$) der zurückgelegte Weg - die mögliche Reichweite - eines Austauschteilchens.

$$R \leq c \cdot t \approx \frac{h}{2\pi mc} \quad (7.44)$$

Da die Masse des Photons Null ist, ergibt sich durch eine Grenzwertbetrachtung:

$$R \leq \lim_{m \rightarrow 0} \frac{h}{2\pi mc} \rightarrow \infty \quad (7.45)$$

Aus dieser mathematisch einfachen Rechnung können die Lernenden schnell erkennen, dass die Reichweite der em-Wechselwirkung unendlich sein muss.

Recht problematisch ist es aber, obwohl die Schülerinnen und Schülern es aus der Differentialrechnung kennen, die Masse Null zu setzen und dann mit Null zu dividieren. Dieser Aspekt kann aber mit einem anderen Ansatz umgangen werden:

2. Möglichkeit:

Als Ansatz wählt man nun die Impulsunschärfe:

$$x \cdot p \approx \frac{h}{2\pi} \quad (7.46)$$

Nun verwendet man die relativistische Impulsbeziehung und erhält:

$$x \cdot \frac{E}{c} \approx \frac{h}{2\pi}$$
$$\Leftrightarrow x \approx \frac{hc}{2\pi E}$$

Wenn man nun die Energie des Teilchens als sehr sehr klein annimmt, ergibt sich durch eine Grenzwertbetrachtung:

$$R \hat{=} x = \lim_{E \rightarrow 0} \frac{hc}{2\pi E} \rightarrow \infty \quad (7.47)$$

Die Herleitung der Beziehung 7.44 ist aber nicht unzweckmäßig, da sie allgemeingültig bestimmt wurde und mit ihr später die Reichweite anderer, massebehafteter Austauschteilchen bzw. Wechselwirkungen abgeschätzt werden kann. Mithilfe des erhalten gebliebenen Abstandsgesetzes ($R \approx \frac{1}{r^2}$) sehen die Schülerinnen und Schüler das neue Konzept als legitim an und die nun möglichen Bestimmung der Reichweite von Wechselwirkungen steigert hingegen sogar noch die Sinnhaftigkeit des Konzeptes. In der Summe wird die kommende Vertiefung der Teilchenphysik somit weiter motiviert.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen qualitativ den Zusammenhang zwischen Wahrscheinlichkeit der Austauschteilchenemission und der Wechselwirkungsstärke, des Weiteren verstehen sie die Legitimation des neuen Konzeptes einerseits durch die Bestätigung des Abstandsgesetzes und andererseits durch die Ermittlung der möglichen Reichweite.

4. Stunde

In dieser Stunde wird die Darstellung von Prozessen mit Austauschteilchen oder allgemein mit Teilchen angesprochen. So hat man in den Folgestunden, bspw. bei Behandlung der Teilchendetektoren, immer die Möglichkeit, Prozesse adäquat zu veranschaulichen. Es handelt sich bei diesen Reaktionen um relativistische Prozesse. Daher werden sie, wie üblich in der Relativitätstheorie, in Raumzeitdiagrammen dargestellt und sollten den Schülerinnen und Schülern schon bekannt sein. Zur Wiederholung sollte daher nochmals angesprochen werden, dass Punkte in diesen Diagrammen Ereignisse repräsentieren, die Ort und Zeit des Teilchens angeben. Ähnlich der Problematik bei t-s-Diagrammen in der Kinematik sind hier also keine direkten Bahnkurven zu sehen.

Diese speziellen Diagramme werden nach ihrem Schöpfer Feynman-Diagramme genannt. Anders als in der Kinematik ist die Zeit auf der Ordinatenachse und der Raum auf der Abszissenachse dargestellt. Im Rahmen der Quantenphysik können hier nur Wahrscheinlichkeiten angegeben werden. Den Schülerinnen und Schülern sollte, in Erinnerung an die letzte Stunde, verdeutlicht werden, dass bei Betrachtung der Bewegung eines Teilchens von P_1 nach P_2 nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über Ort und Impuls gemacht werden können.

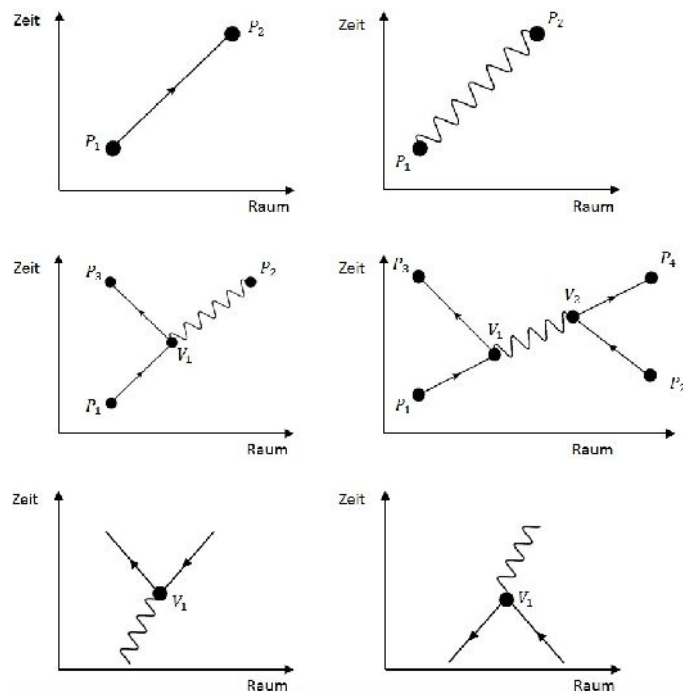


Abbildung 7.50.: Feynman-Diagramme einiger elementarer Prozesse

1. Oben links betrachtet man ein Teilchen, dass mit der Wahrscheinlichkeit $E(P_1, P_2)$ von P_1 nach P_2 fliegt.

2. Oben rechts fliegt ein Photon von P_1 nach P_2 mit der Wahrscheinlichkeit von $P(P_1, P_2)$.
3. Mitte links wird ein Photon von einem geladenen Teilchen, bspw. von einem Elektron, emittiert.
4. Mitte rechts wird ein emittiertes Photon von einem anderen Teilchen absorbiert.
5. Unten links wird aus einem Photon ein Teilchen-Antiteilchen-Paar erzeugt (Paarerzeugung).
6. Unten rechts annihilieren sich ein Teilchen mit seinem Antiteilchen zu einem Photon (Paarvernichtung).

Bei den Bildern in der Mitte ändern sich die „Flugbahnen“¹⁰⁰ der geladenen Teilchen bei der Emission oder Absorption aufgrund der Impulserhaltung. Ein Punkt, in dem eine Emission oder Absorption von Austauschteilchen geschieht, bezeichnet man als Vertex (V_i).

Diese Graphen dienen nicht nur der reinen Veranschaulichung, sondern geben klare Rechenanweisungen an. So wird die Wahrscheinlichkeit des Prozesses in Bild Mitte rechts zu der Gesamtwahrscheinlichkeit (vgl. [MET98, 533]):

$$W_{ges} = E(P_1, V_1) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot E(V_1, P_3) \cdot P(V_1, V_2) \cdot E(P_2, V_2) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot E(V_2, P_4) \quad (7.48)$$

Kurze Erklärung:

Alle Wahrscheinlichkeiten der Teilbewegungen müssen, ähnlich der Pfadregel bei Baumdiagrammen, multipliziert werden. Immer wenn ein Austauschteilchen emittiert bzw. absorbiert wird, unterliegt dies natürlich auch einer Wahrscheinlichkeit. Diese Wahrscheinlichkeit ist hier durch die Kopplungskonstante α der em-Wechselwirkung gegeben (vgl. letzte Stunde).

Für ein besseres Verständnis der Prozesse und zur Steigerung der Eigenaktivität können die Schülerinnen und Schüler mithilfe des Beispiels selber Aufgaben lösen. Zum einen können sie die Gesamtwahrscheinlichkeit mancher Feynman-Diagramme bestimmen und zum anderen können Sie bei Angabe einer Gesamtwahrscheinlichkeit dazu mögliche Feynman-Graphen skizzieren (vgl. A.4).

Eigentlich ist der Begriff Gesamtwahrscheinlichkeit hier irreführend, da er nicht wirklich die Gesamtwahrscheinlichkeit für einen bestimmten Prozess angibt. Die hier dargestellten Prozesse sind immer nur eine Möglichkeit, bspw. können die Vertices auch zeitlich früher oder später geschehen und es wäre letztlich immer noch derselbe Prozess. Dadurch muss eine ungeheure Vielzahl an möglichen Prozessen durchexerziert werden, um an die eigentliche Gesamtwahrscheinlichkeit zu kommen, die sich als

¹⁰⁰Nochmals ist die Lernenden darauf hinzuweisen, dass der Strich nicht im klassischen Sinne als Flugbahn zu deuten ist, sondern vielmehr die Abkürzung eines Prozesses darstellt.

Summe aller Teilwahrscheinlichkeiten darstellen lässt. Aus Elementarisierungsgründen kann dieser Sachverhalt aber problemlos verschwiegen werden. Diese Stunde sollte nur einen kurzen Einblick liefern und den Lernenden die Lösung von Aufgaben ermöglichen, was in der weiteren Unterrichtsreihe aufgrund der Komplexität zunehmend schwieriger zu verwirklichen ist.

Die Schülerinnen und Schüler wissen, dass quantenmechanische Prozesse immer Wahrscheinlichkeiten unterliegen und kennen grundlegende Prozesse in ihrer Darstellung in Feynman-Diagrammen.

5. und 6. Stunde

Das in der 1. Std. angesprochene Yukawa-Teilchen wurde 1947 in der sogenannten Höhenstrahlung, die auch für die Polarlichter verantwortlich ist, gefunden.¹⁰¹ Da ein Nachweis von bestimmten Teilchensorten in der Höhenstrahlung aufwendig und schwierig ist, wurden Teilchenbeschleuniger entwickelt, um Teilchen mit bekannter Geschwindigkeit / Energie zur Erzeugung neuer Teilchen aufeinander treffen zu lassen. Dabei ist den Lernenden schon intuitiv bewusst, dass Teilchen untersucht werden können, indem man sie mit hoher Energie aufeinanderprallen lässt und das Ergebnis betrachtet (z.B. Rutherford'scher Streuversuch). Diese Diskussion kann mithilfe graphischer Darstellungen der Höhenstrahlung und sich ergebender Kaskaden bzw. Teilchenkollisionen in Teilchendetektoren angeregt werden.

Zur besseren Motivation der Schülerinnen und Schüler verlässt man kurz den historischen Rahmen und betrachtet den aktuell genutzten LHC am CERN. Dieser Beschleuniger bzw. dieses Forschungszentrum ist vielen Lernenden höchstwahrscheinlich aus den Medien bekannt, nicht zuletzt aus dem Hollywoodfilm *Illuminati*.

Zunächst ist es notwendig, auf die Funktionsweise eines Beschleunigers einzugehen. Hierbei ist es sinnvoll, diese komplexe Maschine zu elementarisieren und sich auf die wichtigsten Bauteile zu beschränken. Besonders wichtig ist dabei:

1. Die Protonenquelle.
2. Die Ablenkung der Teilchen mittels *Dipolmagneten*.
3. Die Fokussierung der Teilchen mittels *Quadrupolmagneten*.
4. Der *Detektor* zur Teilchenidentifizierung.

Zu allen Bauelementen gibt es ausführliche Erklärungen, schematische Bilder, Fotografien und Animationen im Internet, bswp. auf www.lhc-facts.ch oder www.teilchenwelt.de zu finden. Die eigentliche Möglichkeit zur Beschleunigung von Teilchen werden die Schülerinnen und Schüler schon kennen (E-Feld). Dies sollte nur kurz wiederholt werden. Auf die verwendeten Hohlraumresonatoren (Kavitäten) einzugehen

¹⁰¹Kurzer Rückgriff auf die Quantenmechanik möglich.

ist nicht erforderlich. In der ersten Stunde können Gruppen gebildet werden, die zu einem gewählten Bauteil eine kleine Internetrecherche vornehmen und eine kurze Zusammenfassung formulieren. Dies kann in der zweiten Stunde vorgestellt werden. An dieser Stelle wird kurz auf die wichtigsten Einzelkomponenten eingegangen.

zu 1. Protonquelle

Freie Elektronen werden mithilfe einer Glühkathode erzeugt und zu einem Strahl gebündelt. Die beschleunigten Elektronen werden danach auf Wasserstoffgas geschossen, dieses wird dabei ionisiert und der Kern (ein Proton) mittels einer negativ geladenen Elektrode angezogen und beschleunigt.

zu 2. Dipolmagnete

Die Protonen werden mithilfe von Dipolmagneten (Lorentzkraft) auf eine Kreisbahn gezwungen.

zu 3. Quadrupolmagnete

Auf dieses Bauelement sollte etwas ausführlicher eingegangen werden, da die Lernenden hier erfahrungsgemäß nur wenige Vorkenntnisse haben. Nach einer schematischen Darstellung der Quadrupolmagnete inklusive deren Feldlinienverlauf und der Erklärung zur möglichen Fokussieren mittels der Lorentzkraft, kann die Funktionsweise auch experimentell veranschaulicht werden.

Dazu bedient man sich bei den einzelnen Komponenten des elektrischen Motors. Dieser Bausatz ist meist in jeder aufgeräumten Physiksammlung zu finden. Daraus benötigt man vier Polschuhe mit den passenden Spulen. Diese schraubt man auf eine Holzbrett und bohrt ein Loch mittig zwischen die Magnete (vgl. Bild). Durch dieses Loch führt man einen später stromführenden Draht.

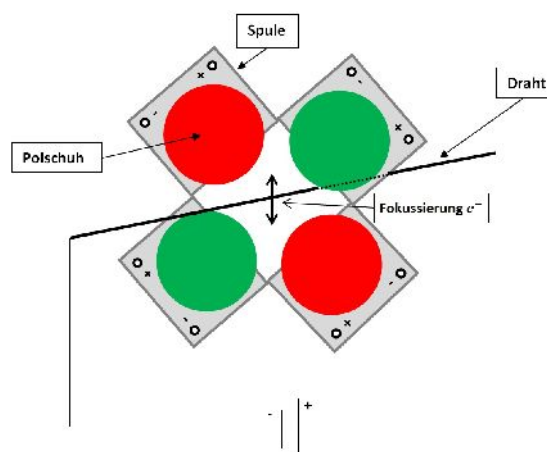


Abbildung 7.51.: Fokussierung mittels Quadrupolmagnet

Den Draht lässt man nun leicht durchhängen und schließt ihn an eine Spannungsquelle an. Bei richtiger Polung der Spulen kann man eine Anhebung (Fokussierung in y-Richtung) erkennen. Bei Drehung der Apparatur um 90° erreicht man analog eine Verschiebung nach rechts / links (Fokussierung in x-Richtung). Mit diesem Analogieexperiment kann sehr anschaulich die Funktionsweise der Quadrupolmagneten gezeigt werden. Um gut sichtbare Ergebnisse zu erhalten, sind relativ große Ströme durch die Spulen und den Draht vonnöten, die eigentlich für die jeweiligen Bauteile nicht zulässig sind. Aber bei nur kurzzeitiger Inbetriebnahme stellt dies kein großes Problem dar. Vor allem Batterien mit hohen Kapazitäten eignen sich hierbei als Stromquelle.

zu 4. Teilchendetektor

Als Beispiel wähle ich den bekannten ATLAS-Detektor. Hier treffen die beiden Protonenstrahlen mit einer hohen Energie / Geschwindigkeit aufeinander und erzeugen dabei neue Teilchen / Antiteilchen-Paare.

Der Detektor besteht aus drei Hauptdetektorkomponenten, dem inneren Detektor, dem Kalorimeter und dem Myonensystem.

- **Innerer Detektor**

Nahe am Wechselwirkungspunkt befindet sich der innere Detektor, der von einem starken Magnetfeld durchsetzt ist. Damit werden im Detektor die Teilchenspuren je nach Ladung und Impuls gekrümmt, wodurch erste Teilchenidentifizierungen möglich sind.

- **Kalorimeter**

Das elektromagnetische Kalorimeter absorbiert und misst die Energie der produzierten Elektronen und Photonen. Es wird umschlossen vom deutlich größeren hadronischen Kalorimeter in welchem die Energie bspw. von Neutronen und Protonen gemessen wird.

- **Myonen-Spektrometer**

Hier werden spezielle Teilchen - die Myonen - mittels Krümmungsuntersuchung gemessen.

Das hadronische Kalorimeter sowie das Myonenspektrometer werden nur kurz angesprochen. Ein tiefergehender Eingang kann erst erfolgen, nachdem die Teilchen aus dem Standardmodell bekannt sind.

Die Schülerinnen und Schüler verstehen die Komponenten eines Kreisbeschleunigers und haben erste Eindrücke von der Teilchenidentifizierung mittels Detektoren.

7. Stunde

Zu Beginn der Stunde werden die wichtigsten Einheiten der Teilchenphysik wiederholt; zum Großteil werden sie aber aus der Quantenmechanik bekannt sein. Die Schülerinnen und Schüler müssen sich dabei weiter daran gewöhnen, dass ihre bekannten Größen *Energie*, *Masse* und *Impuls* in Vielfachen von Elektronenvolt (eV) angegeben werden.

Eine kinetische Energie von einem Elektronenvolt ($1eV$) hat ein Teilchen, wenn es eine Potentialdifferenz von einem Volt durchlaufen hat.

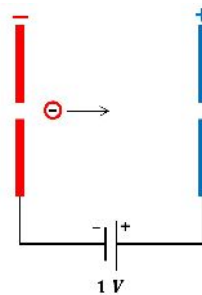


Abbildung 7.52.: Nachdem das Teilchen die zweite Platte erreicht hat, weist es eine Energie von $1eV$ auf.

Dabei entspricht $1eV \approx 1,6 \cdot 10^{-19} J$. Da dies eine sehr kleine Energieportion ist, wird sie meist mit den bekannten Präfixen versehen.

$$1keV = 10^3eV, 1MeV = 10^6eV, 1GeV = 10^9eV, 1TeV = 10^{12}eV$$

Mithilfe der relativistischen Energiebeziehung $E = mc^2$ werden hiermit auch die Masse ($m = \frac{E}{c^2}$) und der Impuls ($p = \frac{E}{c}$) ausgedrückt. Beispielsweise ergibt sich damit die Ruhemasse des Elektrons zu $m_e = 0,511 \frac{MeV}{c^2}$ oder die des Protons zu $m_p = 938,3 \frac{MeV}{c^2}$. Vorteilhaft bei dieser Schreibweise ist unter anderem die bessere Erkenntlichkeit von Größenordnungen. Um später Verständlichkeitsprobleme zu vermeiden, muss kurz besprochen werden, dass in der Teilchenphysik die Darstellung noch kompakter ist und die Lichtgeschwindigkeit gleich 1 gesetzt wird ($c = 1$). Dadurch müssen Aufgaben sehr genau gelesen werden, da die Energie, die Masse und der Impuls dieselbe Einheit zugeschrieben bekommen.

Nach dieser kurzen Wiederholung wird wieder an die letzten Stunden (der Teilchensuche) angeknüpft. In der kosmischen Strahlung sowie bei Stoßprozessen in immer besser werdenden Teilchenbeschleunigern wurden in den 50er und 60er Jahren eine Vielzahl neuer Teilchen gefunden.

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

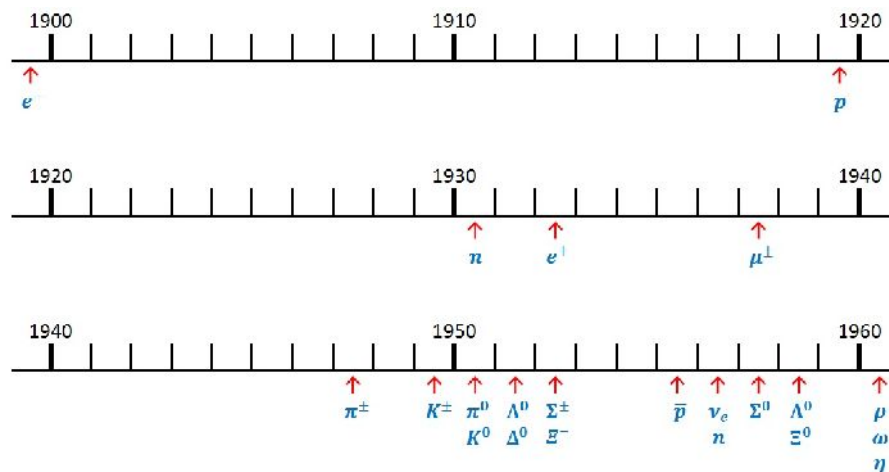


Abbildung 7.53.: Zeitstrahl der entdeckten Teilchen bis 1962

Vor deren Entdeckung schien alles recht einfach zu sein, es gab Elektronen, Protonen und Neutronen, aus denen unsere Materie aufgebaut ist. Des Weiteren gab es noch das Yukawa-Teilchen und das Photon; das eine verantwortlich für den Zusammenhalt im Kern, das andere für den Zusammenhalt des Kerns und der Hüllenelektronen. Die Welt schien einfach zu sein. Jetzt gab es eine nichtverstandene Vielzahl an Teilchen mit unterschiedlichen Massen und Ladungen, die keinem Ordnungsschema zu gehorchen schienen. Obendrein hat sich das Yukawa-Teilchen (jetzt $\pi^{\pm,0}$ (Pion)) bei genauerer Betrachtung seiner Eigenschaften nicht als Austauscheteilchen der starken Kernkraft bewährt.¹⁰²

Die Frage einer möglichen Erklärung kann an die Schülerinnen und Schüler weitergegeben werden. Dabei erhält man gelegentlich die richtige Antwort, dass diese Teilchen wiederum aus kleineren Teilchen bestehen, aus denen sich die Größeren zusammensetzen. Es hat sich als äußerst nutzbringend erwiesen, eine Analogie zum Periodensystem der Elemente zu bilden. Es gibt eine Vielzahl an Elementen mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften und ihre Vielfalt sowie ein Ordnungsschema konnte erklärt werden, nachdem entdeckt wurde, dass sie letztendlich nur aus verschiedenen Konfigurationen von Protonen, Neutronen und Elektronen bestehen.

Zur Erforschung eines ausgedehnten Objekts können Streuexperimente unternommen werden, ggf. sind diese schon aus dem Rutherford'schen Streuversuch bekannt. In einem Analogieexperiment sollen Sandkörner - die Partikel darstellen - auf größere Körper - die subatomare Objekte darstellen - gestreut werden. Das entstehende Gebilde auf dem Tisch lässt sich als Aufsummierung von Teilchenspuren in einem Detektor verstehen (vgl. Abbildung 7.54).

¹⁰²Das Pion wechselwirkte viel zu schwach mit Kernen, als dass es als Austauscheteilchen der Kernkraft in Frage käme.



Abbildung 7.54.: Analogieversuch zu Streuexperimenten: Der bestreute Körper ist hinter einer Abdeckung für die Schülerinnen und Schüler versteckt. Bei Betrachtung der Streubilder wird aber richtig darauf geschlossen, dass es sich links um eine große und rechts um drei kleine Kugeln handeln könnte.

Tatsächlich wurde bei Streuexperimenten von Elektronen auf Protonen eine ausgedehnte (Ladungs)-Struktur erkannt. Das Proton sowie das Neutron sollten aus drei Subteilchen - den Quarks - bestehen. Es mussten aber, da sich Neutron und Proton sowohl in Masse als auch in ihrer Ladung unterscheiden, zwei unterschiedliche Quarks sein, das up-Quark (u) und das down-Quark (d). Die jeweils nötige Ladung und Konfiguration der beiden Quarks kann, mithilfe eines Arbeitsblatts, als Aufgabe an die Schülerinnen und Schüler gegeben werden (vgl. A.4).

Lösung:

- Das u -Quark hat eine elektrische Ladung von $+\frac{2}{3}$ und eine Masse von $m_u \approx 2,3 \text{ MeV}$.
- Das d -Quark hat eine elektrische Ladung von $-\frac{1}{3}$ und eine Masse von $m_d \approx 4,8 \text{ MeV}$.

Mit diesen elektrischen Ladungen wären nur folgende Konfigurationen für das Proton / Neutron möglich:

$$\begin{aligned}
 (uud) &\hat{=} +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1 \hat{=} p \\
 (udd) &\hat{=} +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0 \hat{=} n
 \end{aligned}$$

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

Natürlich gibt es aus erhaltungstechnischen Gründen - ein Teilchen kann nur mit seinem Antiteilchen entstehen - auch die zugehörigen Antiteilchen mit entgegengesetzter Ladung: Das Anti-up-Quark ($\bar{u}$) mit der Ladung $q_{\bar{u}} = -\frac{2}{3}$ und das Anti-down-Quark ($\bar{d}$) mit der Ladung $q_{\bar{d}} = +\frac{1}{3}$. Es ist nicht ratsam, die Schülerinnen und Schüler für das Problem der drittelzahligen Ladung zu sensibilisieren, dadurch könnten die neuen Erkenntnisse recht schnell abgelehnt werden und die weitere Motivation für die Unterrichtsreihe sinken. Wichtig ist nur, dass in der Natur bisher nur ganzzahlige Ladungen entdeckt wurden und somit die zusammengesetzten Teilchen immer ganzzahlige Ladungen aufweisen. Die wichtige Schlussfolgerung, die den Schülerinnen und Schülern klar zu machen ist, ist dass durch die Ganzzahligkeit der Ladung nur bestimmte Quarkkombinationen möglich sind (vgl. A.4).

Bekannte Bestandteile der Welt:

$\gamma, e^-, e^+, \nu_e, \bar{\nu}_e, u, \bar{u}, d, \bar{d}$, Verworfen $Y^{\pm,0}$

Die Schülerinnen und Schüler erkennen die Sinnhaftigkeit vorgeschlagener Subteilchen innerhalb der Nukleonen und können deren innere Ladungskonfiguration nachvollziehen.

8. und 9. Stunde

Neben dem up-Quark und dem down-Quark gab es durch die mannigfachen Teilchenfunde starke Hinweise darauf, dass es noch ein weiteres Quark geben musste. Die zugehörigen Entstehungs- und Zerfallsprozesse, in welchen dieses Quark beteiligt war, waren sehr seltsam. Aus diesem Grund wurde es auch strange-Quark (s) genannt, es besitzt die elektrische Ladung $-\frac{1}{3}$ und die Masse $m_s \approx 95 \text{ MeV}$. Dadurch wurde ein mögliches Ordnungsschema wiederum erschwert. Eine mögliche Lösung fand 1961 der Physiker Murray Gell-Mann, der die verschiedenen Teilchen in sogenannten Multipletts anordnete. Vereinfacht für die Lernenden wird hier die Seltsamkeit (Anzahl s-Quarks) gegen die elektrische Ladung aufgetragen¹⁰³:

¹⁰³Die Benennungen als achtfachen Weg mithilfe weiterer Quantenzahlen führt in den meisten Fällen zu weit und ist auch nicht weiter nutzbringend.

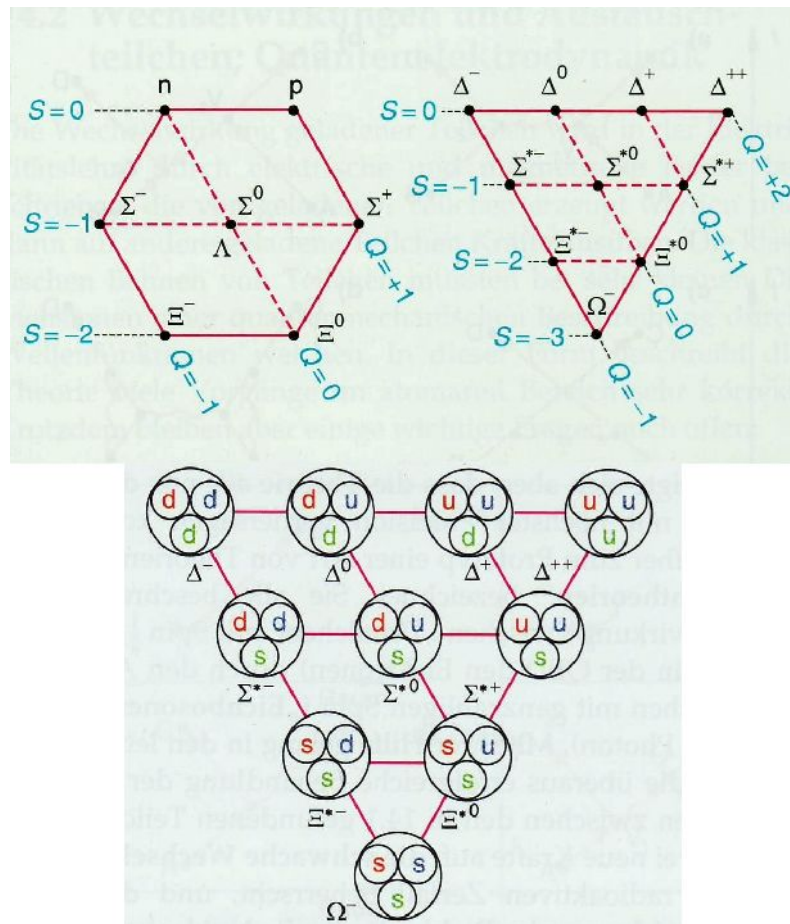


Abbildung 7.55.: Das Baryonen Oktett und Dekuplett. Unten ist das Dekuplett nochmals mithilfe der jeweiligen Quarks dargestellt.[MET98, 534]

Die kurze Erwähnung der Multipletts ist für die weitere Reihe nicht tiefergehend von Bedeutung und kann bei Zeitmangel auch übersprungen werden. Bei ambitionierten Kursen, die nach Hinweisen auf die Richtigkeit der Theorie drängen, sollte der kurze Ausflug unternommen werden. Das Dekuplett in Abbildung 7.55 zeigt 10 Teilchen, wovon 9, bis auf das Teilchen Ω^- mit drei s-Quarks, damals schon entdeckt waren. Das Ω^- -Teilchen wurde mithilfe dieser Darstellung 1961 erstmals nur vorhergesagt, man konnte sogar schon theoretisch die Masse angeben. Entdeckt wurde es dann schließlich 1964 und bestätigte somit die aufgestellte Theorie.

Bedingt durch die existierenden Antiteilchen können noch wesentlich mehr Kombinationen - sprich Teilchen - gebildet werden, aber immer mit der Einschränkung der ganzzahligen Ladung. Speziell sind hier Teilchen zu nennen die nur aus zwei Quarks, einem Quark und seinem Antiquark bestehen. Dazu gehört das schon bekannte Pion. Das positive Pion besteht aus einem u und einem $\bar{d}$. Da es schwerer als ein Elektron ist, aber leichter als ein „drei-quarkiges“ Proton, wurden diese Teilchen

Mittelgewicht genannt.

Hier eine Listung der zugehörigen Fachbegriffe:

Bezeichnung	Bedeutung	Aufbau	Beispiel
Leptonen	leicht	elementar	e^-
Mesonen	mittel	$q\bar{q}$	π
Baryonen	schwer	qqq	n, p

Tabelle 7.1.: Teilchenklassifizierung und deren Benennung

Einleitend hat man sich im Unterrichtsgang mit den Schülerinnen und Schülern die starke Kernkraft über den Austausch von Yukawa-Teilchen vorgestellt. Dieses Bild muss nach Entdeckung der Quarks überdacht werden. Experimentell wurde herausgefunden, dass das *Yukawa*-Teilchen ein zusammengesetztes Teilchen ist und somit als Austauschteilchen zwischen Quarks nicht in Frage kommt.

Wie binden sich also die Quarks im Inneren eines Nukleons? Vorgeschlagen und gefunden wurde wiederum ein Austauschteilchen, das Gluon g . Bevor man weiter auf die Bindeeigenschaften des Gluons eingeht, müssen zwei elementare Wechselwirkungen von Austauschteilchen beleuchtet werden, zum einen die Vernichtung von aufeinandertreffenden Teilchen-Antiteilchen-Paaren unter Aussendung von Austauschteilchen und zum anderen der Umkehrprozess, die Erzeugung eines Teilchen-Antiteilchen-Paares durch ein Austauschteilchen. Dies kann optimal am Beispiel der em-Wechselwirkung geschehen. Hier wurde im Rahmen der Kernphysik die Paarzeugung ($\gamma + K \longrightarrow e^- + e^+$) sowie die Paarvernichtung ($e^- + e^+ \longrightarrow \gamma + \gamma$) in den meisten Fällen behandelt.

Die grünen Kreise sollen die drei Quarks des Protons (uud) darstellen, man nennt sie Valenzquarks. Aber es sind noch viele weitere Quarkpaare zu erkennen. Die Paare sind die durch Gluonen entstehenden Quark-Antiquark-Paare ($q\bar{q}$), auch Seequarks genannt. Dieses Teilchenvielzahl fand man in Experimenten, bei denen Protonen auf Protonen geschossen wurden. Die Anzahl an Ereignissen war so groß, dass sie nicht allein durch sechs aufeinandertreffende Quarks zu erklären war. Wichtig ist hierbei, als Erkenntnis der Schülerinnen und Schüler, dass die Seequarks rein virtuelle Teilchen sind, da man ansonsten mitunter eine Schwankung der Protonmasse verzeichnen würde.

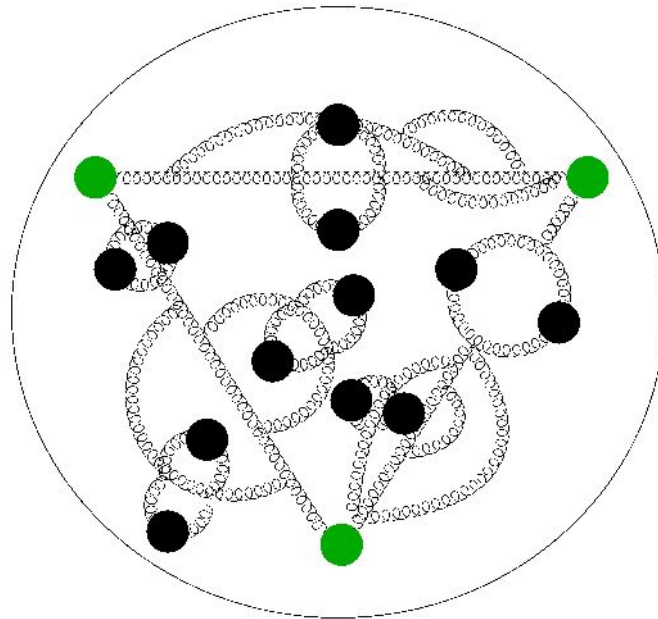


Abbildung 7.56.: Darstellung des Aufbaus eines Protons

Den Schülerinnen und Schülern wird aber eine weitere, sehr wichtige Eigenschaft auffallen. Auf dem Bild erkennt man, dass es Verbindungen zwischen Gluonen gibt, bei der Gluonen aneinander koppeln und somit eine Selbstwechselwirkung aufweisen. Dies betrifft das Photon nicht. Darauf gekommen ist man dadurch, dass die Reichweite der starken Wechselwirkung sehr gering ist, aber die Gluonenmasse, wie die des Photons, null ist. Beide Faktoren können bei Betrachtung der Energieunschärfe nur durch eine Selbstwechselwirkung der Gluonen erklärt werden.

Die folgenden Zusammenhänge können je nach Zeit und Leistungsvermögen der Lernenden unterschiedlich detailliert behandelt werden.

Variante 1:

Im Lehrervortrag: Die Gluonen übermitteln die stärkste bisher beobachtete Kraft. Diese starke Kraft wird auch Farbkraft genannt, sie wird ähnlich der elektrischen Ladung von Farbladungen erzeugt, nur dass es nicht wie in der Elektrizität eine Ladung, sondern drei verschiedene Farbladungen gibt - rot, grün und blau -, was wahrscheinlich auch zur Namensgebung geführt hat. Auch hier gibt es jeweils positive Ladungen (rot, grün, blau) und negative Ladungen (antirot, antigrün, antiblau). Die Anziehungskraft zwischen Farbladungen ist wesentlich größer als zwischen elektrischen Ladungen, ansonsten würden sich die positiv bzw. negativ elektrisch geladenen Quarks abstoßen und nicht anziehen. Die Elektronen haben nur eine elektrische- und keine Farbladung, aus diesem Grund spüren sie die starke Kraft nicht bzw. können nicht mit den Gluonen wechselwirken.

Variante 2:

Eine weitere Eigenschaft kann durch die Schülerinnen und Schüler im Unterrichtsgespräch erschlossen werden. Dazu wird auf folgendes historische Problem hingewiesen: Es gibt ein zweifach positiv geladenes Teilchen, das Δ^{++} mit Spin $\frac{3}{2}\hbar$, also einer Quarkkonfiguration von $(u \uparrow u \uparrow u \uparrow)$, alle Quarks (je Spin $\frac{\hbar}{2}$) haben einen parallelen Spin. Damit stimmen die drei u -Quarks in allen bekannten Quantenzahlen überein, was das *Pauli-Prinzip* für Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen verbietet. Wie könnte eine mögliche Lösung dieses Problems aussehen, wenn man das *Pauli-Prinzip* nicht aufgeben will?

Im Plenum sollte sich herauskristallisieren, dass die Einführung einer neuen Quantenzahl unumgänglich ist. Diese sollte in drei unterschiedlichen Varianten auftauchen, womit die Existenz des Δ^{++} und die Erhaltung des *Pauli-Prinzips* gewährleistet wäre. Tatsächlich erhielt dies experimentelle Bestätigung bei der Reaktion $e^- + e^- = q + \bar{q}$, die eine dreimal höhere Wechselwirkungsrate aufwies als theoretisch berechnet.

Die neue Quantenzahl wird Farbe genannt und tritt konventionell in den Farben rot, grün und blau auf. Somit hat das Δ^{++} den Zustand $(u_{\text{rot}} u_{\text{grün}} u_{\text{blau}})$ (vgl. [GRU07, 40]). Jede dieser Ladungsarten kann, äquivalent zur elektrischen Ladung, ein Minuszeichen haben, also antirot, antigrün und antiblau. Quarks weisen Farbladung und Antiquarks Antifarbladung auf, sodass sie der additiven Farbmischung entsprechend in Summe weiß sind¹⁰⁴.

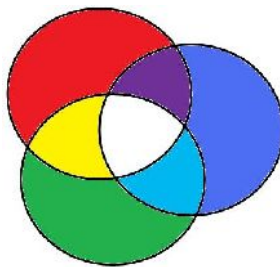


Abbildung 7.57.: Farblose Quarkkombination, wobei antirot als cyan, antigrün als purpur und antiblau als gelb dargestellt wird.

Da das Gluon mit sich selbst wechselwirken kann, trägt es, anders als beim Photon, auch eine Farbladung und zwar zwei Farben, da beim Aussenden eines Gluons durch ein farbiges Quark dieses Quark seine Farbe wechselt. Das Quark, welches dieses Gluon einfängt, wechselt beim Einfang auch die Farbe, sodass das Proton nach außen hin farblos bleibt. Dieses Gluon muss somit die beiden Farben tragen, die in dem Farbwechsel der Quarks involviert sind. Über diesen ständigen Farbwechsel mit Gluonaustausch wird die Bindung der Quarks bewerkstelligt.

Nun können die Schülerinnen und Schüler überlegen, wie viele unterschiedliche Gluonen es geben müsste, so dass der Farb/Antifarbe-Wechsel zwischen Quarks/Antiquarks

¹⁰⁴Aus anschaulichen Gründen wurden die Farben als Quantenzahl gewählt.

gewährleistet ist. Durch Ausprobieren und dem Hinweis, dass man Wechselwirkungen ohne Farbänderung beachten muss, werden sie schnell auf die richtige Antwort von acht Gluonen kommen. Abbildung 7.58 zeigt anschaulich, wie man sich den ständigen Farbwechsel im Proton vorstellen kann.

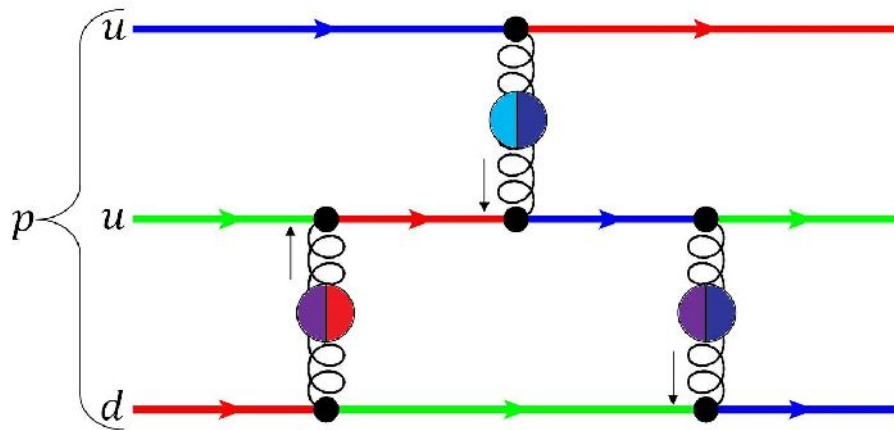


Abbildung 7.58.: Emission und Absorption von Gluonen im Proton

In beiden Varianten sollte zum besseren Verständnis der neuen Ladung die gravitative Wechselwirkung involviert werden. So kann man als Beispiel anführen, dass Elektronen gravitativen und elektrischen Einflüssen unterliegen, sie haben sowohl eine Gravitationsladung (Masse) als auch eine elektrische Ladung. Quarks hingegen unterliegen zusätzlich einem „farbigen“ Einfluss, sie haben also eine Gravitations-, eine elektrische und eine Farbladung.

Zuletzt widmet man sich der Stärke der Kopplung. Auch hier erwartet die Schülerinnen und Schüler eine weitere Besonderheit der starken Wechselwirkung. Die Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung kann zwischen Werten von $\alpha_{stark} = 0,1$ bis zu $\alpha_{stark} = 1$ variieren.

Man stelle sich die Gluonen als Gummibänder vor, deren Länge ungefähr dem Protonendurchmesser von 1 fm entspricht. Wenn die Quarks sich im „Inneren“ des Protons befinden, sind sie relativ schwach mit $\alpha_{stark} = 0,1$ gebunden. Wenn man nun zwei Protonen in einem Speicherring mit sehr hoher Energie zusammenstoßen lässt, würde man erwarten, dass die Gluonen „zerreißen“ und zwei freie Quarks entstehen. Das ist aber nicht der Fall. Wie bei einem Gummiband muss man mit wachsendem Abstand immer kräftiger ziehen, die Quarks sind demnach asymptotisch mit $\alpha_{stark} \xrightarrow{r \rightarrow 1\text{ fm}} 1$ gebunden, man spricht von asymptotischer Freiheit. Also müsste man unendlich große Energie aufwenden, um die Quarks zu trennen. Aufgrund der Selbstwechselwirkung der Gluonen entstehen bei genügend hoher Energie an der eigentlichen „Bruchstelle“ allerdings neue Gluon-Antigluon-Paare mit neuen Quark-

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

Antiquark-Paaren (vgl. [DEM10, 200 f.]). Dieser schwierige Umstand lässt sich mit Abbildung 7.59 verdeutlichen.

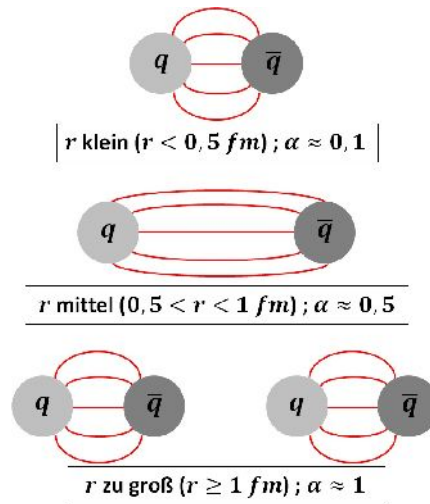


Abbildung 7.59.: Veranschaulichung der Kopplungsstärke und des Quarkschlusses

Um wieder an den Beginn der Stunde anzuknüpfen, wird der letztendliche Zusammenhalt des Atomkerns somit über die Restwechselwirkung der Gluonen erklärt. Wenn zwei Nukleonen genügend nah aneinander kommen, können jeweils die Gluonen mit einander wechselwirken, aber es können auch Quarks ausgetauscht werden, vorausgesetzt jedes einzelne Nukleon behält die ganzzahlige Ladung. Hier kann man wieder zur besseren Veranschaulichung auf die kovalente Elektronenbildung in Molekülen hinweisen. Veranschaulichen kann man dies mit der schematischen Darstellung eines Heliumkerns.

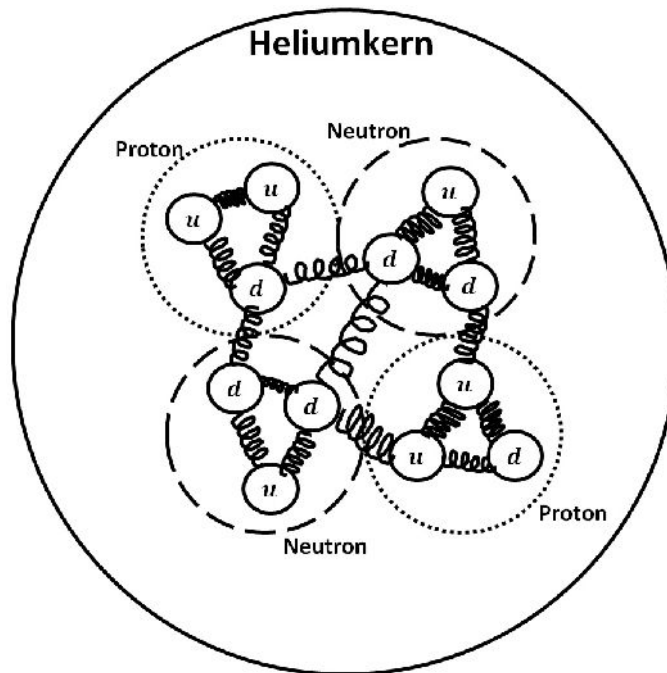


Abbildung 7.60.: Zusammenhalt des Heliumkerns durch die Restwechselwirkung von Gluonen. Die bekannte Kernkraft ist ein Resteffekt der noch stärkeren Farbkraft.

Bei genügend Zeit oder bei einer Auslagerung in die Hausaufgabe können weitere Quarkverbindungen untersucht werden. Bisher wurden nur Dreier- und Zweierverbindungen aus Quarks und Antiquarks untersucht, da stellt sich die Frage, ob es noch weitere Verbindungen mit ganzzahliger Ladung geben kann.

Als Aufgabe könnten die Lernenden leicht die elektrischen Ladungen aller Kombinationen aus vier oder fünf Quarks und Antiquarks ausrechnen und schauen, welche eine ganzzahlige Gesamtladung aufweisen.

Man erhält dabei folgendes Ergebnis:

Alle Viererverbindungen mit ganzzahliger Ladung bestehen aus zwei Quarks und zwei Antiquarks. Man kann sie sich als Verbindungen von zwei Mesonen vorstellen. Alle Fünferverbindungen mit ganzzahliger Ladung bestehen entweder aus vier Quarks und einem Antiquark, oder aus vier Antiquarks und einem Quark. Man kann sie sich also immer als Verbindung eines Mesons und eines Baryons vorstellen.¹⁰⁵ Für die Existenz solcher Vierer- und Fünferverbindungen gibt es bis heute keine Beweise [WAL89a, 39].

Eine mögliche, die Lernenden zufriedenstellende, Antwort wäre, dass aus energetischer Sicht ein Meson und ein Baryon günstiger ist als eine fünfer Quarkverbindung. Zu den möglichen Viererquarkverbindungen aus $u, \bar{u}, d, \bar{d}$ ist eine passende Folie im Anhang (vgl. A.4) zu finden. Auf der Folie werden nur die entstehenden π -Mesonen

¹⁰⁵Hier treten sogar Ladungen +3 und -3 auf.

angegeben, die zugehörigen angeregten Zustände - die ρ -Mesonen - werden aus Elementarisierungsgründen nicht tiefer erwähnt.

Bekannte Bestandteile der Welt:

$\gamma, e^-, e^+, \nu_e, \bar{\nu}_e, u, \bar{u}, d, \bar{d}, s, \bar{s}, g$

Die Schülerinnen und Schüler verstehen den Zusammenhalt des Kerns über die Gluonenwechselwirkung und können die Einführung der Quantenzahl „Farbe“ nachvollziehen.

10. und 11. Stunde

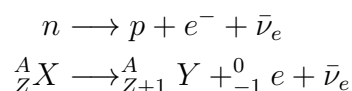
Aufgrund der „Lebendigkeit“ der Elementarteilchenphysik im 20. Jhd. ist eine sprunglose chronologische Vorgehensweise in einem adäquaten didaktischen Rahmen sehr schwierig. Deshalb wird der zeitliche Werdegang nun etwas aufgebrochen und mithilfe des aktuellen Schülerwissens über die starke Wechselwirkung die eigentlich historisch früher angesiedelte Theorie der schwachen Wechselwirkung fachdidaktisch erschlossen.

Am Ende der letzten Stunde wurde der Zusammenhalt des Kerns letztendlich über die Restwechselwirkung der starken bzw. der Farbkraft erklärt. Gluonen unterschiedlicher Hadronen wechselwirken oder es werden Quarks ausgetauscht, wodurch der Atomkern seine Bindung erhält. Bei letzterem können die Nukleonen aber nur ihre Eigenschaften tauschen, sprich die Gesamtzahl der Protonen und Neutronen bleibt im Kern immer gleich (kein Elementwechsel).

Des Weiteren bedeutet dieser Quarktausch eine Umwandlung bspw. von einem Neutron in ein Proton, so wie es schon in der Theorie von Yukawa angenommen wurde. Diesen Umstand der Teilchenumwandlung sollten die Schülerinnen und Schüler aber schon länger kennen, das Thema sollte nun vom Lehrer durch einen Impuls aufgegriffen werden.

Die Sprache ist vom radioaktiven Zerfall.

Unter Aussendung eines Elektrons und eines Elektronenantineutrinos verwandelt sich hierbei auch ein Neutron in ein Proton, wobei sich aber natürlich die Anzahl der Neutronen im Kern um eins verringert und die Anzahl der Protonen um eins gesteigert wird, sprich eine Elementänderung stattfindet:



Das ist sehr verwirrend und könnte bei den Schülerinnen und Schülern zu einem kognitiven Konflikt führen; einerseits sorgt ein Umwandlungsprozess für den Zusammenhalt des Kerns, andererseits stellt ein anderer Umwandlungsprozess eine echte Elementumwandlung unter radioaktiven Zerfall dar.

Die Lösung dieses Problems kann von den Lernenden nicht selbst erfolgen, sondern

muss vom Lehrer dargelegt werden.

Weitere Auffälligkeit zur Entschlüsselung des Prozesses sind zu benennen:

- Halbwertszeiten bei radioaktiven Prozessen sind meist sehr lang. Bei Prozessen der starken Wechselwirkung (Kernzusammhalt, Zerfall) sind Größenordnungen von $10^{-23}s$ üblich.

starke Wechselwirkung $\nmid$

- Ein elektrisch neutrales Teilchen zerfällt, wodurch es recht unwahrscheinlich ist, dass eine em-Wechselwirkung vorliegt.

em-Wechselwirkung $\nmid$

- Die Gravitation spielt in solch kleinen Längen- bzw. Massedimensionen fast keine Rolle.

gravitative Wechselwirkung $\nmid$

Anscheinend passt keine bekannte Wechselwirkung, wodurch eine mögliche Lösung induziert wird, dass hier eine weitere, neue Wechselwirkung ins Spiel kommt.¹⁰⁶ Dies schlug 1933 der Physiker Enrico Fermi vor. Auch diese Wechselwirkung soll durch ein Austauschteilchen vermittelt werden, um die neue Theorie der Wechselwirkungen zu bestätigen. Tatsächlich wurde experimentell zwischen der Verwandlung von Neutron und Proton ein sehr kurzer elektrisch geladener Zwischenzustand entdeckt.

$$n \longrightarrow \text{geladener Zustand} \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Dieser Zwischenzustand ist das ausgesendete, geladene Austauschteilchen. Die nötigen Austauschteilchen werden auch Weakonen (aus dem englischen weak = schwach) genannt, von denen es drei gibt: das positive W^+ , das negative W^- und das neutrale Z^0 .

Bei der nun schon bekannten Quarkzusammensetzung kann die Umwandlung der Nukleonen auf die Umwandlung eines d-Quarks in ein u-Quark zurückgeführt werden. Damit kann der β^- -Zerfall über das Austauschteilchenkonzept dargestellt werden.

¹⁰⁶Wenn Sachverhalte mit Bekanntem nicht erklärt werden können, muss das Theoriegebilde ergänzt werden. Dies ist ein schöner Anknüpfungspunkt, um über den Fort- bzw. Werdegang von Naturwissenschaften zu diskutieren.

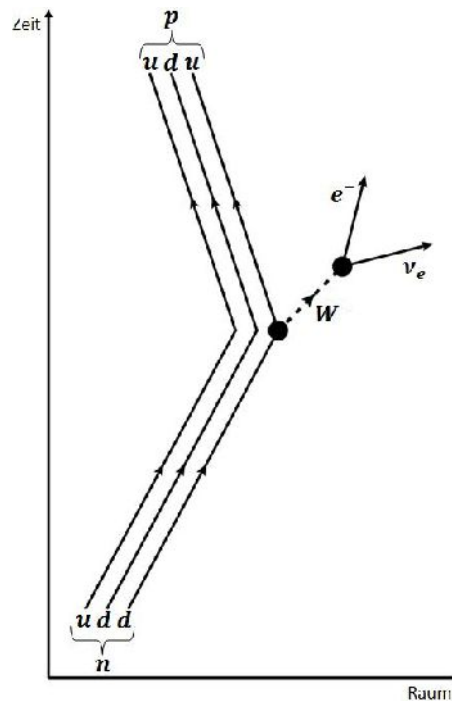


Abbildung 7.61.: Der β^- -Zerfall aus Quarksicht, dargestellt mithilfe von Austausch-
teilchen der schwachen Wechselwirkung

In symbolischer Schreibweise ergibt sich der Prozess im Teilchenbild zu:

$$n \longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

und im Quarkbild zu:

$$d^{-\frac{1}{3}} \longrightarrow u^{+\frac{2}{3}} + e^- + \bar{\nu}_e$$

In Worten: Das d -Quark wandelt sich unter Aussendung eines W^- -Bosons in ein u -Quark um. Der beobachtete geladene Zwischenzustand, das W^- , zerfällt kurz danach in ein Elektron und ein Elektronenantineutrino.¹⁰⁷ Die beiden anderen u -, d -Quarks bilden mit dem neu entstandenen u -Quark ein Proton.

Zur Wiederholung des fundamentalen Energiesatzes und der Existenz von Antiteilchen kann kurz der β^+ -Zerfall

$$p \longrightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$u \longrightarrow d + W^+ \quad W^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e$$

¹⁰⁷Das Austauschteilchen nimmt sozusagen die Ladung mit und gewährleistet die Ladungserhaltung (lokale Ladungserhaltung).

angesprochen werden, mit dem Hinweis, dass sich das Proton im Endeffekt auf diese Art in ein Neutron verwandeln könnte, aber das Proton leichter als die Summe der Massen seiner soeben gezeigten Zerfallsprodukte ist und das System somit im Endzustand mehr Masse (Energie) besitzt als im Anfangszustand. Theoretisch könnte es andere Zerfallskanäle geben ($p \rightarrow e^+ + \pi^0$), da so etwas noch nie beobachtet wurde und das Proton das leichteste Baryon ist, postuliert das Standardmodell eine Baryonenzahlerhaltung.¹⁰⁸ Um den Schülerinnen und Schülern den Werdegang von Naturwissenschaften weiter zu verdeutlichen, sollte erwähnt werden, dass es auch Theorien gibt (bspw. die GUT) die den hypothetischen Zerfall eines Protons bzw. seine Instabilität annehmen und somit keine Baryonen- und Leptonenzahlerhaltung unterstützen. Aus diesem Grund wird intensiv nach einem Protonzerfall gesucht, um das Standardmodell entweder weiter abzusichern (bei Stabilität) oder es zu erweitern (bei Instabilität).¹⁰⁹

Äquivalent zur elektromagnetischen, starken und gravitativen Wechselwirkung koppelt dieses Austauschteilchen auch an eine Ladung, die schwache Ladung genannt wird. Die Stärke der Kopplung, die ein Maß für die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit ist, hat einen sehr kleinen Wert von $\alpha_{\text{schwach}} \approx 10^{-14}$. Die Kopplung ist also sehr schwach, was namensgebend für die schwache Wechselwirkung ist. Mit Formel 7.44 haben die Schülerinnen und Schüler mit Hilfe der Masse des Austauschteilchens die Reichweite der elektromagnetischen Wechselwirkung bestimmt. Bei Betrachtung der schwachen Kraft kann die Formel bspw. in die andere Richtung benutzt werden. Durch die sehr kleine Kopplungsstärke müssen die Reaktionspartner sehr nahe aneinander kommen, um einen schwachen Prozess in Gang zu setzen. So wurde damals die Reichweite auf $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$ geschätzt (vgl. [DEM10, 210]). Damit können die Schülerinnen und Schüler für die $W^\pm$ eine Masse von rund $m_{W^\pm} \approx 80 \frac{\text{GeV}}{c^2}$ berechnen. Dieser Wert steht in guter Übereinstimmung mit den derzeit experimentell bestimmten Wert von $m_{W^\pm} \approx 80,4 \frac{\text{GeV}}{c^2}$.

Der sogenannte schwache Strom des Z^0 sollte aus zeitlichen Gründen nicht genauer betrachtet werden, da man für eine halbwegs verständnisvolle Auseinandersetzung die Elementarteilchenphysik wesentlich genauer behandeln müsste.

Bekannte Bestandteile der Welt:

$\gamma, e^-, e^+, \nu_e, \bar{\nu}_e, u, \bar{u}, d, \bar{d}, s, \bar{s}, g, W^+, W^-, Z^0$

Die Schülerinnen und Schüler können die Dichotomie zwischen der Nukleonenumwandlung nachvollziehen und verstehen / haben Wissen über die Einführung einer neuen Wechselwirkungsart mit den einhergehenden Eigenschaften (Austauschteilchen, Ladung, Kopplungsstärke, Reichweite).

¹⁰⁸Wenn ein Baryon „verschwindet“, muss ein neues „entstehen“.

¹⁰⁹Aktuell geht man in der GUT-Theorie von einer Halbwertszeit des Protons von 10^{31} bis 10^{36} Jahren aus (Alter Universum ca. $14 \cdot 10^9$ Jahre).

12. Stunde

Zum Abschluss der Reihe sollte nun das Standardmodell mit seinen Teilchen und ihren Wechselwirkungen dargestellt werden. In der Reihe wurden nicht alle Elementarteilchen behandelt und müssen nun einfach ergänzt werden. Das betrifft folgende Quarks, dass c -Quark (charme), b -Quark (bottom), t -Quark (top) und die beiden zweiten Leptonen μ ¹¹⁰ und τ mit ihren jeweils zugehörigen Neutrinos ν_μ und ν_τ .

Somit gibt es 6 Quarks und 6 Leptonen (3 el. geladene und 3 neutrale). Diese werden in drei Familien / Generationen eingeteilt:

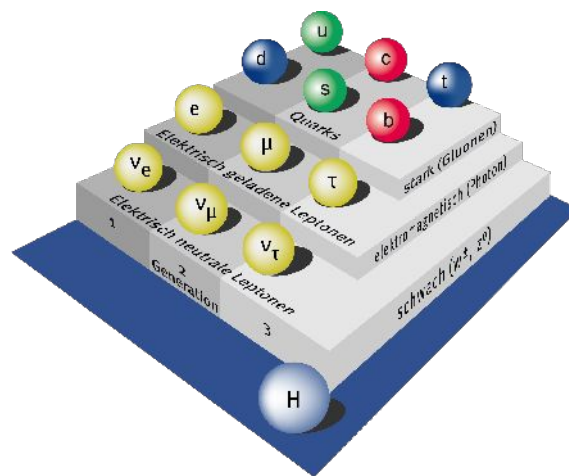


Abbildung 7.62.: Das Standardmodell der Teilchenphysik [NET13, 32]

Interessant ist, dass unsere stabile Materie nur aus Elektronen, u -Quarks und d -Quarks besteht, sprich nur aus der ersten Familie. Von den Teilchensorten der ersten Familie gibt es jeweils zwei massereichere, instabile „Kopien“ mit gleichen Ladungen (2. und 3. Generation). Natürlich gibt es zu jedem Elementarteilchen eine Antiteilchensorte mit gleicher Masse, aber entgegengesetzter elektrischer Ladung (vgl. [NET13, 32]), womit man insgesamt auf 24 Elementarteilchen plus 5 Austausch-¹¹¹teilchen kommt. Zur Bilderklärung des Treppenstandardmodells¹¹²: Die Graphik zeigt, welche Materieteilchen welche Wechselwirkungen eingehen. Alle Teilchen, die auf einer bestimmten Stufe liegen, interagieren unter der rechts angegebene Wechselwirkung, sowie den Wechselwirkungen in den Stufen darunter.

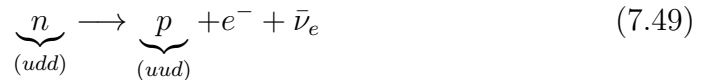
¹¹⁰Ggf. ist das Muon schon aus der Relativitätstheorie bekannt, hier wird es gerne im Rahmen der Zeitdilatation mit seiner Halbwertszeit eingeführt.

¹¹¹Insgesamt sind es natürlich 13, wenn man von 8 unterschiedlichen Gluonen plus Higgsteilchen ausgeht.

¹¹²vgl.: <http://www.teilchenwelt.de/typo3temp/pics/Standardmodell-mitHiggs-Treppe-Ladungen-02-4b32ab97d5.png>

- **Untere Stufe:** Die elektrisch neutralen Leptonen (Neutrinos) und auch alle anderen Materie- und Antimaterieteilchen tragen eine schwache Ladung. Deswegen wechselwirken sie bei niedrigen Energien nur selten; das macht es sehr schwierig, sie mithilfe von Detektoren nachzuweisen.

Beispiel: Beim radioaktiven Zerfall (schwacher Prozess) sind alle Elementarteilchensorten vertreten.



- **Mittlere Stufe:** Die restlichen Leptonen (Elektronen, Myonen und Tauonen) tragen eine elektrische Ladung und eine schwache Ladung. Sie koppeln also an $W^\pm$, Z^0 und Photonen.

Beispiel: Anziehungskraft zwischen Atomkern und Hüllenelektron (em-Prozess), es sind geladene Leptonen und Quarks beteiligt.

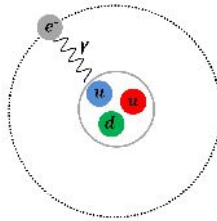


Abbildung 7.63.: em-Wechselwirkung im H-Atom

- **Obere Stufe:** Quarks sind die einzigen Materieteilchen, welche außer der elektrischen und schwachen Ladung noch eine starke Ladung tragen (auch Farbladung genannt). Sie koppeln also an allen Austauschteilchen, sprich können alle Wechselwirkungen spüren.

Beispiel: Anziehungskraft zwischen Quarks bzw. zwischen Nukleonen im Atomkern (starker Prozess), nur Quarks sind beteiligt.

Zur Festigung des Wissens wird ein Arbeitsblatt von den Schülerinnen und Schülern bearbeitet (vgl. A.4). Hier sollen (Alltags-)Phänomenen wirkende Grundkräfte zugeordnet werden und alle vier Wechselwirkung mit ihren Eigenschaften in tabellarischer Form erläutert werden.

Des Weiteren können die folgenden elementaren Wechselwirkungen von Austauschteilchen A mit Teilchen T in einer Übersicht erarbeitet werden. Bei der Paarbildung muss aufgrund der Impulserhaltung immer noch ein Atomkern oder ein Hüllenelektron involviert sein, dies kann aber aus Elementarisierungsgründen in der Übersicht

7. Mögliche Handhabung der Wechselwirkungskonzepte im Schulunterricht - Eine Elementarisierung grundlegender physikalischer Prinzipien

ohne Beachtung bleiben, sollte aber ggf. vom Lehrer mündlich erwähnt werden.

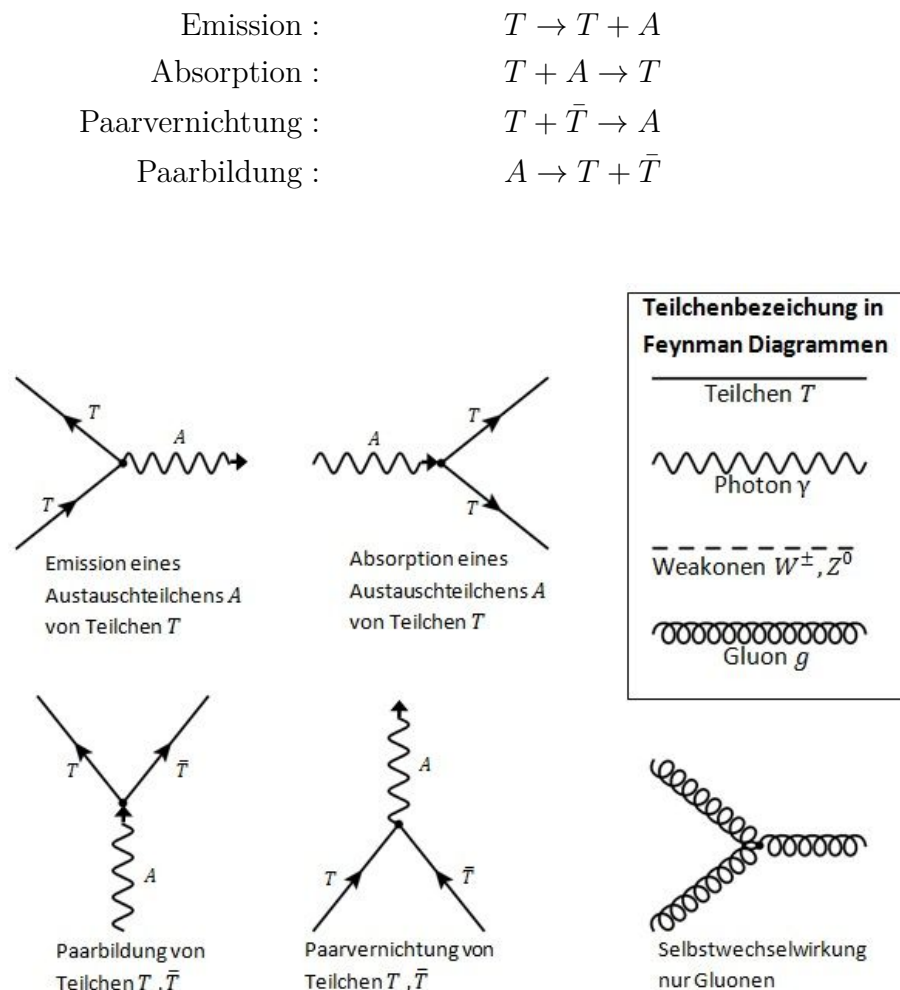


Abbildung 7.64.: Darstellung elementarer Wechselwirkungen

Im Rahmen einer Unterrichtsreihe, die aktuelle Forschungsgebiete anschnidet, ist es wichtig, über mögliche Ausblicke des Themengebiets zu reden und somit die Schülerinnen und Schüler zu motivieren, sich in Zukunft, bspw. mit einem naturwissenschaftlichen Studium, weiter mit der Physik zu befassen.

Die Gravitation konnte bis heute im Konzept der Austauschteilchen noch nicht exakt formuliert werden. Das bis vor Kurzem noch hypothetische Austauschteilchen - Higgs-Teilchen -, welches den elementaren Teilchen ihre träge Masse anhaften soll, wurde 2012 im LHC entdeckt und induziert die Hoffnung der Physiker, die Gravitation mit ihrer Ladung „Masse“ auch in den Kanon der Austauschteilchen-Wechselwirkungen zu implementieren. Hiermit wollen die Physiker eine Vereinheitlichung der vier fundamentalen Wechselwirkungen erreichen.

Die erste Vereinheitlichung schaffte Maxwell mit seiner Zusammenfassung der elektrostatischen und den magnetischen Kräften über das Konzept des Feldes. Die Hoffnung einer Vereinheitlichung über das Konzept der Austauschteilchen wurde dadurch geschürt, dass über dieses Konzept in den sechziger und siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts eine Zusammenfassung der elektromagnetischen- und der schwachen Wechselwirkung zur elektroschwachen Theorie gelungen ist, mit den vier Feldteilchen $W^\pm, Z^0, \gamma$. Das hypothetische Austauschteilchen der Gravitation - das Graviton G - wurde bisher aber noch nicht entdeckt. Nötige Eigenschaften dieses Teilchen können schon auf dem eben genannten Arbeitsblatt eingetragen werden.

Ein weiterer interessanter Ausblick bietet die Verknüpfung von Teilchenphysik und Astronomie (vgl. [NET13, 10]). Unsere atomare Materie, bestehend aus u -Quarks, d -Quarks und Elektronen, stellt nur einen geringen Bruchteil (ca. 5%) unserer Universums dar. Die restlichen 95% gliedern sich in *Dunkle Materie* (27%) und *Dunkle Energie* (68%), wobei wir jeweils nicht wissen, worum es sich hierbei handelt.

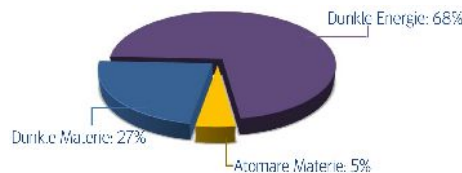


Abbildung 7.65.: Aufbau des Universums [NET13, 10]

Mit unserer doch recht komplexen Physik bzw. unseren Naturwissenschaften im Allgemeinen können wir also nur rund 5% des Universums adäquat erklären, bei 95% tappen wir sprichwörtlich im Dunklen.

7.5. Schülerorientierte Diskussion über die vier behandelten Wechselwirkungskonzepte

Aus Kraft wird Feld, aus Feld wird Geometrie oder Austauschteilchen. Jedes Konzept beschreibt mehr oder weniger gut Phänomene in der Natur. Aber schon beim Blick ins Schulbuch fällt auf, dass auch im Rahmen des Feldkonzepts von Kraft geredet wird. Im Kapitel der Teilchenphysik findet man auch Begriffe wie das Farbfeld oder die starke Kraft. Man liest auch Feldbosonen für Austauschteilchen. Es gibt also noch nicht einmal eine sprachlich adäquate Abbildung des Konzepts der Wechselwirkungen, dass sich im Rahmen der jeweiligen Unterrichtsreihen zu gewissen Themengebieten eignen würde. Die Schülerinnen und Schüler sind von dieser Vielzahl recht verwirrt, sodass die Lehrerin oder der Lehrer eine einheitliche Formulierung im jeweiligen Themengebiet finden sollte.

Der fachdidaktische Grund für die Konfusion ist offenbar, bei der Entwicklung einer Theorie wird auch immer ein Wirkungskonzept benötigt und hier wählt man zuerst ein bestehendes und wenn schon mehrere verfügbar sind, das für den jeweiligen Aspekt Sinnigste. Gibt es kein solches, muss ein Neues erdacht werden, was natürlich erfordert, Anwendungsbeispiele bereit zu stellen. Zur festen Integration versucht man nun das neue Wechselwirkungskonzept auch auf alte Sachverhalte anzuwenden, um ggf. eine Allgemeingültigkeit zu erhalten (bspw. das Graviton im Rahmen des Austauschteilchenkonzeptes zur möglichen Beschreibung der Gravitation).

Hieraus entsteht bei den Lernenden die Frage, welches der Konzepte nun das richtige sei. Hierauf lässt sich nur mit einer Verdeutlichung der erkenntnistheoretischen Situation anhand von Analogien antworten, denn es gibt bekanntlich nicht das Richtige Erklärungsmodell, sondern nur das jeweils sinnvoll anzuwendende Konzept. Damit die Schülerinnen und Schüler diesen wissenschaftstheoretischen Aspekt besser verstehen können, ist es sinnvoll, Analogien zu thematisieren.

7.5.1. Mögliche Analogien zur Beziehung zwischen Theorie und Konzept

Kommunikation

Eine mögliche Analogie für Schülerinnen und Schüler wäre die Kommunikation. Menschen haben Stimmbänder, um Luft in Schwingung zu versetzen. Weiterhin besitzen sie auch ein Trommelfell, um diese Schwingungen festzustellen, zu messen und im Gehirn zu analysieren. Das sind die groben materiellen Grundlagen unserer Kommunikation. Aber anhand der Sprachenvielfalt auf der Erde erkennt man, dass es nicht die eine Sprache zur Kommunikation zwischen Menschen gibt. Im Rahmen unserer Möglichkeiten (Frequenzbereiche und Lautbildung) haben wir eine Vielfalt an möglichen Kommunikationskonzepten entwickelt. Dies stellt sogar auch nur einen Teil dar, wenn andere Sinnesorgane involviert werden, ergeben sich noch weitere

(Schrift, Zeichensprache, Blindenschrift etc.). Je nach „Themengebiet“ erhält man also mannigfache Kommunikationsmöglichkeiten. Das alles dient aber letztlich nur der Verständigung zwischen Menschen, ähnlich der verschiedenen Wechselwirkungskonzepte, die nur Wirkungen zwischen Körpern in einem Modellbild erklären sollen.

Ein Baum

Eine weitere Analogie in diesem Rahmen wäre bspw. ein Baum. Der Baum soll für irgendeinen realen Sachverhalt außerhalb des menschlichen Bewusstsein stehen (Der Autor muss sich an dieser Stelle notgedrungen dazu bekennen, dass er von der Existenz von Entitäten ausgeht, die außerhalb des menschlichen Bewusstsein stehen). Dieser Sachverhalt kann mit unterschiedlichen Konzepten nun beschrieben werden. Hier einige Beispiele:

- Der Baum kann als Lebensort für Tiere angesehen werden. Vögel nisten auf ihm, Spinnen spannen ihre Netze, Käfer leben geschützt unter der Rinde, Raupen ernähren sich von seinen Blättern usw.

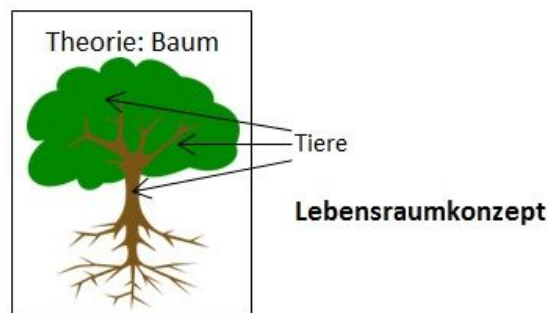


Abbildung 7.66.: Baum als Lebensraum

Die Theorie des Baumes kann also mit dem **Lebensortkonzept** beschrieben werden.

- Der Baum kann als Stoffwechselwerk angesehen werden. Er wandelt mithilfe der Photosynthese Kohlenstoffdioxid in Sauerstoff um und erstellt dabei noch für sich Biomasse.

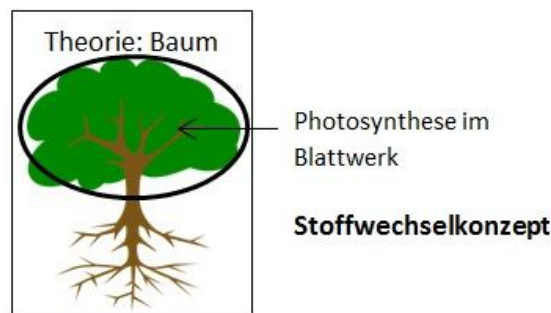


Abbildung 7.67.: Baum als Stoffwechsler

Die Theorie des Baumes kann also mit dem **Stoffwechselkonzept** beschrieben werden.

- Der Baum kann in gewisser Weise als Wasserpumpe angesehen werden. Mit Hilfe der Kapillarkraft wird das Wasser aus dem Erdboden entgegen der Schwerkraft mehrere Dekameter empor gezogen.

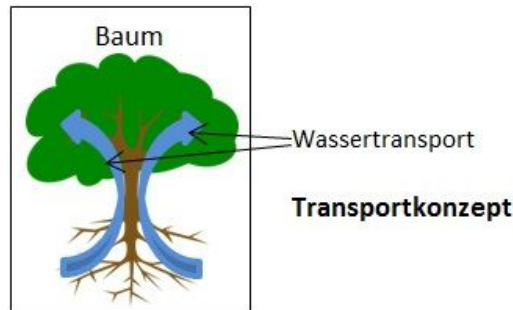


Abbildung 7.68.: Baum als Transportmittel

*Die Theorie des Baumes kann also mit einem **Transportkonzept** beschrieben werden.*

- Der Baum kann als Befestigung des Erdbodens angesehen werden. Durch sein großes Wurzelgeflecht mit unterschiedlich dicken Wurzelsträngen hält der Baum die Erde des Waldbodens zusammen. So bleibt selbst bei Starkregen die Erde auf steilen Hängen an Ort und Stelle.

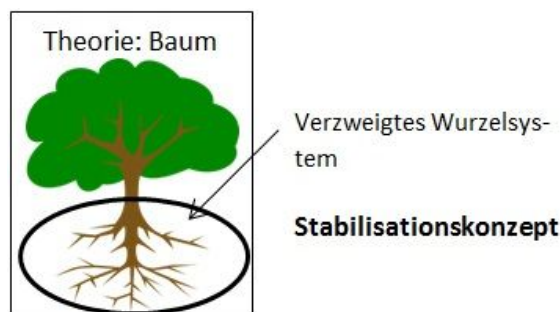


Abbildung 7.69.: Baum als Stabilisator

*Die Theorie des Baumes kann also mit einem **Stabilisationskonzept** beschrieben werden.*

Es können natürlich noch beliebig weitere Konzepte genannt werden, wie bspw. der Baum als Baustoff- bzw. Brennstoffproduzent (Holz), zur Schattenbildung in seiner Umgebung, als Schutzraum unter ihm, als Lebensmittelproduzent (Ahornsirup) oder einfach als Dekorationsobjekt im Garten.

Wie oben schon angesprochen, kann mithilfe eines der Konzepte der Baum nicht in seiner Gänze erklärt und beschrieben werden. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, mehrere Konzepte zur Erklärung zu Rate zu ziehen. Auch diese Konzepte können wie bspw. das Kraft und Feldkonzept bei den Wechselwirkungen ineinandergreifen und Schnittmengen bilden. So dient das große, verästelte Wurzelgerüst des Baumes einerseits der großflächigen Wasserbeschaffung und andererseits sorgt es für die Stabilität des Untergrund, beide bedingen sich also.

Zur Baumanalogie lässt sich im Anhang (vgl. A.5) eine Folie finden. Je nach dem, wie viele Wechselwirkungskonzepte behandelt wurden, kann dies adaptiert werden. Die unterschiedlichen Konzepte können einfach nur dargelegt und besprochen werden oder bei genügend Zeit kann ein Konzept beispielhaft vorgestellt werden und weitere Konzepte von der Lerngruppe eruiert werden.

8. Grenzen der selbstgesteuerten Erkenntnisgewinnung

8.1. Grundlage der Forschungsidee

Eine Forschungsfrage ist die Überprüfung, ob Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit haben ein Wechselwirkungskonzept sich selbst erforschend zu erarbeiten. Dazu hat der Autor beispielhaft das Themengebiet der Mechanik gewählt, da hier die meisten Vorerfahrungen vorhanden sind und nicht zuletzt hier auch das Vorstellungsvermögen am besten ausgeprägt ist. Des Weiteren haben die Lernenden aus der Sekundarstufe I zum Aufbau eines möglichen Konzeptes diffuses Vorwissen zu mechanischen Größen wie Energie, Arbeit oder Kraft. Auf der formalen begrifflichen Ebene sind somit einige Voraussetzungen, ein Konzept zu entwickeln, welches Wirkungen zwischen Körpern beschreibt, gegeben. Die Überprüfung fand relativ zu Beginn der Einführungsphase (Jgst. 11) statt, damit konnten die Schülerinnen und Schüler auf ihr Wissen über gleichförmige Bewegungen und gleichmäßig beschleunigte Bewegungen mit den jeweils bekannten Größen (s, v, a, t) zurückgreifen, auch die Größe der Masse m war bekannt. Ferner hatten Sie demnach auch schon Einblicke in physikalische Formeln / Gesetze und deren Herleitung.¹¹³

Die Schülerinnen und Schüler haben folgende Aufgabe erhalten:

Entwickeln Sie eine physikalische Größe, die Wirkungen zwischen Körpern beschreibt und formulieren Sie ihren gefunden Zusammenhang in ein bis zwei Sätzen. Geben Sie, wenn möglich, auch einen mathematischen Zusammenhang bzw. eine Berechnungsformel an.

Schülergruppen, die Probleme mit dem Sachverhalt bzw. mit der Formulierung hatten, sollten vereinfacht gesagt eine physikalische Größe finden, die die Ursache von Bewegungen darstellt.

¹¹³Bspw. der Faktor $\frac{1}{2}$ bei beschleunigten Bewegungen.

8.2. Durchführung

Die Kurse wurden dabei in Kleingruppen unterteilt, hatten aber zwischendurch immer die Möglichkeit, sich untereinander über gewonnene Erkenntnisse auszutauschen. Zur Untersuchung wurden Ihnen alle beliebigen Experimentierutensilien aus der Mechanik zur Verfügung gestellt: Schraubenfedern, Schnüre, unterschiedlich Eisenkugeln, Kraftmesser, Bahnen mit verschiedenen Wagen, eine Luftkissenfahrbahn, eine schiefe Ebene, Stopuhren, Stativstangen, Pendel, Hebelvorrichtung etc.. Falls etwas fehlte, konnten die Lernenden nach weiteren benötigten Gerätschaften in der Physiksammlung suchen.

Die Kurse hatten jeweils zwei Schulstunden Zeit und mussten sowohl ihre Schulbücher als auch ihre Smartphones vorher abgeben. Damit war ausgeschlossen, dass Sie im Buch oder im Internet recherchieren konnten. Die erhaltenen Ergebnisse konnten also nur aus ihrem Vorwissen und der zweistündigen Arbeit stammen.

Insgesamt haben alle Gruppen ordentlich über die ganze Zeit hinweg gearbeitet. Dabei wurden seitens der Lernenden viele Fragen an die Lehrkraft gestellt, die aber die meiste Zeit bewusst von dieser unbeantwortet blieben. Es gab kein Richtig oder Falsch, es sollte eigenständig mithilfe von Experimenten entwickelt werden. Diese kleine Studie sollte so realitätsnah wie möglich sein. Die Schülerinnen und Schüler sollten begreifen, dass Fragen nur mithilfe von Experimenten an die Natur gestellt werden können. So wurden durch die Lehrkraft nur kleine Impulse und Ermutigungen an die Lernenden gegeben.

8.3. Ergebnis

Bevor an dieser Stelle irgendwelche Ergebnisse vorgestellt und interpretiert werden, muss zunächst deutlich gesagt werden, dass die Schülerinnen und Schüler es in unserem Bildungssystem zumeist nicht gewohnt sind, sehr offene Aufgabenstellungen zu bearbeiten. Des Weiteren kennen Sie es nicht, dass der Lehrer keine Fragen beantwortet und sie somit als Gruppe / Kurs alleine dastehen. Wie oben aber schon erwähnt, haben sich die Gruppen dadurch nicht entmutigen lassen und arbeiteten emsig an der Aufgabenstellung.

Die Gruppen haben verschiedene Ergebnisse präsentiert, manch eine Gruppe hatte intern sogar zwei bis drei mögliche Vorschläge, resultierend aus unterschiedlichen Versuchen, die sie durchgeführt haben. Bedingt durch ihr Vorwissen wurde die Wirkung von vielen Gruppen mit dem Begriff der Kraft oder der Energie beschrieben. Das ist aber in Bezug auf ihr Vorwissen nicht weiter verwunderlich. Ihr Vorwissen sorgte auch dafür, dass in rund 30 Prozent der Fälle die Kraft als Spezialfall auch direkt mit dem richtigen formellen Zusammenhang beschrieben wurde ($F = m \cdot g$). Diese Ergebnisse werden im Folgenden außen vorgelassen, da sie rein aus explizitem Vorwissen herrühren und nicht aus der „Forschung“ der Lernenden.

Auffällig war, dass alle Gruppen mögliche Beschreibungen in Worten gefunden haben, einen formalen Zusammenhang haben im Mittel nur ca. die Hälfte der Gruppen geliefert. Hierbei ist zudem sehr interessant, dass bei den betreffenden Gruppen die wörtliche Formulierung recht oft nicht zu dem vorgeschlagenen Formeln passten. Dies ist auch ein sehr interessanter, zu untersuchender Aspekt, der aber nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. Aus diesen Gründen wird der Autor die wörtliche Formulierung und die Formeln getrennt von einander auflisten.

Ähnliche Formulierungen, die im Kern aber dasselbe ausdrücken, wurden in der Liste direkt zusammengefasst und mit der Häufigkeit versehen.

Insgesamt haben 30 untersuchte Gruppen folgende Ergebnisse geliefert:

- (3 Mal) Wenn man einen Körper bewegen will, muss man von außen auf ihn einwirken (stoßen, schieben etc.).
- Wenn eine Bewegung nach unten geht, wird der Körper schneller, nach oben wird sie langsamer. D.h. nach unten gewinne ich Kraft, nach oben verliere ich Sie.
- Ohne Kontakt gibt es keine Wirkung.
Nachfrage durch Schüler: Und wenn ein Körper fällt.
Antwort: Beim Fallenlassen eines Körpers fand der Kontakt vorher statt.
- (5 Mal) Weniger Reibung bedeutet weniger Kraftaufwand beim Bewegen.
- Die Wirkung entspricht dem ausgeübten Druck auf einem Körper. Auch die Fläche und die Dauer müssen beachtet werden.
- (4 Mal) Die Wirkung hängt immer von der Härte und Form der beteiligten Körper ab.
- Der zurückgelegte Weg ist proportional zur benötigten Kraft.
- Je kleiner das Wirkinstrument ist, desto größer die Wirkung bei gleicher Kraft.
- (6 Mal) Schwere Körper brauchen mehr Kraftaufwand. Die Masse muss also eine wesentliche Rolle spielen.
- (4 Mal) Ein Gegenstand bewegt sich durch Kraft von einer Anfangsstelle zu einem Ausgangsort.
- (3 Mal) Die Wirkung zwischen zwei Körpern hängt von der Geschwindigkeit der Körper ab, also von der Differenz ihrer Geschwindigkeit. Auch ihre Masse und Form spielen eine wichtige Rolle.
- Die Wirkung zwischen Körpern ist die Änderung des Ortes ihrer Masse mit der Zeit.
- (2 Mal) Beschleunigungen bei Bewegungen werden mit größerem Gewicht kleiner.

- (4 Mal) Energie beim Anschubsen wandelt sich kinetische Energie um. Die Ursache von Bewegungen ist also die Energie.
- Die Wirkung zwischen zwei Körpern ist die Kraft in irgendeine Richtung. Wirkungen entsprechen also Kräften.
- Die Masse stellt ein Objekt da und die zugeleitete Energie lässt das Objekt bewegen. Zudem ist die Reibung anscheinend ein wichtiger Bestandteil der Bewegung.
- (3 Mal) Mehr Masse benötigt mehr Energie, um bewegt zu werden.

Folgende Berechnungsformeln wurden vorgeschlagen. Dabei stehen die Bezeichnungen W , F , K für die Wirkungsgröße bzw. Bewegungsgröße.

- $W = m \cdot v$
- $K = \Delta s \cdot \Delta t$. Skalenstriche
Mit Skalenstrichen sind die Unterteilungen auf dem Federkraftmesser gemeint.
- $F = \frac{F}{A}$
A soll für die Wirkungsfläche stehen.
- $F = m \cdot a$
- $F = m \cdot g$
- $p \cdot A \cdot t = v$
p steht für Druck und A wiederum für die Wirkungsfläche.
- $W = m \cdot v \cdot a$
- $W = m \cdot v + m \cdot a$
- $K \cdot t = m \cdot v$

8.4. Clusterung

Neben der auf den Versuch eingeschränkten Formulierung sind weitere Auffälligkeiten zu finden. Im Folgenden werden die Ausdrucksweisen der Schülerinnen und Schüler nach der zugrunde liegenden Idee sortiert.

Aristotelische Ansicht:

- Ohne Kontakt gibt es keine Wirkung
Nachfrage durch Schüler: Und wenn ein Körper fällt.
Antwort: Beim Fallenlassen eines Körpers fand der Kontakt vorher statt.

Bewegung braucht Kraft (auch aristotelische Sicht):

- Ein Gegenstand bewegt sich durch Kraft von einer Anfangsstelle zu einem Ausgangsort.
- Der zurückgelegte Weg ist proportional zur benötigten Kraft.
- Wenn man einen Körper bewegen will, muss man von außen auf ihn einwirken (stoßen, schieben etc.).

Beschreibung ohne Bewegung, sondern mit Verformungswirkung bzw. Druck:

- Die Wirkung entspricht dem ausgeübten Druck auf einem Körper. Auch die Fläche und die Dauer müssen beachtet werden.
- Je kleiner das Wirkinstrument ist, desto größer die Wirkung bei gleicher Kraft.
- Die Wirkung hängt immer von der Härte und Form der beteiligten Körper ab.

Einfluss der Masse:

- Schwere Körper brauchen mehr Kraftaufwand. Die Masse muss also eine wesentliche Rolle spielen.
- Die Wirkung zwischen Körpern ist die Änderung des Ortes ihrer Masse mit der Zeit.
- Mehr Masse benötigt mehr Energie um bewegt zu werden.

Wirkung wird mithilfe der Energie dargestellt:

- Energie beim Anschubsen wandelt sich kinetische Energie um. Die Ursache von Bewegungen ist also die Energie.
- Die Masse stellt ein Objekt dar und die zugeleitete Energie lässt das Objekt bewegen. Zudem ist die Reibung anscheinend ein wichtiger Bestandteil der Bewegung.
- Wenn eine Bewegung nach unten geht, wird der Körper schneller, nach oben wird sie langsamer. D.h. nach unten gewinne ich Kraft, nach oben verliere ich Sie.

Einfluss der Trägheit:

- Beschleunigungen bei Bewegungen werden mit größerem Gewicht kleiner.

Einfluss der Reibung:

- Weniger Reibung bedeutet weniger Kraftaufwand beim Bewegen.

Eingliederung der Richtungsabhängigkeit:

- Die Wirkung zwischen zwei Körpern ist die Kraft in irgendeine Richtung. Wirkungen entsprechen also Kräften

8.5. Interpretation

Zunächst einmal ist zu sagen, dass die Schülerinnen und Schüler viele verschiedene Ergebnisse lieferten. Ihre Ergebnisse bzw. ihre Formulierungen beziehen sich dabei natürlich auf den von Ihnen durchgeführten Versuch. Als Beispiel:

Betrachtung eines pendelnden Körpers:

„Wenn eine Bewegung nach unten geht, wird der Körper schneller, nach oben wird sie langsamer. D.h. nach unten gewinne ich Kraft, nach oben verliere ich Sie.“

Versuch mit der Luftkissenfahrbahn:

„Die Wirkung zwischen zwei Körpern hängt von der Geschwindigkeit der Körper ab, also von der Differenz ihrer Geschwindigkeit. Auch ihre Masse und Form spielen eine wichtige Rolle.“

Bei der Clusterung lassen sich mehrere Grundideen finden, die in unser heutiges Kraftverständnis passen. Die Schülerinnen und Schüler nennen den Einfluss der Masse, sehen die Kraft als vektorielle Größe und erkennen den Einfluss der Trägheit. Auch die Verformung über Krafteinwirkung wird genannt.

Des Weiteren spielt die aristotelische Sichtweise eine Rolle, so sehen die Lernenden, dass eine Bewegung immer Kraft braucht, die Reibung mit eingeht und dass Kraft nur über einen Kontakt hin wirken kann. Gleichsam findet man die historische Problematik in der Abgrenzung von Begriffen, hier bei der Verwechslung zwischen Kraft und Energie, unter den Formulierungen.

Bei Betrachtung der vorgeschlagenen Berechnungsformel ergeben sich sehr ähnlich Probleme. Auszuschließen sind viele Gruppen die $F = m \cdot a$ oder $F = m \cdot g$ angaben, da dies zur Gänze, bei Betrachtung der Formulierungen, dem Vorwissen und nicht der „Erforschung“ zugeschrieben werden kann.

Sehr experimentnahe Darstellungen wie $K = \Delta s \cdot \Delta t \cdot \text{Skalenstriche}$ sind zu finden und Lernende mit Formulierungen über die Verformungen erwägten Formeln mit den Größen der Fläche bzw. des Drucks. Andere wiederum versuchten die Masse, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung irgendwie einzupflegen, mal additiv, mal faktoriell. Auch der aus der Historie bekannte Ansatz von Aristoteles bzw. später von Descartes $m \cdot v$ ist in der Reihe wiederzufinden. Insgesamt gesehen sind die Ergebnisse, wie erwartet, wenig befriedigend. Es wurden die meiste Zeit lediglich irgendwelche physikalischen Größen aneinandergereiht, ohne auf logische Zusammenhänge adäquat zu achten.

Es kann festgehalten werden, dass die Schülerinnen und Schüler bei ihrer Forschung diesselben Schwierigkeiten aufzeigen, wie sie in der geschichtlichen Entwicklung des Kraftbegriffs stattfanden (3.2.1). Hier steckt aber auch ein Problem dieser unterrichtlichen Methode. Die damalige Behebung dieser Misskonzepte dauerte über Jahrhunderte hinweg und wurde von Größen der Naturwissenschaft diskutiert, die Schülerinnen und Schüler sollen den Kraftbegriff, bei Vergleich des Zeitrichtwertes einiger Lehrplänen, aber in rund zwei bis vier Unterrichtsstunden verstanden haben.

8.6. Ausweitung des Forschungsprogramms

Die eben dargestellten Ergebnisse können natürlich auch der wenig zur Verfügung gestellten Zeit und den damit verbundenen geringen Anzahl an möglichen Versuchen liegen. Aus diesem Grund wurde mit einem Kurs, der aus sieben Kleingruppen bestand, eine weitere Doppelstunde an der Forschungsfrage gearbeitet. Das Resultat war, dass nun alle Gruppen mehrere Formulierungsmöglichkeiten und Formeln darlegten, diese aber nicht verallgemeinernd zu einer verknüpfen konnten. Es entstanden auch keine neueren Formulierungen.

Zur Verbesserung der Ergebnisse könnte man den zeitlichen Rahmen ggf. noch weiter ausbauen. Dies erscheint aber aus zwei Gründen wenig sinnvoll. Zum einen muss im Schulunterricht immer auf den Zeit-Nutzen-Faktor geachtet werden, d.h. eine weitere Ausweitung des Forschungsauftrags bedeutet weniger Zeit für anderer Thematiken (vgl. [KIR09, 176]). Zum anderen wurden die Schülerinnen und Schülern gegen Ende der zweiten Doppelstunde schon etwas unruhig und wollten ein klares Ergebnis, um dann etwas Anderes behandeln zu können. Die Motivation der Lernenden sank somit kontinuierlich mit der Bearbeitungsdauer des gleichen Sachverhalts, welches aber in der Didaktik schon länger als Konsens angesehen wird.

Letztlich wird also eine zeitliche Ausweitung des Forschungsprogramms zu keinen wesentlich besseren Ergebnissen führen.

8.7. Schlussfolgerung

Ein Wechselwirkungskonzept, hier den Kraftbegriff, selbst von den Schülerinnen und Schülern „erforschen“ zu lassen, ist nicht möglich. Es entstehen dieselben Fehlvorstellungen, wie man sie auch in der historischen Entwicklung des Begriffs wieder findet. Aber hierin kann auch der Nutzen für den Unterricht stecken. Vor Beginn der Unterrichtsreihe könnte die Forschungsfrage in einer Doppelstunde, wie hier vorgeschlagen, behandelt werden und die Ergebnisse auf Plakaten etc. festgehalten werden. Im Anschluss kann nun bei der geschichtlichen Entwicklung des Begriffs während der Unterrichtsreihe immer wieder mit den Ansichten der Schülerinnen und Schülern verglichen werden. So werden die Problematiken in der Genese und auch wissenschaftstheoretische Aspekte den Lernenden wesentlich verständlicher, da sie sie selber bei ihrer Forschung „erlebt“ haben. Dieser Sachverhalt deckt sich auch mit Ernst Kircher: „Dabei lernen die [...] Jugendlichen vor allem Methodisches, *naturwissenschaftliche Fähigkeiten und Fertigkeiten* (Prozessziele) wie *genaues Beobachten, sorgfältiges Experimentieren* - eine didaktisch reduzierte methodische Struktur der Physik“.[KIR09, 175]

9. Evaluation der Unterrichtseinheiten

9.1. Evaluation zu den vorangegangenen Elementarisierungen am Beispiel des Kraft und Feldkonzeptes

Die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Unterrichtsreihen soll im Folgenden durch eine Evaluation untersucht werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei natürlich primär auf dem tieferen Verständnis der jeweiligen Wechselwirkungskonzepte und erst sekundär auf den formaleren, auswendig lernbaren Inhalten.

Zur Evaluation selbst sei gesagt, dass auf eine Vergleichsstudie zwischen Kursen mit jeweils anderen Herangehensweisen Abstand genommenen wurde. Bei einer Probeevaluation von zwei Kursen - mit einer Vergleichsstudie - haben sich, wie erwartet, Differenzen im Kompetenzzuwachs zu den Wechselwirkungskonzepten gezeigt. Diese konnten aber nicht klar empirisch an bestimmten Parametern festgemacht werden, was daher eine ausführliche Untersuchung obsolet machte. Festhalten kann man nur, dass die Kurse, die mit der konzeptualen Herangehensweise unterrichtet wurden, sprich wo der Wechselwirkungsbegriff immer wieder klar thematisiert wurde, eine bessere Vorstellung darüber besitzen, auf welchen Wegen physikalische Einwirkungen in der Natur modellhaft beschrieben werden können. Das sagt aber nichts darüber aus, wie sie die Wechselwirkungskonzepte bei eigenständigen Berechnungen und Problemstellungen handhaben können. Zudem tritt selbstredend hier, wie auch schon in vielen anderen Studien gezeigt, der wohlbekannte Effekt auf, dass Schülerinnen und Schüler, die in eine bestimmte Richtung - begrifflich, inhaltlich und auch auf Prozesse hin - unterrichtet wurden, auch stets die angestrebten Aspekte später besser aufzeigten als Lerngruppen, die auf „traditionellem Wege“ unterrichtet wurden.

Im ersten Ansatz sollte die Evaluation mithilfe der Interviewmethode stattfinden, da der Autor als Lehrperson die Kompetenzen seiner Schülerinnen und Schüler der betreffenden Evaluationskurse aufgrund der großen zeitlichen und örtlichen Nähe gut individuell einschätzen konnte. Für eine verlässliche Validierung wurden Probendurchläufe und Testinterviews durchgeführt. Das Ergebnis war, dass der eigentlich gesehene Vorteil, Lehrer bei den zu untersuchenden Schülerinnen und Schülern zu sein, sich letztlich als Nachteil herausstellte. Die Lernenden haben bei Gesprächen mit Lehrern zumeist ein Prüfungsgefühl, d.h. sie wollen möglichst nichts Falsches sagen und damit ihre Note gefährden. Dies trifft - nach Aussagen von Schülerinnen und Schülern - aber auch zu, wenn eigentlich vorher klar thematisiert wurde, dass

die Gespräche bzw. Interviews bewertungsfrei sind. Schlussendlich hat dies dazu geführt, dass fast alle betreffenden Schülerinnen und Schüler für das Interview gelernt haben, was die eigentliche Untersuchung wiederum nichtig macht. Auch spontane Interviews haben sich hierbei nicht bewährt, da die Spontaneität nach dem ersten Interview verfällt, da die folgenden Gesprächspartner vom ersten informiert wurden und wieder eben beschriebenes Lernen eingetreten ist. Pro Kurs hätte man dementsprechend ein bis zwei adäquate Interviews führen können, welches aber den Stichprobenumfang sehr klein gehalten hätte und somit die Untersuchung wenig repräsentativ gemacht hätte.

Letztendlich wurde die Evaluation aus eben genannten Gründen dann doch mithilfe von Fragebögen ausgeführt.

Die neueren und vielleicht dadurch etwas interessanteren Unterrichtsreihen zu den Wechselwirkungskonzepten der Geometrisierung und der Austauschteilchen konnten vom Autor nur in einem geringeren Zeitumfang unterrichten werden, da in diesem Zeitraum keine Physikleistungskurse zustande kamen. Eine umfängliche Evaluation konnte dadurch nicht erfolgen. Dessen ungeachtet war es aber auch in diesen Fällen möglich, wertvolle Hinweise zur Überarbeitung der Unterrichtsreihen zu erhalten.

Somit werden im Folgenden nur das Kraftkonzept und das Feldkonzept mithilfe eines Fragebogens untersucht.

Um den Fortschritt zu beurteilen, wurde zu Beginn ein Fragebogen zur Feststellung des Vorwissens und später zur Erfassung der Kompetenzsteigerung ein ähnlicher, aber tiefergehender Fragebogen von den Lernenden bearbeitet. Der zweite Fragebogen wurde nicht unmittelbar am Ende der Unterrichtsreihe ausgeteilt, sondern jeweils rund ein halbes Jahr später. Dadurch sollte erreicht werden, dass die Schülerinnen und Schüler nicht auf ihr Kurzzeitgedächtnis zurückgreifen konnten. Zugrunde liegt, dass die behandelten Konzepte weniger reines Faktenwissen darstellen sollen, sondern vielmehr elementare bzw. prinzipielle „Werkzeuge“ zur Vorstellung von Wechselwirkungen - Phänomenen und Geschehnissen - repräsentieren. Dadurch sollten die Konzepte von den Schülerinnen und Schülern im weiteren Verlauf des Jahres „im Hintergrund“ bei der Bearbeitung neuer Thematiken bzw. dem Lösen von zugehörigen Aufgaben verwendet und dadurch im Langzeitgedächtnis verankert werden.

Um dafür Sorge zu tragen, dass später eine statistische Untersuchung der Ergebnisse sinnhaft ist und Schlussfolgerungen möglich sind, müssen die Fragebögen eine gewisse Güte aufweisen. Aus diesem Grund wurden die Fragen zum Kraftverständnis angelehnt an validierte Fragen aus amerikanischen Untersuchungen von J.W. Warren (vgl. [WAR79]), die vielfach in der Literatur herangezogen werden. Zum Feldbegriff gibt es bisher keinen Katalog an validierten Fragen. Aus diesem Grund wurden hier mehrere Fach- und Schulbücher nach Fragen bzw. Aufgaben hin durchsucht. Im Nachhinein wurde dann eine gewisse Schnittmenge gebildet und daraus Fragen übernommen bzw. formuliert. Zudem wurde zu beiden Konzepten zusätzlich

eine Rückkopplung mit den Schülerinnen und Schülern während der Beantwortung des Bogens durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Intentionen der Fragen richtig verstanden wurden. Des Weiteren wurden nur Fragebögen von den Schülerinnen und Schülern ausgewertet, die an beiden Terminen (Fragebogen vorher und Fragebogen nachher) im Unterricht waren. Damit sollte sichergestellt werden, dass ein exakter Vergleich beider Stichproben und eine resultierende Interpretation der Ergebnisse möglich ist. Auch wurden nur ausgefüllte Fragebögen derjenigen Kurse in die Auswertung mit aufgenommen, die exakt nach den unter Kapitel 7 dargelegten Handhabungsvorschlägen unterrichtet wurden. Durch diese beiden beachteten Umstände fällt die Anzahl der ausgewerteten Fragebögen beim Kraftkonzept nur auf 71 und beim Feldkonzept auf 91 Lernende. Dies stellt keine repräsentative Studie dar, ermöglicht aber doch eine Interpretation der Ergebnisse.

9.2. Kraftkonzept

9.2.1. Der Fragebogen (vorher)

Auf der folgenden Seite befindet sich der zugrundeliegende Fragebogen zur Abschätzung des Vorwissens bzw. Präkonzeptes. Dieser Fragebogen wurde zwischen der Behandlung der Themengebieten der Kinematik und der Dynamik von den Schülerinnen und Schülern ausgefüllt.

1. Was verbindest du im alltäglichen Sinne mit dem Begriff Kraft?

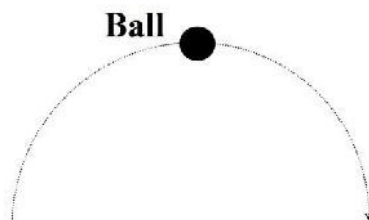
2. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Kraft?

3. Wie hängen deiner Meinung nach Bewegung und Kraft zusammen?

4. Versuche eine Definition der Kraft aufzuschreiben.

5. Wie würdest du die Kraft in einer Formel beschreiben, wovon würde sie abhängen?

6. Ein Ball fliegt die unten dargestellte Kurve entlang. Zeichne alle wirkenden Kräfte mithilfe von Pfeilen ein.



7. Aus der Vogelperspektive siehst du ein Auto durch eine Kurve fahren. Skizziere die Situation und zeichne die wirkenden Kräfte mithilfe von Pfeilen ein.

Der Fragebogen zielt darauf ab, Grundlagen des Kraftbegriffs abzufragen.

Die ersten beiden Fragen verbinden die vorherrschende Diskrepanz zwischen Alltags- und Fachsprache. Inhaltlich sind die Fragen recht uninteressant, aber sie sollen die Schülerinnen und Schüler für diesen Umstand sensibilisieren und darauf hinwirken, die folgenden Fragen differenziert auf die physikalische Sichtweise zu beantworten.

Die dritte Frage bezieht sich auf den dynamischen Kraftbegriff. In der Mittelstufe haben die Schülerinnen und Schüler im Rahmen der Gewichtskraft, der Addition von Kräften, den Kraftwandlern etc. den statischen Kraftbegriff kennen gelernt und sollen hier gedanklich eine Brücke zur dynamischen Sichtweise schlagen.

Frage Vier soll Frage Zwei etwas konkretisieren. Zu Frage Zwei können alle Schülerinnen und Schüler etwas schreiben. Derjenige bzw. diejenige, die hier noch etwas präzisierender antworten kann, verfügt schon über tiefergehende Kenntnisse.

Frage Fünf kann als kleine Kontrollfrage verstanden werden. Viele Schülerinnen und Schüler werden wahrscheinlich mithilfe ihres Vorwissens die Frage einfach mit $F = m \cdot a$ bzw. $F = m \cdot g$ beantworten. Wenn diese Gedankengänge aber nicht in den vorherigen Fragen, speziell in Frage Drei und Vier, in ähnlicher Weise formuliert worden sind, sollte die Antwort in der Auswertung ausgeklammert bzw. extra angegeben werden.

Die letzten beiden Fragen verbinden das vorher erhobene theoretische Wissen über den Kraftbegriff mit seinen Anwendungen. Sehr oft besteht zwischen diesen beiden Anforderungen - Wissen und dessen Anwendung - eine sehr große Divergenz.

9.2.2. Clustern der Antworten

Die Befragten haben oft sehr ähnliche Antworten geliefert, die im Folgenden vom Autor zusammengefasst worden sind, um eine generalisierende Auswertung zu ermöglichen.

Zusammenfassung:

Frage 1

1. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	PS, Maschinenkraft (Motor)	8	11
	Kraft zum Anheben / Gewicht	14	20
	Zur Bewegung	13	18
	Muskelkraft	16	23
	Naturkräfte (Wasser- Windkraft, Erdanziehung)	9	13
	Stärke	11	15

Tabelle 9.1.: Antworten auf die 1. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

Wie erwartet verbinden die Schülerinnen und Schüler den Begriff der Kraft im Alltag mit Stärke und Muskelkraft (bspw. um Gewichte) anzuheben. Des Weiteren wird dicht gefolgt die Kraft von Maschinen, speziell von Motoren, genannt und bekannte Kräfte, die der Autor als Naturkräfte klassifizieren muss.

Frage 2

2. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Newton	14	20
	Geschwindigkeitsänderung	2	3
	Gegenkraft	5	7
	Bewegungsänderung	9	13
	Pfeile	5	7
	Kräfteparallelogramm	4	6
	Nennung von Kräften (Zug-, Flieh-, Gewichts-, Spann-)	16	23
	ausgeübte Energie	4	6
	k.A. (keine Antwort)	12	17

Tabelle 9.2.: Antworten auf die 2. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

Auffällig ist, dass zumeist einfach nur aus der Schule oder dem Alltag bekannte Kräfte aufgezählt werden, gefolgt von der Nennung der physikalischen Einheit der Kraft. Aus dem Vorwissen der Schülerinnen und Schüler heraus wird aber auch schon die Bewegungsänderung relativ häufig genannt, sehr speziell sogar, aber nur zweimal die Geschwindigkeitsänderung. Andere Antworten, wie Gegenkraft, Pfeile oder Kräfteparallelogramm entstanden aus noch vorhandenen aber wahrscheinlich diffusen Vorwissen. Interessant ist aber, dass ein paar Lernende den Begriff mit einer anderen physikalischen Größe - der Energie - in Verbindung setzen. Die Formulierung ist zwar ungewohnt, aber im Kern ihrer Aussage schon recht tiefgehend und richtig.

Frage 3

3. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Man benötigt Kraft, um etwas zu bewegen.	39	55
	Bewegung existiert durch eine Kraft	9	13
	Mit Bewegung wird Kraft ausgeübt	7	10
	Zur Beschleunigung	3	4
	k.A.	13	18

Tabelle 9.3.: Antworten auf die 3. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

Wie erwartet sind die meisten Schülerinnen und Schüler der Meinung, dass Kraft notwendig ist, um etwas bewegen zu können. Sie teilen hiermit die aristotelische Sichtweise und bedenken nicht, dass die Ursache die Reibung ist. Nur drei Lernende (rund 4%) hatten die richtige Antwort - zur Beschleunigung - genannt.

Frage 4

4. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Ursache von Bewegungsänderung und Verformung	4	6
	Kraft wird bedingt durch die Masse	4	6
	Kraft = Masse * Beschleunigung	11	15
	Masse mal Geschwindigkeit	2	3
	Je größer die Masse bzw. Beschleunigung, desto größer ist die Kraft	2	3
	Kraft ist ein Vektor	4	6
	Energie, die auf einen Körper wirkt	4	6
	Kraft braucht Energie	8	11
	Kraft ist Energie, die eingesetzt wird	4	6
	k.A.	28	38

Tabelle 9.4.: Antworten auf die 4. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

Ein Großteil der Schülerinnen und Schüler hat keine Antwort gegeben, da viele von ihnen sich mit der Formulierung von Definitionen äußerst schwer tun. Bedingt durch ihr Vorwissen ist die zweithäufigste Antwort erfreulicherweise aber „Masse mal Beschleunigung“. Die anderen angegebenen Antworten sind nicht alle unbedingt falsch, hier gibt es auch interessante Gesichtspunkte, aber aufgrund der geringen Anzahl an jeweiligen Nennungen ist eine statistische Auswertung wenig aussagekräftig und damit eine Interpretation nicht sinnvoll.

Frage 5

5. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	$F = m \cdot a$	11	15
	$F = m \cdot g$	17	24
	$m \cdot g \cdot h$	8	11
	Masse	4	6
	$F = m \cdot v$	4	6
	$F = K : V$	2	3
	$E = mc^2$	2	3
	Bewegung=Kraft : Weg	4	6
	Kraft = Fläche · Gewicht	6	8
	k.A.	13	18

Tabelle 9.5.: Antworten auf die 5. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

Bei Frage 5 wurde elfmal die Kraft als das Produkt aus Masse und Beschleunigung definiert. Nun sind bei Frage 6 auch elf Nennungen von $F = m \cdot a$ vorzufinden, was recht stimmig ist. Neben diesen Antworten sieht man aber auch noch häufiger $F = m \cdot g$, sprich es wurde der Spezialfall der Gewichtskraft genannt. Diese Antworten sind zunächst auszuklammern, da sie durch die fehlende Nennung in Frage 5 und die Sachlage, dass in der Sekundarstufe 1 speziell die Gewichtskraft behandelt wurde, auf diffuses, ungeordnetes Vorwissen zurückzuführen sind.

Frage 6

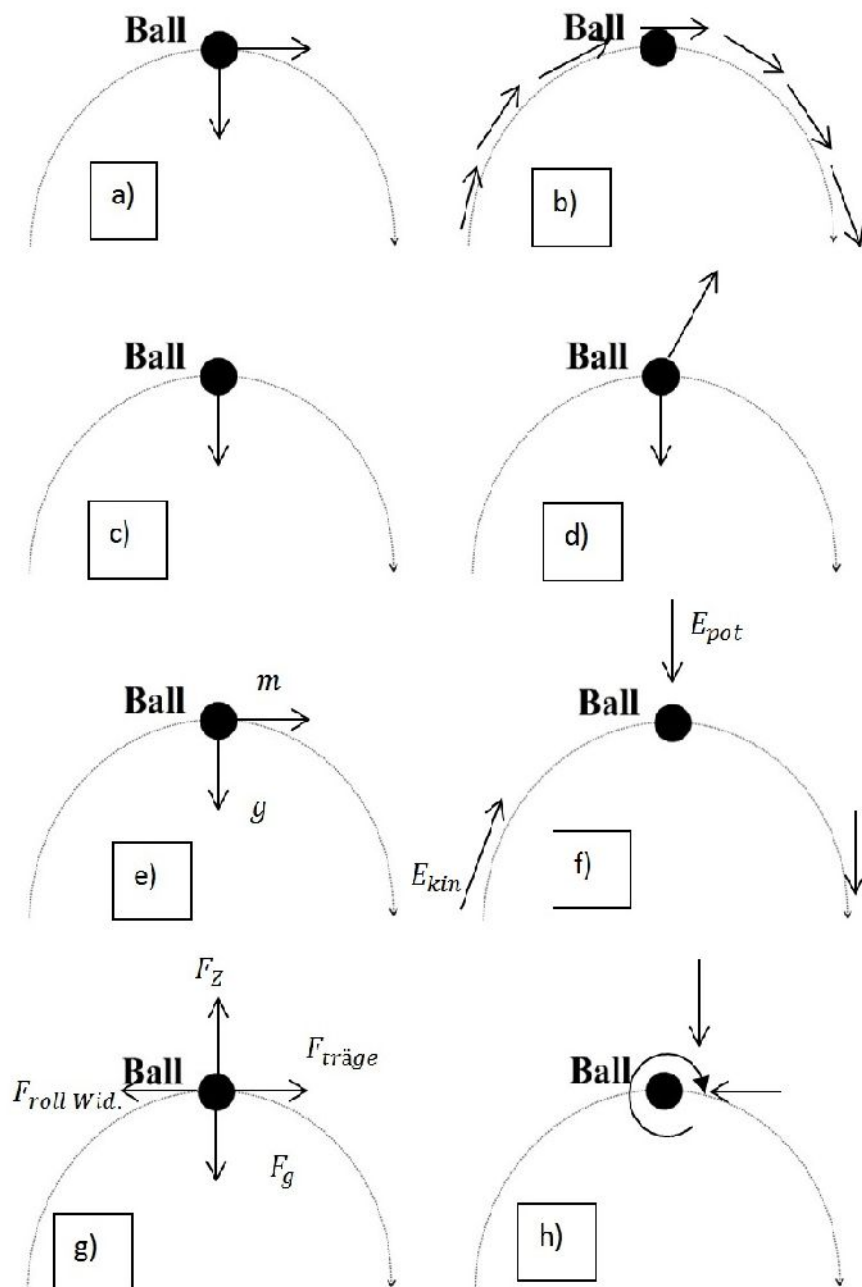


Abbildung 9.1.: Antworten auf die 6. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

6.Frage	Antwort	Anzahl	Antwort	Anzahl
	a)	20	b)	11
	c)	6	d)	5
	e)	3	f)	4
	g)	4	h)	1
	k.A.	17		

Mit großem Abstand wurde die Darstellung von Bild a) von den Lernenden skizziert. Die Schülerinnen und Schüler wissen, dass eine Gewichtskraft immer nach unten wirkt, aber die Vorwärtsbewegung braucht ihrer Meinung nach auch eine Kraft. Dies deckt sich sehr gut mit den Antworten auf Frage 3. Ähnlich verhält es sich mit der Antwort, die zu Bild b) passt. Hier soll die Kraft auch immer entlang der Bahnkurve - in Bewegungsrichtung - wirken. Die richtige Antwort (Bild c) liegt zwar auf dem dritten Platz, hat aber nur ein knappes Drittel bzw. die Hälfte der Stimmen von Antwort a) bzw. b) erhalten. Die anderen Antworten sind schwer auf ihre Kernaussage hin zu interpretieren. Man erkennt ggf. den Gedankengang der Trägheit in Bild e) oder den Drall des Balls in Bild h), aber bspw. der schräge Pfeil in Bild d) scheint nicht deutbar. Aus dieser Vieldeutigkeit heraus werden diese Antworten nicht weiter verfolgt.

Frage 7

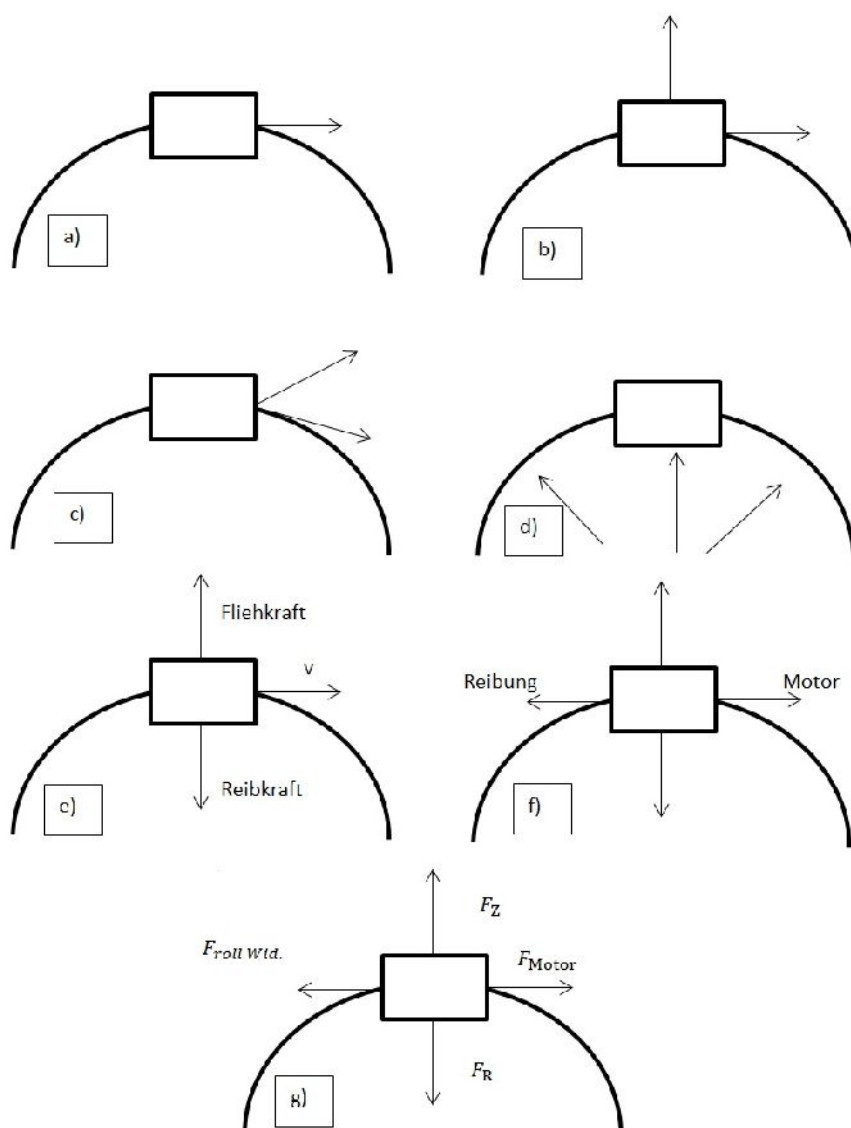


Abbildung 9.2.: Antwort auf die 7. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

7.Frage	Antwort	Anzahl	Antwort	Anzahl
	a)	22	b)	15
	c)	8	d)	6
	e)	6	f)	4
	g)	2	k.A.	8

Tabelle 9.6.: Antwort auf die 7. Frage zum Kraftbegriff (vorher)

Die Antworten sind ähnlich facettenreich wie bei Frage 6. Auch hier zeigt sich, dass für die Lernenden Kräfte meist in die Bewegungsrichtung wirken müssen. Zumeist wurde nur diese eine Kraft angegeben (vgl.a)), aber bis auf Antwort d) muss für alle Schülerinnen und Schüler in Fahrtrichtung eine Kraft wirken. Aus dem Alltagswissen heraus steht auf dem zweiten Platz Antwort b) mit der zusätzlich bekannten Fliehkraft. Ausführlichere Antworten, die noch eine Reibungskraft beinhalten, wie bspw. bei f) oder g), wurden nur recht selten genannt.

9.2.3. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Vorkenntnisse der meisten Schülerinnen und Schüler nur in Ansätzen vorhanden sind. Aus ihrem Vorwissen heraus können noch Antworten wie $F = m \cdot g$ gegeben werden, aber tiefergehende Kenntnisse sind selten zu finden. Nur wenige Schülerinnen und Schüler zeigen durch ihre Antworten schon interessante Einsichten zur Wirkung von Kräften. Bei den meisten Schülerinnen und Schülern ist die „Kraft“ als rudimentäre Begriffsdefinition abrufbar, wenn auch nicht im vollständigen Definitionsumfang. Kraft als physikalisches Erklärungskonzept kann kaum belegt werden.

9.2.4. Der Fragebogen (nachher)

Auf der folgenden Seite ist der zugrundeliegende Fragebogen zur Erörterung des Handhabungserfolges zur Unterrichtsreihe des Kraftkonzeptes. Dieser Fragebogen wurde am Ende der Klasse 11, also rund ein halbes Jahr nach der Unterrichtsreihe, von den Schülerinnen und Schülern ausgefüllt.

Der Fragebogen ist ähnlich zu dem Bogen, der vorher bearbeitet wurde. Die ersten fünf Fragen sind vollkommen identisch, um mögliche Entwicklungen abschätzen zu können. Frage Sechs wurde um den Geschwindigkeitsvektor ausgebaut. Hierbei ging es vor allem darum, noch einmal die Fehlkonzepte zu hinterfragen, bei denen Kräfte immer in Richtung der Bewegung zeigen sollen.

Die folgende Frage behandelt das eigentliche Wechselwirkungsprinzip und ist für die Schülerinnen und Schüler nach längerem Abstand zur Thematik schon recht schwierig zu beantworten und soll Aufschluss darüber geben, ob das Prinzip „*actio* = *reactio*“ richtig verankert ist. Die letzte Frage ist sehr speziell gewählt und soll aufzeigen, welche Erkenntnisse die Lernenden aus der Darlegung der historischen Entwicklung des Kraftbegriffs gewinnen konnten. Es wurde zur Kontrolle absichtlich ein Fehler eingebaut. Statt der Division müsste die Reibungsgröße R multipliziert werden. Damit soll ermittelt werden, welche Schülerinnen und Schüler sich gedanklich differenziert mit dieser Frage auseinandergesetzt haben und welche nur eine oberflächliche Antwort geben.

1. Was verbindest du im alltäglichen Sinne mit dem Begriff Kraft?

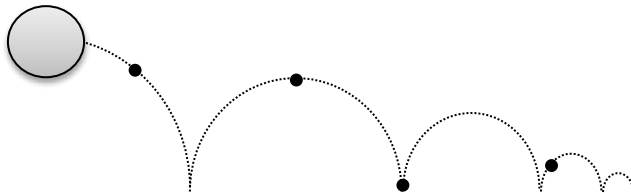
2. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Kraft?

3. Wie hängen deiner Meinung nach Bewegung und Kraft zusammen?

4. Versuche eine Definition der Kraft aufzuschreiben.

5. Wie würdest du die Kraft in einer Formel beschreiben, wovon würde sie abhängen?

6. Ein Ball springt die unten dargestellte Kurve entlang. Zeichne an den Punkten die Geschwindigkeitsrichtung und die wirkenden Kräfte ein.



7. Der schlaue Esel behauptet, dass er wegen der Gültigkeit der Gleichung „Kraft + Gegenkraft = 0“ ($\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$) den Wagen nicht ziehen könnte. Nimm Stellung.



8. Aristoteles hatte folgende Gleichung für die Kraft aufgestellt: $F = \frac{m \cdot v}{R}$, wobei R für die Reibung steht. Nenne Beispiele mit Begründung, warum diese Gleichung nicht gültig sein kann.

9.2.5. Clustern der Antworten

Die Befragten haben oft sehr ähnliche Antworten geliefert, die im Folgenden vom Autor zusammengefasst worden sind, um eine generalisierende Auswertung zu ermöglichen.

Frage 1

1. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Kraft zum Anheben	23	30
	Zur Bewegung	16	23
	Sport, Muskeln, Stärke	30	42
	Naturkräfte	4	6

Tabelle 9.7.: Antworten auf die 1. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Die Frage wurde äußerst ähnlich zum vorherigen Fragebogen beantwortet. Die Begriffe *PS*, *Maschinenkraft* sind nicht mehr gefallen, aber ansonsten gab es nur kleine Verschiebungen von Stimmen.

Frage 2

2. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Newton	3	4
	Geschwindigkeitsänderung	30	42
	Druck in eine Richtung	2	3
	Gegenkraft	13	18
	Reibung	6	9
	Erdanziehung	12	17
	ausgeübte Energie	5	7

Tabelle 9.8.: Antworten auf die 2. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Bei dieser Frage fällt auf, dass die Antworten weniger streuen, d.h. es gibt ein klareres Verständnis zum Kraftbegriff. Mit Abstand am meisten wurde die Geschwindigkeitsänderung (42%) genannt, gefolgt vom Wechselwirkungsgedanken der Gegenkraft und der oft mit Kraft assoziierten Erdanziehung. Erfreulicherweise konnte nun jeder etwas Passendes formulieren, wogegen zum vorherigen Fragebogen rund 17% der Befragten nicht antworten konnten.

Frage 3

3. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Man benötigt Kraft, um etwas zu bewegen	12	17
	etwas schnell oder langsamer zu machen	17	24
	Mit Bewegung wird Kraft ausgeübt	9	13
	Zur Beschleunigung	24	34
	k.A.	9	13

Tabelle 9.9.: Antworten auf die 3. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Man sieht, dass die Ansicht, man benötige Kraft, um etwas zu bewegen, eine Fehlvorstellung von hoher Persistenz ist. Die Anzahl ist zwar von 55% auf rund 17% deutlich herunter gegangen, aber der Gedanke ist immer noch da. Die richtigen Antworten, „schneller machen“ bzw. „zur Beschleunigung“ sind allerdings in entsprechender Anzahl - von 5% auf knapp 60% - gestiegen.

Frage 4

4. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Um Energie umzuwandeln	13	18
	Kraft = Masse * Beschleunigung	36	51
	Masse mal Geschwindigkeit	8	11
	Masse mal Erdbeschleunigung mal Reibung	4	6
	Kraft ist Energie, die eingesetzt wird	6	8
	k.A.	4	6

Tabelle 9.10.: Antworten auf die 4. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Wie erwartet, ist mit Abstand auf dem ersten Platz „Masse mal Beschleunigung“ mit rund 50%. Auf dem zweiten Rang wurde der Ansatz der Energieumwandlung (18%) genannt. Grund hierfür ist sehr wahrscheinlich das Themengebiet der „Arbeit und Energie“, das im zweiten Halbjahr behandelt wurde. Die Nennungen „Kraft ist Energie, die eingesetzt wird“ könnten eigentlich noch zur Energieumwandlung gezählt werden und bedürfen keiner expliziten Interpretation. Die falsche Antwort „Masse mal Geschwindigkeit“ wurde zwar nicht oft gegeben (gut 11%), hat sich aber im Vergleich zum ersten Fragebogen erhöht. Bei einem geringen Teil der Schülerinnen und Schüler hat sich durch die genaue Betrachtung der Entwicklung des Kraftbegriffs ggf. erst ein Misskonzept entwickelt. Aber bei dieser kleinen Anzahl sollte hier nichts dramatisiert werden, da die Anzahl sich auch durch Abschreiben beim Nachbarn, durch die Verwechslung mit dem Impuls usw. erhöht haben könnte. Erfreulicherweise ist auch hier die Anzahl von „keine Antwort“ deutlich von 40%

auf 6% heruntergegangen.

Frage 5

5. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	$F = m \cdot a$	46	65
	$F = m \cdot g$	17	24
	$F = m \cdot v$	8	11

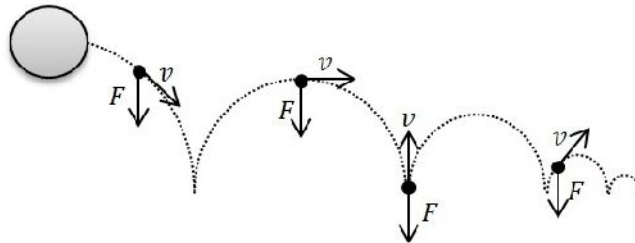
Tabelle 9.11.: Antworten auf die 5. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Bei Frage 5 hat sich die Anzahl an unterschiedlichen Antworten stark reduziert. Die Formel zur Berechnung der Kraft konnten sich die Schülerinnen und Schüler also sehr gut merken. Fast alle - knapp 90% haben mit $F = m \cdot a$ oder dem Spezialfall $F = m \cdot g$ geantwortet.

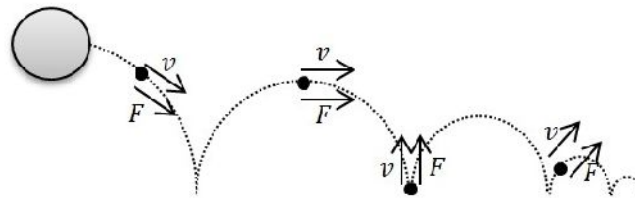
Der falsche Ansatz „Masse mal Geschwindigkeit“ hat sich hier in gleicher Anzahl wie in Frage 4 niedergeschlagen, was aber zumindest bedeutet, dass die Betreffenden Formulierung und Symbolik vereinbaren können.

Frage 6

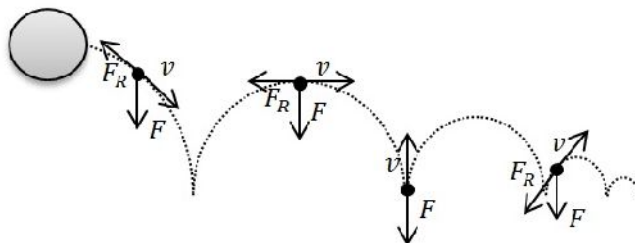
a)



b)



c)



d)

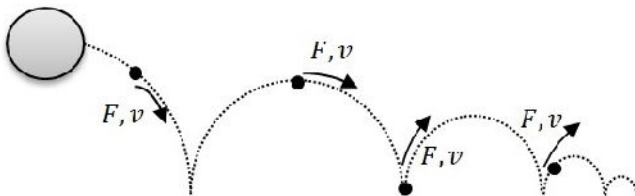


Abbildung 9.3.: Antwort auf die 6. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Die richtigen Antworten a) und c) wurden mit 36 bzw. 9 Stimmen zum Großteil

- rund 64% - angegeben. Aber auch hier hat sich der fest sitzende Gedanke, dass eine Kraft in Bewegungsrichtung zeigt, immer noch mit 12 Stimmen (17%) niedergeschlagen. Keine Antwort konnten 14 (rund 20%) Schülerinnen und Schüler liefern.

Frage 7

7. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Gilt nicht, da Esel und Wagen als ein Körper anzusehen sind	19	27
	Actio = Reactio gilt zwischen Hufen und Boden. Aufgrund der Reibung kann er sich fortbewegen	22	31
	Reibung	12	17
	k.A.	18	25

Tabelle 9.12.: Antworten auf die 7. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Die Grundlage des Wechselwirkungsgesetzes konnten sich gut ein Viertel der Lernenden merken. Die Angabe, wo „actio = reactio“ in diesem Beispiel zu finden ist, haben mit 31%, die meisten Schülerinnen und Schüler angegeben. Die Schnittmenge lag bei drei der Befragten. Die einfache und sehr kurze Antwort der „Reibung“ ist sehr schwer in diesem Zusammenhang zu interpretieren. Auf Nachfrage bei den Befragten kamen genau so viele richtige wie falsche Ansätze heraus (Grund für die kurze Antwort war die mangelnde Möglichkeit, die Gedanken zu formulieren). Insgesamt konnten 18 Lernende keine Antwort geben, das sind gut 25% der Stimmen.

Frage 8

8. Frage	Antworten	Anzahl	Prozent
	Verbesserung: Mit R multiplizieren	21	30
	Verbesserung und Beispiel horror vacui	14	20
	keine Antwort	36	50

Tabelle 9.13.: Antworten auf die 8. Frage zum Kraftbegriff (nachher)

Die Hälfte der Lernenden haben den Fehler erkannt und konnten diesen verbessern, davon konnten nochmals zwei Drittel das Beispiel mit dem nicht möglichen Vakuum nennen. Interessanterweise haben die Schülerinnen und Schüler entweder richtig geantwortet oder keine Antwort geliefert.

9.2.6. Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse

Wie erwartet hat sich die Menge an unterschiedlichen Antworten in den ersten fünf (Wiederholungs)-Fragen reduziert und die Anzahl an richtigen Antworten hat sich deutlich gesteigert. Das ist aber selbst nach einem halben Jahr Pause nicht weiter verwunderlich, weil der reine Kraftbegriff in den folgenden Themengebieten (Impuls, Drehbewegungen, Arbeit und Energie, mechanische Schwingungen und Wellen) immer wieder aufgegriffen wurde und damit bspw. die Formel zur Berechnung der Kraft immer wieder angewendet wurde.

Anders verhält es sich aber bei den Fragen 6 bis 8. Diese Fragen sind spezieller und wurden in der Zwischenzeit nicht explizit angesprochen. Hier sind trotzdem die unterschiedlichen Antworten deutlich von rund acht auf drei verschiedene gesunken. Die Fragen 6 und 7 wurden von einem Großteil der Schülerinnen und Schülern richtig beantwortet und weisen darauf hin, dass das Konzept der Kraft als ein Konzept der Wirkungsbeschreibung gut verstanden wurde. Bei Frage 6 konnte die große Problematik der Gleichstellung zwischen Krafrichtung und Bewegungsrichtung adäquat von den Schülerinnen und Schülern aufgehoben werden.

Die Antworten auf Frage 7 zeigen, dass die Verständnisschwierigkeit des Wechselwirkungsprinzips nicht bei allen Lernenden beseitigt wurde. Hier muss ggf. in der eigentlichen Unterrichtsreihe mehr Zeit aufgewendet werden und auf jeden Fall bei nachfolgenden Thematiken in der Mechanik stärker eingegangen werden (bspw. Kräfte bei Drehbewegungen). Die sehr spezielle Frage 8 wurde von der Hälfte der Lernenden richtig beantwortet und zeigt bei manchen ggf. „nur“ ein gutes Erinnerungsvermögen, aber bei vielen ein gut gesetztes Verständnis des Kraftbegriffs im Rahmen von Bewegungen.

Insgesamt lässt sich also sagen, dass das Wechselwirkungskonzept der Kraft gut bei den Schülerinnen und Schülern gefruchtet hat und sie ein Verständnis des Kraftbegriffs in ihr Langzeitgedächtnis integrieren konnten. Auf Grundlage dieses Verständnisses kann nun gut in das Wechselwirkungskonzept des Feldes eingeführt werden und dabei der Kraftbegriff bezüglich der Feldstärke noch weiter ausgebaut werden.

9.3. Feldkonzept

9.3.1. Der Fragebogen (vorher)

Auf der folgenden Seite befindet sich der zugrundeliegende Fragebogen zur Abschätzung des Vorwissens bzw. Präkonzeptes. Dieser Fragebogen wurde vor dem Themengebiet der Elektrostatik bzw. Elektrodynamik von den Schülerinnen und Schülern ausgefüllt.

1. Was verbindest du im alltäglichen Sinne mit dem Begriff Feld?

2. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Feld?

3. Was erzeugt deiner Meinung nach ein Feld?

4. Was hat deiner Meinung nach der physikalische Kraftbegriff F mit dem Feldbegriff zu tun?

5. Versuche eine Definition des Feldes aufzuschreiben.

6. Kann man ein Feld mithilfe einer Formel beschreiben? Wenn ja, wie würde dies deiner Meinung nach erfolgen?

7. Skizziere sowohl bei dem Magneten als auch bei der elektrisch geladenen Kugel das Feld und klassifiziere es.



Der Fragebogen zielt darauf ab, Grundlagen des Feldbegriffs abzufragen.

Die ersten beiden Fragen sollen auf die vorherrschende Diskrepanz zwischen Alltags- und Fachsprache aufmerksam machen und die Lernenden gedanklich auf die nachfolgende Anwendung des physikalischen Feldbegriffs einstimmen und hinführen.

Die dritte Frage soll die Schülerinnen und Schüler zunächst etwas tiefer in das Themengebiet einführen und das vorhandene Wissen zum Feldbegriff aus der Sekundarstufe I reaktivieren, indem sie sich Gedanken über mögliche Ursachen von Feldern machen.

Das Feld ist für Schülerinnen und Schüler ein recht schwer zu verstehender Begriff, der mit vielen fehlerhaften Präkonzepten versehen ist. Um diesen Umstand etwas abzufangen, soll Frage 4 die Lernenden dazu ermutigen, den „neuen“ Begriff des Feldes mit einem schon bekannten - der Kraft - zu verknüpfen. Damit wird zudem die kommende Frage 5 etwas vorbereitet, da hier eine adäquate Formulierung ohne den Kraftbegriff nicht möglich ist.

Frage 5 - eine Definition von etwas Grundlegendem - ist zumeist für die Lernenden schwierig zu formulieren, hilft aber die bisherigen Fragen zu verknüpfen (Erzeugung und Wirkungen von Feldern).

Frage 6 soll mathematische Vorstellungen zum Feldbegriff abklären. Da in der Sekundarstufe I der Feldbegriff rein qualitativ, d.h. phänomenologisch, behandelt wurde, können die Schülerinnen und Schüler hier auf keinerlei Vorwissen zurückgreifen und müssen sich auf ihre Ideen stützen.

In der letzten Frage soll aufgedeckt werden, ob die Schülerinnen und Schüler noch das Modell der Feldlinie kennen und wenn ja, wie es angewendet wird.

9.3.2. Clustern der Antworten

Die Befragten haben oft sehr ähnliche Antworten geliefert, die im Folgenden vom Autor zusammengefasst worden sind, um eine generalisierende Auswertung zu ermöglichen.

Zusammenfassung:

Frage 1

1. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Wiesenfläche	13	11
	Eine Fläche	19	16
	Fußballfeld	35	29
	Einen Bereich	10	8
	Mais-, Korn-, Weizenfeld	45	37

Tabelle 9.14.: Antworten auf die 1. Frage zum Feldbegriff (vorher) (Mehrfachnennung möglich)

Die Schülerinnen und Schüler nennen, wie erwartet, die assoziierten Begriffe mit dem alltäglichen Begriff des Feldes.

Frage 2

2. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Ein gewisser Bereich, in dem etwas Physikalisches passiert	6	6
	Die Elektrostatik bzw. el. Feld	25	23
	Magnetfeld	48	44
	unsichtbar	4	4
	Elektrizität	10	9
	Feldlinien	3	3
	Kraftfeld	10	9
	Gravitation	3	3

Tabelle 9.15.: Antworten auf die 2. Frage zum Feldbegriff (vorher) (Mehrfachnennung möglich)

Knapp die Hälfte der Befragten denken beim Begriff des Feldes aus wissenschaftlicher Sicht zunächst an das Magnetfeld, da dieses uns durch Magnettafeln etc. und

auch durch seine im Alltag erlebbare Intensität bemerkbar wird. Dicht gefolgt ist es vom elektrischen Feld mit rund einem Viertel der Stimmen. Die restlichen Aussagen sind relativ unauffällig auf weitere Assoziationen mit dem physikalischen Feldbegriff gefallen. Einzig noch interessant ist, dass 6% der Schülerinnen und Schüler das Feld schon verallgemeinern als einen Bereich, in dem etwas stattfindet, sie also die bekannten Felder zusammenfassen.

Frage 3

3. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Protonen, Neutronen oder Elektronen erzeugen ein immaterielles Feld	4	4
	Elektronen	11	11
	Ein Magnet bzw. Magnetismus	22	22
	Ladungen (positiv und negativ)	12	12
	Anziehung	2	2
	elektrische Spannung	11	11
	Eine Kraft	8	8
	Eine Spule	5	5
	Erddrehung	2	3
	unterschiedliche Pole	3	3
	Strom	4	4
	k.A. (keine Antwort)	14	14

Tabelle 9.16.: Antworten auf die 3. Frage zum Feldbegriff (vorher) (Mehrfachnennung möglich)

Ähnlich wie in Frage 2 wird am meisten auf das Magnetfeld eingegangen, wobei aber viele, die das Magnetfeld in Frage 2 genannt haben, hier anscheinend Ursachen für andere Felder nennen. Bei genauer Betrachtung wird hier die Ursache von elektrischen Feldern bei Zusammenfassung von den Punkten 1,2,4,6 am meisten genannt. Da die Lernenden noch wenige Verknüpfungen herstellen können, wird hier oft die Spannung genannt. Mit den Nennungen der Spule und des Stroms (rund 10% zusammen) werden auch schon relativ spezielle Ursachen für Magnetfelder genannt. Leider konnten schon bei dieser recht simplen Frage für Sek. II-Schüler 14 % der Befragten keine Antwort liefern.

Frage 4

4. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Die Kraft ist die Anziehungs- bzw. Abstoßungskraft eines Feldes	12	13
	Findet man bestimmt in einer Formel zum Feld wieder	2	2
	Schwerkraft beschreibt die Anziehungskraft	2	2
	Feldlinienkraft	4	4
	Kraft die in einem Feld wirkt	7	8
	Feld erzeugt eine Kraftwirkung	3	3
	Die Stärke des Feldes	7	8
	k.A.	53	69

Tabelle 9.17.: Antworten auf die 4. Frage zum Feldbegriff (vorher)

Diese physikalisch tiefergehende Frage führt dazu, dass schon knapp 70% der Schülerinnen und Schüler keine Antwort mehr geben können. Die Übrigen schätzen die Verbindung zwischen Feld und Kraft aber schon relativ gut und richtig ein. Die Angaben / Formulierungen sind zwar alle etwas abweichend, aber im Kern sagen sie alle das Gleiche aus.

Frage 5

5. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Ist ein Gebiet in dem ein Prozess stattfindet	12	13
	Eine unsichtbare (Kraftzone), deren Kraft je nach Entfernung abnimmt	7	8
	Ein Feld ist ein Bestreben von Teilchen, zu einem anderen Pol zu gelangen	3	3
	Je größer das Feld, desto mehr Ladungen kann es enthalten	2	2
	Unsichtbarer Austausch von Teilchen, wodurch eine Kraft entsteht	2	2
	Elektronentransport	2	2
	k.A.	62	69

Tabelle 9.18.: Antworten auf die 5. Frage zum Feldbegriff (vorher)

Keine adäquate Antwort. Definitionen sind für Lernende immer relativ schwer zu formulieren, aber ein Fünftel konnte es richtig als eine Änderung von Raumeigen-

schaften klassifizieren, wobei einige sogar schon die Abnahme der Stärke über die Entfernung mit eingebracht haben. Die anderen Antworten beinhalten alle in Teilen das Misskonzept, dass ein Feld immer mit der Bewegung von Ladungen einhergeht, bzw. in einem Feld Ladungen existieren müssen. (Hier ist davon auszugehen, dass die Schülerinnen und Schüler nicht auf das Austauschteilchenkonzept Rückgriff nehmen und deshalb der Teilchenaustausch genannt wird.)

Frage 6

6. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Feld = Fläche · Kraft	4	4
	Strom- bzw. Magnetstärke · Fläche	3	3
	Kraft = Größe des Feldes : wirkende Kraft	4	4
	k.A.	79	88

Tabelle 9.19.: Antworten auf die 6. Frage zum Feldbegriff (vorher)

Was aus den Antworten zu Frage 6 hervorgeht, ist - übrigens nicht unerwartet - die Erkenntnis, dass die Formulierung einer physikalisch sinnvollen Definition generell eine intellektuelle Ausnahmesituation darstellt, die nur von wenigen Menschen bewältigt werden kann. Knapp 90% der Schülerinnen und Schüler geben keine Antwort ab und die übrigen Antworten sind abseitig.

Frage 7

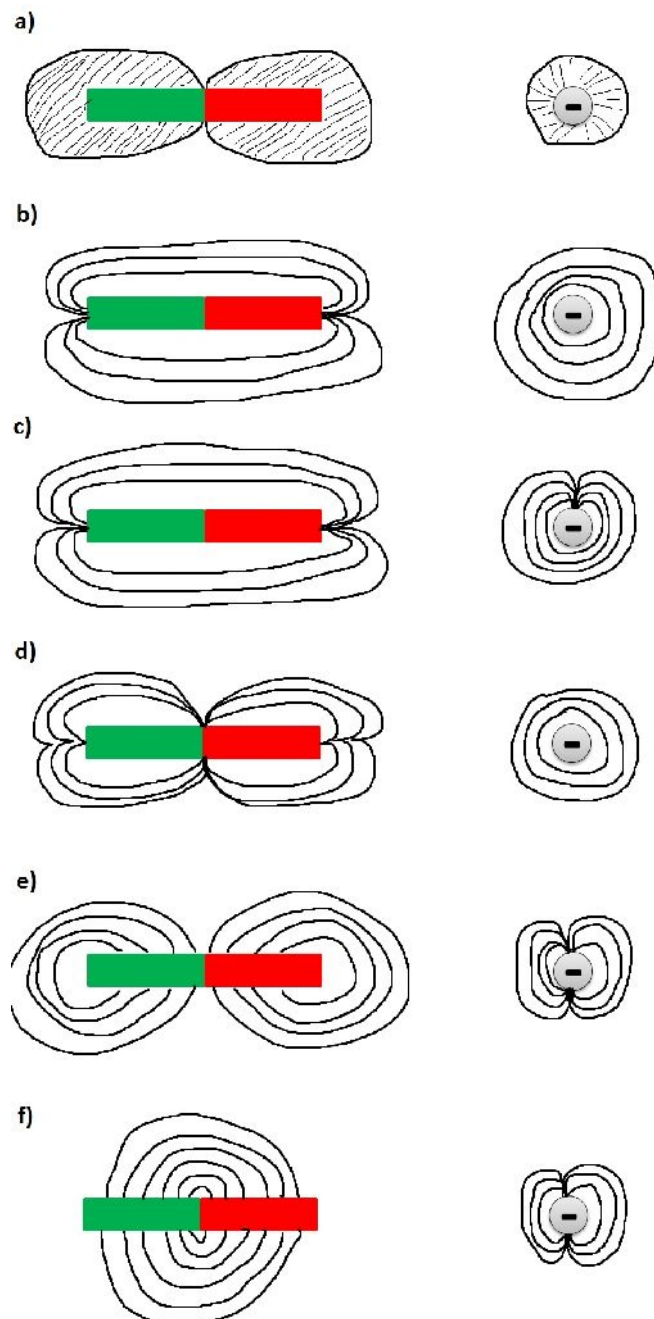


Abbildung 9.4.: Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (vorher)

7. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	a)	12	13
	b)	10	11
	c)	7	8
	d)	14	16
	e)	13	14
	f)	4	4
	Richtige Skizze	11	12
	k.A.	19	21

Tabelle 9.20.: Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (vorher)

Rund 80% der Befragten ist die Darstellung von elektrischen Feldern mithilfe von Linien aus der Sek. I im Gedächtnis geblieben, zwar in den meisten Fällen falsch, aber die ikonische Darstellungsweise ist gut verankert. Beide Feldlinienbilder (magnetische und elektrische) wurden von rund 12% richtig wiedergegeben, wobei die richtige Darstellung der magnetischen Feldlinien (b) c) f)) mit eingerechnet, einen Wert von rund 35% der Aussagen liefert. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in der besseren Darstellungsmöglichkeit und der damit eingehenden Untersuchung der mag. Feldlinien in der Sek.I.

9.3.3. Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Vorkenntnisse der meisten Schülerinnen und Schüler eher als gering einzuschätzen sind. Sie kennen begrifflich die grundlegenden Felder - magnetische und elektrische - aus dem Alltag. Interessanterweise kennen nur wenig Lernende das permanent auf sie einwirkende Gravitationsfeld. Bei der Ursache von Feldern wird das Wissen dann schon erheblich dünner und bei jeder tiefergehenden Frage erweist sich die Annahme ein Vorwissen wäre aus der Sekundarstufe I vorhanden, als nicht zutreffend. Einzig die mögliche Darstellungsweise von Feldern mithilfe von Linien ist noch bei relativ vielen abrufbar.

9.3.4. Der Fragebogen (nachher)

Auf der folgenden Seite ist der zugrundeliegende Fragebogen zur Erörterung des Handhabungserfolges der Unterrichtsreihe zum Feldkonzept wiedergegeben. Dieser Fragebogen wurde, wie beim Kraftkonzept, rund ein halbes Jahr nach der Unterrichtsreihe von den Schülerinnen und Schülern ausgefüllt.

Der Fragebogen ist recht ähnlich zu dem Bogen, der vorher bearbeitet wurde. Die ersten fünf bzw. sechs Fragen sind vollkommen identisch, um mögliche Entwicklungen abschätzen zu können. Hier wurde lediglich die 1. Frage zum Feldbegriff aus dem Alltag im zweiten Fragebogen ausgelassen, da hier keine Änderung erwartet wurde.

Frage 6 beinhaltet die Darstellung von Feldern mithilfe von Feldlinien und verbindet das Modell mit anderen physikalischen Begriffen. Die erste Frage soll aufzeigen, ob die Lernenden den Zusammenhang zwischen Feldlinien und wirkender Kraft verstanden haben. Die zweite Frage bringt zudem noch den Energiebegriff ein.

Insgesamt gesehen stellen diese Fragen ein starkes Prüfinstrument dar, weil sie nur richtig beantwortet werden können, wenn das Konzept des Feldes adäquat verstanden wurde. Die Fragen an sich wurden nur sehr kurz während der Unterrichtsreihe angeschnitten, somit sollten die Lernenden nun - ein halbes Jahr später - die Frage nicht mehr gut durch reines Faktenwissen beantworten können.

Die letzte Frage verbindet nochmals auf ikonische Weise das Feldkonzept mit dem Kraftkonzept.

1. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Feld?

2. Was erzeugt deiner Meinung nach ein Feld?

3. Was hat deiner Meinung nach die physikalische Kraft F mit dem Feldbegriff zu tun?

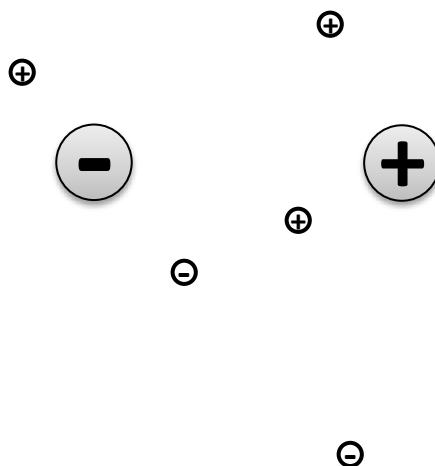
4. Schreibe eine Definition des physikalischen Feldes auf.

5. Kann man ein Feld mithilfe einer Formel darstellen? Wenn ja, wie würde es deiner Meinung nach aussehen?

6. Felder veranschaulichen wir mithilfe von Feldlinien: Erkläre:
Warum dürfen Feldlinien sich nicht schneiden?

Warum gibt es keine geschlossenen elektrischen Feldlinien?

7. Skizziere jeweils die Kraftrichtung und deren Betrag, die auf die kleinen Probeladungen wirken.



9.3.4.1. Clustern der Antworten

Die Befragten haben vielfach ähnliche Antworten geliefert die im Folgenden zusammengefasst werden sollen, um eine generalisierende Auswertung zu ermöglichen.

Frage 1

1. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Ein Bereich in dem sich Ladungen bewegen	14	16
	Bereich in dem eine Kraft auftritt	18	20
	Raum zwischen geladenen Elektroden, in dem eine Kraft wirkt	18	20
	Im Raum zwischen geladenen Körpern herrscht ein Feld	14	16
	Feldstärke, Feldlinien	12	13
	k.A.	14	16

Tabelle 9.21.: Antworten auf die 1. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Gute 80% der Schülerinnen und Schülern konnten zufriedenstellende Antworten liefern.

36% der Befragten verbinden das Feld rein mit der Elektrik, da hier nur der Raum zwischen geladenen Körpern genannt wird. Rund 13% nennen assoziierte Begriffe. Die erste Antwort „Ein Bereich in dem sich Ladungen bewegen“ ist nur unzureichend richtig und vernachlässigt vollkommen den statischen Fall, was aber nicht auf das Unvermögen der Lernenden hindeutet, sondern auch mehr eine Assoziation mit den Lerngegenständen darstellt. Interessant ist die zweite Antwort mit 20%, da hier eine sehr allgemeine Darstellungsweise vom Begriff des Feldes gewählt wurde und keine Einengung zur Elektrik stattfindet. Der Grund hierfür liegt sehr wahrscheinlich in den letzten Stunden der Reihe, wo Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Feldern behandelt wurden.

Frage 2

2. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Magnete	15	17
	Stromfluss	20	22
	Masse	7	8
	Ladungen	17	19
	positiv und negativ geladene Elektroden	11	12
	geladene Körper	15	17
	Wenn Ladungen sich ausgleichen wollen	5	6

Tabelle 9.22.: Antworten auf die 2. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Im Vergleich zum Fragebogen vorher werden nur richtige Antworten geliefert (vorher knapp 30% falsch). Sonst gibt es keine größeren Auffälligkeiten bis auf die recht geringe Anzahl an Nennungen der Masse.

Frage 3

3. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Die Kraft ist das, was auf einen Körper in einem Feld wirkt	25	28
	Raumpunkte um geladene Körper werden Kräfte zugeordnet	16	18
	Stärke des Feldes	18	20
	Je dichter die Feldlinien, desto größer die Kraft	14	16
	k.A.	14	16

Tabelle 9.23.: Antworten auf die 3. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Die Verknüpfung zwischen Feldkonzept und Kraftkonzept ist fast allen Lernenden (rund 85%) gelungen. Die Antworten differieren lediglich in ihrem Allgemeinheitsgrad und der Einbringung des Darstellungsmodells der Feldlinie.

Frage 4

4. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	Raum zwischen geladenen Elektroden, in dem eine Kraft wirkt	27	30
	Felder bedeuten, dass Raumpunkten um geladenen Körpern Kräfte zugeordnet werden	17	19
	nicht direkt wahrnehmbar	11	12
	k.A.	35	39

Tabelle 9.24.: Antworten auf die 4. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Die Hälfte der Schülerinnen und Schülern konnte eine kurze und prägnante Definition des Feldes formulieren. In etwa genau so viele haben keine Antwort oder keine Definition gegeben.

Mit klar formulierten Definitionen tun sich Schülerinnen und Schüler erfahrungsgemäß immer sehr schwer. Aus diesem Grund werden wahrscheinlich viele Lernende, die den Feldbegriff eigentlich verstanden haben, denen aber keine adäquate Formulierung einfiel, nichts geschrieben haben. Dadurch lässt sich vermuten, dass sehr wahrscheinlich mehr als die Hälfte der Schülerinnen und Schüler richtige Ansätze und damit ein Feldverständnis hatten.

Frage 5

5. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	$E = \frac{F}{q}$	46	51
	$E = \frac{U}{l}$	13	14
	$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$	11	12
	$F = m \cdot g$	6	7
	$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$	5	6
	k.A.	9	10

Tabelle 9.25.: Antworten auf die 5. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Zunächst ist zu sagen, dass vorher rund 90% und jetzt nur noch 10% der Lernenden keine Antwort gaben. Ein Großteil der Antworten mit 78% sind richtig, wobei hiervon ein kleiner Teil den sehr speziellen Fall der Coulombkraft (12%) nannten, ähnlich viele Lernende den Spezialfall im homogenen Feld angaben, aber über die Hälfte den allgemeinen Ansatz über die Feldstärke wählten.

Insgesamt konnten sich die Lernenden somit die grundlegende Formel gut einprägen.

Frage 6a

6. Frage a)	Antwort	Anzahl	Prozent
	Kraft kann nicht in zwei Richtungen wirken	13	14
	Es würde sonst eine resultierende Feldlinie aus beiden entstehen	21	23
	Sie würden sich verbinden	17	19
	weil sich Feldlinien abstoßen	17	19
	k.A.	22	24

Tabelle 9.26.: Antworten auf die 6a. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Die ersten drei gegebenen Antworten mit rund 55% der Stimmen sind richtig. Da die Frage nur kurz während der Unterrichtsreihe angesprochen wurde und der zweite Fragebogen knapp ein halbes Jahr später bearbeitet wurde und somit das Wissen nicht aus dem Kurzzeitgedächtnis kommt, konnten mehr als die Hälfte der Schülerinnen und Schülern das grundlegende Konzept der Feldlinie verinnerlichen. Die andere Hälfte konnte entweder nichts schreiben oder hat versucht, den Sachverhalt etwas konfus (Abstoßungseffekte zwischen Feldlinien) zu beschreiben.

Frage 6b

6. Frage b)	Antwort	Anzahl	Prozent
	Kurzschluss (unablässige Drehung von Ladungen)	10	11
	Weil Feldlinien immer von einer Ladung zu einer anderen verlaufen	10	11
	Da immer Plus und Minus verbunden wird	16	18
	Würden sich sonst aufheben	12	13
	k.A.	42	47

Tabelle 9.27.: Antworten auf die 6b. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Wie schon bei der vorherigen Frage wurde der entsprechende Sachverhalt nur kurz am Rande thematisiert. Die erste Antwort ist richtig, wurde aber nur von 11% der Lernenden genannt. Die zweite und dritte Antwort (rund ein Drittel der Befragten) sind auch richtig, wiederholen aber nur einen Teil der Definition der Feldlinie und nicht den dahinter liegenden physikalischen Sinn. Antwort vier ist schwer zu interpretieren und wird einfach als falsch gewertet. Wie auffällig ist, aber zum Teil erwartet war, konnten knapp die Hälfte der Schülerinnen und Schüler keine Antwort liefern.

Frage 7

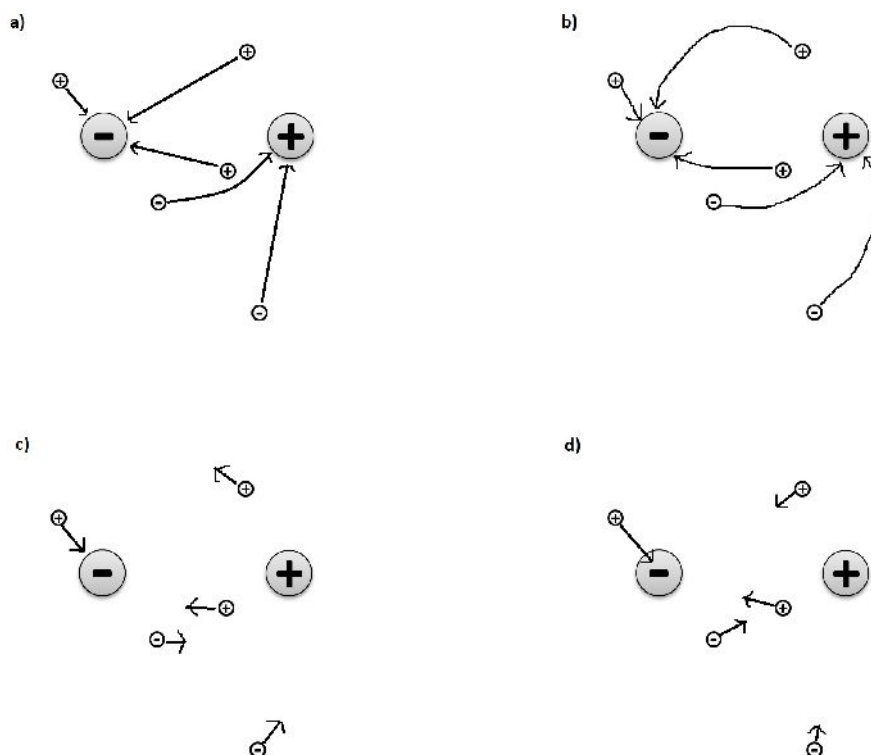


Abbildung 9.5.: Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (nachher)

7. Frage	Antwort	Anzahl	Prozent
	a)	22	24
	b)	13	14
	c)	22	24
	d)	13	14
	k.A.	20	22

Tabelle 9.28.: Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (nachher)

Gut ein Viertel der Schülerinnen und Schülern haben die Aufgabe mit c) richtig beantwortet. Die übrigen Antworten weisen folgende Mängel bzw. Fehlinterpretationen auf:

- Bei a) wurde fast immer der direkte Verbindungsweg auf die anziehende Ladung angegeben. Bei einer Ladung wurde eine Biegung dargestellt, um nicht durch die andere Ladung zu zeichnen. Hier lassen sich somit nur wenige richtige Aspekte herauskristallisieren.

- Bei b) wurde statt der eigentlichen Kraftrichtung die Bewegung längs der Feldlinie angegeben.
- Bei d) wurde ähnlich wie in a) gedacht, nur das hier der Betrag der Kraft noch über die Länge der Pfeile Beachtung fand.

Insgesamt konnten 38% (b und c) der Lernenden überwiegend richtige Aspekte bei der Beantwortung der Frage liefern.

9.3.5. Zusammenfassende Interpretation der Ergebnisse

Wie auch schon beim Kraftbegriff hat sich einerseits die Menge an unterschiedlichen Antworten in den ersten fünf (Wiederholungs)-Fragen reduziert und andererseits die Anzahl an richtigen Antworten vergrößert. Dieses Ergebnis ist aber anders zu interpretieren als beim Kraftkonzept.

Der Anteil an richtigen Antworten ist bei den nachher erfolgten Fragebögen prozentual ähnlich, aber die Vorkenntnisse der Schülerinnen und Schülern waren im Feldkonzept geringer. Des Weiteren wurde das eigentliche Feldkonzept in den nachfolgenden Unterrichtseinheiten weniger intensiv angesprochen als beim Kraftbegriff. Somit kann festgehalten werden, dass die Schülerinnen und Schüler einen etwas höheren Lernerfolg im Feldkonzept verzeichnen konnten als im Kraftkonzept. Mögliche Gründe hierfür können nur unzureichend geschlussfolgert werden, da hier zu viele - bekannte und unbekannte - Parameter eingehen. Folgende Gründe können eine Rolle spielen:

- Individuelles Interesse am Lerngegenstand. Am technischen Gymnasium teilt sich die Schülerschaft in die Schwerpunkte Elektrotechnik, Maschinenbautechnik und Bautechnik auf. Die Physikkurse sind von diesen willkürlich durchmischt, wodurch je nach Zusammensetzung mehr Lernende Interesse am Feldbegriff (E-Techniker) oder am Kraftbegriff (Maschinenbauer / Bautechniker) haben.
- Klausurphase während einer Unterrichtsreihe. Ggf. ist die Aufmerksamkeit und Motivation unabhängig vom Lerngegenstand niedriger anzusehen.
- Der Feldbegriff ist für die Lernenden „neuer“ als der Kraftbegriff, infolgedessen kann eine höhere Motivation durch Neugier erreicht werden.
- Der Feldbegriff wird zeitlich später behandelt. Die Schülerinnen und Schüler sind eventuell reifer und messen dem Unterricht mehr Bedeutung zu.
- Der vorherige Punkt kann auch aus der anderen Perspektive gesehen werden, die Lernenden befinden sich zeitlich näher an den Abiturprüfungen und sind dadurch motivierter, gute Leistungen zu erbringen.
- uvm.

Insgesamt lässt sich sagen, dass das Wechselwirkungskonzept des Feldes gut bei den meisten Schülerinnen und Schülern verankert wurde und sie ein Verständnis des Feldbegriffs entwickeln konnten.

Die Handhabung mit den vorgeschlagenen Unterrichtsreihen kann natürlich an der einen oder anderen Stelle noch etwas verbessert werden. Im Hinblick auf die Eingliederung des Wissens in das Langzeitgedächtnis könnten die Wechselwirkungskonzepte in den Folgezeilen noch stärker angesprochen werden. Beim Kraftbegriff könnte bei Betrachtung der Ergebnisse von Frage 7 (actio = reactio beim Eselkarren) das Verständnis weiter verbessert werden, wenn bspw. im Rahmen der Drehbewegung die Wechselwirkungskräfte (Unterscheidung von Zentripetal- und Zentrifugalkraft) noch tiefergehender thematisiert würde. Im Feldkonzept sieht dies ähnlich aus. Frage 7 konnte hier auch nur unzureichend beantwortet werden. Grund hierfür könnte sein, dass in den Folgezeilen zumeist nur homogene Felder betrachtet werden (Ablenkung geladener Teilchen im E- und B-Feld), wo Kraftvektor und Feldlinie aufeinanderliegen. Wenn hier aber nochmals expliziter auf die Unterscheidung eingegangen wird, müssten noch bessere Ergebnisse erzielt werden.

10. Schlussfolgerungen

Im letzten Kapitel sollen nun die zugrundeliegenden Forschungsfragen aufgegriffen und - soweit möglich - die ableitbaren Resultate erörtert werden.

Zu Frage 1:

Ist der Wechselwirkungsgedanke als Konzept nach Klafki überhaupt unterrichtbar?

Die beiden klassischen Wechselwirkungskonzepte der Kraft und des Feldes sind entsprechend des klafkischen Ansatzes im vollen Umfang unterrichtbar und stellen einen Grundpfeiler der Physik und der anderen Naturwissenschaften im Schulunterricht dar. Ohne diese Konzepte ist eine Bewältigung von naturwissenschaftlichen Studiengängen fast nicht möglich und ihr gutes Verständnis begünstigt positive Lernerfolge unbedingt. Auch in technischen Ausbildungsberufen bspw. im Metall-, Holz-, Bau- und Elektrobereich sind vertiefte Kenntnisse über Kräfte und Felder sehr gewinnbringend für die Schülerinnen und Schüler.

Die beiden anderen „neueren“ Konzepte sind methodisch nur sehr schwer aufzubereiten, zudem könnte man auf ihre unterrichtliche Behandlung in den nach wie vor klassisch orientierten Ausbildungsfeldern verzichten. Allerdings entgehen dem Unterrichtsprozess dann viele aus der aktuellen Forschung stammende Motivationsfelder und es ist Lernenden nur schwer ein Aktualitätsbezug des Stoffes zu vermitteln. Insgesamt gesehen kann man aber einschätzen, dass alle Wechselwirkungskonzepte prinzipiell nach dem Modell von Klafki unterrichtbar sind.

Zu Frage 2:

Welche Bedeutung wird dem Wechselwirkungskonzept in den Physikbüchern für die gymnasiale Oberstufe zugeschrieben?

Auch bei der Beantwortung dieser Frage muss zwischen den Konzepten differenziert werden. Das Kraft- und das Feldkonzept sind in den Schulbüchern sehr stark vertreten, da mit diesen die zumeist behandelten makroskopischen Phänomene gut besprochen werden können. Eine Rolle spielt dabei, welche Vermittlungstiefe angestrebt wird. Diese erstreckt sich von einfachen Nennungen bis hin zu Erläuterungen zum Wechselwirkungsvorgang selbst. Letztere finden sich aber in einem wesentlich geringeren Umfang in den Schulbuchtexten. Für die genauen Zahlen siehe Unterkapitel 6.6.5. Eine erste Erhebung zeigte: Die Tiefe und Qualität der konzeptartigen

Formulierungen nimmt deutlich ab, wenn der Übergang zwischen der schlichten Nennung eines Konzeptes hin zum tatsächlichen Wechselwirkungsmodell vollzogen wird. Grund hierfür ist, wie schon in 6.6.5 angesprochen, dass die Schulbücher eher dafür geschrieben werden, handwerkliche Lösungen für physikalische Probleme zu bieten und weniger um wissenschaftspropädeutische Aspekte aufzuzeigen. Das heißt, die Schülerinnen und Schüler sollen zunächst die Physik als erklärende Wissenschaft für Natur und Technik kennenlernen und erst dann als Prinzipienwissenschaft. Dieser Gang ist natürlich nachvollziehbar: Wie soll man eine Metaebene im Verständnis erreichen, wenn man nicht weiß, worüber man eigentlich spricht? Aus dieser Perspektive betrachtet kann man auch das vergleichsweise gering ausgeprägte Eingehen auf Wechselwirkungskonzepte in den Lehrbüchern als didaktisch naheliegend einschätzen.

Die Konzepte der Geometrisierung und der Austauschteilchen werden in den Schulbüchern so wenig aufgegriffen, dass statistische Trendaussagen nicht möglich sind. Man kann lediglich sagen, dass die geringe Anzahl mit den wenig vorhandenen zugehörigen Inhalten in den Lehrplänen stark korreliert. Warum sollte ein Schulbuch auch eine Fülle an Seiten zu Themengebieten aufweisen, die nicht in den Lehrplänen der meisten Bundesländer vorkommen? Nichts desto trotz ist es aber positiv hervorzuheben, dass jedes der Bücher auch jenseits des eigentlichen Schulhorizonts Möglichkeiten bietet das innerfachliche Verständnis zu vertiefen, indem Erweiterungen der bekannten Wechselwirkungskonzepte als Ausblicke benannt werden.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Physikbücher die unterschiedlichen Wechselwirkungskonzepte in einem jeweils angepassten Rahmen darlegen. Die fachliche Tiefe und vor allem die Genese zwischen den Konzepten weist Schwächen auf. Wechselwirkungskonzepte zur Lösung von anwendungsorientierten Problemstellungen könnten noch besser genutzt werden.

Zu Frage 3:

Kann man den Konzeptgedanken von Wechselwirkungen bei Schülerinnen und Schülern ansatzweise verankern? Können Sie die genetische Weiterentwicklung der unterschiedlichen Wechselwirkungskonzepte erfassen?

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sehr schwierig ist ein grundlegendes Konzept im Laufe einer Unterrichtsreihe wirklich zu verstehen. Es geht hier lediglich darum adäquate Ansätze bei den Schülerinnen und Schülern aufzudecken. In Unterkapitel 9.2.6 werden die Ergebnisse dargestellt und zeigen auf, dass die Schülerinnen und Schüler ein Verständnis zum Kraftbegriff entwickeln und in ihr Langzeitgedächtnis integrieren können. Die Lernenden waren in der Lage mithilfe des Konzeptes Aufgaben bzw. Problemstellungen in unterschiedlichen Kontexten zu bearbeiten. Sie hatten das Konzept also auch als Denkwerkzeug erfasst. Beim Feldkonzept kann man ähnliche gute Ergebnisse feststellen. In wie weit eine tatsächliche Verankerung des Wissens auf lange Sicht stattgefunden hat, kann leider im Rahmen dieser Untersuchung nicht nachgewiesen werden. Individuell konnte der Autor aber

bei Gruppen, die er nachfolgend in Jahrgangstufe 13 unterrichtet hat, feststellen, dass die wichtigen Prinzipien noch bei sehr vielen Schülerinnen und Schülern gedanklich vorhanden waren.

Die genetische Weiterentwicklung der Wechselwirkungskonzepte können die Schülerinnen und Schüler gerade vom Kraftkonzept ausgehend hin zum Feldkonzept sehr gut nachvollziehen, da hier die Sinnhaftigkeit des Fernwirkungsproblems seitens der Lernenden gut verstanden werden kann. Auch die begriffliche Überschneidung beider Konzepte, z.B. im Rahmen der Definition der Feldstärke, wird verstanden.

Lediglich die Weiterentwicklungen hin zum Geometrisierungs- und Austauschteilchenkonzept können die Schülerinnen und Schüler nur eingeschränkt verstehen. Grund hierfür ist wahrscheinlich der nicht richtig begriffene Sinn und Nutzen dieser Konzepte für Lernende. Beide sind in ihrer Beschreibung äußerst speziell und kommen vordergründig nicht in der Erfahrungswelt der Lernenden zum Tragen. Daher können die Schülerinnen und Schüler den vom Lehrer dargelegten Sachverhalt zwar nachvollziehen, aber keine nötige Weiterentwicklung für sich selbst herauskristallisieren. Dies kann und sollte aber auch nicht von einem Jugendlichen, der sich erst zeitlich partiell seit wenigen Jahren mit der Physik auseinandersetzt, erwartet werden.

Zu Frage 4:

Können die Schülerinnen und Schüler ein Wechselwirkungskonzept (selbst) erforschend lernen?

Um erste Eindrücke zur Beantwortung dieser Frage zu gewinnen, wurde das mechanische Kraftkonzept bzw. Wirkungskonzept seitens der Schülerinnen und Schüler untersucht. Es wurde also das vermeintlich einfachste und von der Vorstellung her das eingängigsten Konzept eruiert. Die erhaltenen Ergebnisse (in 8.3 dargestellt) zeigen eindeutig auf, dass Schülerinnen und Schüler das Kraftkonzept nicht selbst „erforschen“ können, weil sie in die gleichen gedanklichen Fehlvorstellungen fallen, die auch bei den Naturwissenschaftlern in der Wissenschaftsgeschichte erkennbar sind. Die heutigen Lernenden können unmöglich in kürzester Zeit die zentralen physikalischen Begriffe und vermischten Größen wie Energie, Impuls und Kraft in exakten Definitionen ausschließlich aus eigenen Erfahrungsbereichen formulieren. Auch die Grundlagen des Trägheitsprinzips erweisen sich als kaum selbst entdeckbar. Eine Hauptursache ist auch die geringe Zeit und Motivation der Lernenden. Forschungsarbeit muss gelernt sein, braucht viel Zeit, ein großes Maß an Interesse am Sachverhalt, eine Beharrlichkeit in der Auseinandersetzung und auch eine gewisse Intelligenz. All diese Dinge können die Lernenden aber aus unterschiedlichen Gründen in einem dreistündigen Physikkurs nicht gleichzeitig einbringen.

Des Weiteren zeigen die erhaltenen Resultate aber auch, dass die Untersuchung höchstwahrscheinlich im Rahmen eines anderen Wechselwirkungskonzeptes keine besseren - sondern eher noch schlechtere - Ergebnisse liefern würde. Eine Erforschung anderer Konzept würde die Frage also nicht positiver beantworten. Aus wissenschaftstheoretischer Sicht gibt es kaum Zweifel an den tieferen Gründen für diese

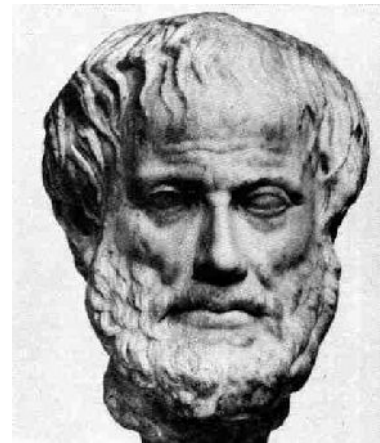
negative Prognose: Alle Wechselwirkungskonzepte fußen zentral auf frei gewählten und definierten physikalischen Begriffen, die allerdings den großen Vorteil aufweisen, dass sie sich in Experimenten als sinnvoll erwiesen haben. Diese Sinnhaftigkeit lässt sich allerdings nicht in einem üblichen Schulunterricht so demonstrieren, wie es im Laufe einer Jahrhunderte währende Fortentwicklung physikalischer Grundkonzepte real erfolgt ist. Entdecken können Lernende tatsächlich, dass es prinzipiell Wechselwirkungen gibt. Die von uns genutzten Beschreibungskonzepte lassen sich aber nicht einfach, ohne den begrifflichen Rahmen bereitzustellen, nachentdecken.

A. Arbeitsblätter zu den Handhabungen

A.1. Arbeitsblätter zum Kraftkonzept

Die Physik des Aristoteles

Die Mechanik ist das älteste Teilgebiet der Physik und reicht bis in die griechische Antike und noch weiter zurück. Damals gab es noch keine Differenzierung in verschiedene selbstständige Wissenschaften, wie sie sich in der Neuzeit ausgeprägt hat. Naturerkenntnis war ein Teilgebiet der Philosophie, die Naturphilosophie. Folglich prägten auch Grundannahmen und Methoden der damaligen philosophischen Weltanschauung das Herangehen an die Natur. Die Prämissen unterscheiden sich in vielfältiger Hinsicht vom modernen Verständnis der Naturwissenschaften, wie es sich in der Neuzeit mit der kopernikanischen Wende auszubilden begann.



1. Aristoteles gehört zu den bekanntesten und einflussreichsten Philosophen der Geschichte.

Erkenntnistheoretische Vorbedingungen

Zwei wesentliche Prämissen prägten das naturphilosophische Denken des Altertums:

- **Verständnis von Natur**
Man unterschied zwischen Natur (*physis*) und Technik (*techne*). Die Natur des Steins sei es, so glaubte man, dass er zur Erde falle. Um den Stein aber nach oben zu bewegen, müsse man gegen die Natur handeln. Das Anwenden von Werkzeugen und Maschinen (*mechane*) sei daher ein menschlicher Eingriff in die Natur, um Körper entgegen ihrem natürlichen Verhalten zu bewegen. Mechanik sei nicht natürlich, sondern künstlich. Mechanik wurde als die Kunst aufgefasst, mittels Technik die Natur zu überlisten. Das von einem griechischen Wort stammende *mechane* bedeutet List. Natur und Technik waren im Altertum Gegensätze.
- **Erkenntnisweg**
Diese Sichtweise auf die Natur hatte zur Folge, dass Experimente nicht als Erkenntnismittel in Betracht kamen. Experimente hätten einen Eingriff in die Natur dargestellt. Ihre Ergebnisse wären künstlich und nicht mit der Natur zu identifizieren gewesen. Als einzig gültige Quelle der Erkenntnis galt die Beobachtung ohne technische Instrumente: die reine Anschauung. Allein mit dem Verstand, also durch reines Nachdenken, konnten daraus Erkenntnisse über der Natur *an sich* gezogen werden.

Aristoteles Sicht

Die Frage, wodurch Gegenstände bewegt werden, beschäftigt die Menschen sicherlich seit Urzeiten. Der wohl bedeutendste Naturforscher des Altertums war der Grieche ARISTOTELES (384-322 v. Chr.). Ein wesentliches Gebiet seiner Untersuchungen war die Bewegungslehre, deren Grundgesetz für ihn die Aussage „Omne quod movetur ab alio movetur: Alles was in Bewegung ist, wird von etwas anderem bewegt“ war.

Aristoteles sagt, dass jede Bewegung einen „motor“ (Beweger) braucht. Dieser „motor“ muss entweder direkt im Körper enthalten sein oder in unmittelbarem Kontakt zu diesem stehen. Durch diese Ansicht tauchen aber Probleme auf.

So kann man sich sehr gut vorstellen, dass beispielsweise ein Tier einen „motor“ enthält. Wie verhält es sich aber bei einem den Berg herunter rollenden Stein?

Diese Problematik löste Aristoteles durch die Separation zwischen *Natürlichen Bewegungen* und *Erzwungenen Bewegungen*.

- *Natürliche Bewegung:*

Aristoteles nimmt an, dass alles im Kosmos seine Ordnung und seinen festen Platz habe. Im Zentrum seiner Welt steht die Erde. Leichte Substanzen gehören zu Bereichen oberhalb der Erde, schwere dagegen zur Erde selbst. Natürliche Bewegungen kommen dadurch zustande, dass jeder Körper seinem natürlichen Ort zustrebt: Der leichte Rauch steigt nach oben, der schwere Stein fällt zur Erde. Da die Zielursache den Gegenständen innewohne, benötigen sie keine von außen kommende Ursache. An ihrem Ziel kommen die Substanzen schließlich zur Ruhe und die Ruhe ist ihr natürlicher Zustand.

- *Erzwungene Bewegung:*

Alle anderen Bewegungen bedürften grundsätzlich eines externen Bewegers als Wirkursache. Dabei muss aber der äußere Antrieb unmittelbar an diesem Körper angreifen, wie es auch beim Ochsenkarren geschieht. Ohne einen Beweger strebt der Körper zu seinem natürlichen Ort. Ohne äußeren Antrieb bleibt der Ochsenkarren stehen, da er sich bereits an seinem natürlichen Ort, der Erde, befindet.

Viele alltägliche Bewegungen fallen somit unter die Erzwungene Bewegungen. Diese Bewegungen brauchen, wie oben gesehen, eine Ursache.

Bei dieser Ursache vertrat Aristoteles die Meinung, dass die nötige Stärke der Ursache zum einen von dem Gewicht des Körpers und zum anderen von der Geschwindigkeit des Körpers abhängt.

Im Detail:

- Je schwerer der Körper, umso stärker die benötigte Ursache
- Je größer die Geschwindigkeit, umso stärker die benötigte Ursache

1. **Aufgabe:** Was könnte Aristoteles aus heutiger Sicht mit dem Begriff Ursache meinen?
2. **Aufgabe:** Versuche Aristoteles Ursache, in Abhängigkeit von m und v , in die heutige Formelschreibweise zu überführen.
3. **Aufgabe:** Überlege welche Probleme bei dieser Sichtweise entstehen können.

Theorie von Leibniz

Leibniz entwickelte sein Kraftmaß mithilfe eines Gedankenexperiment, nach dem die Kraft gleich der Masse mal des Quadrates der Geschwindigkeit sein sollte ($m \cdot v^2$). Seiner Meinung nach war Kraft die Fähigkeit, ein Gewicht auf eine bestimmte Höhe zu heben. Zur Minderung von Verstehensschwierigkeiten sei gesagt, dass ein Körper „lebendige Kraft (*vis viva*)“ besitzt, wenn er sich bewegt und „tote Kraft (*vis mortua*)“, wenn er in Ruhe ist.



1. Gottfried Wilhelm Leibniz war ein deutscher Philosoph, Wissenschaftler, Mathematiker, Historiker etc. Er gilt als der universale Geist seiner Zeit.

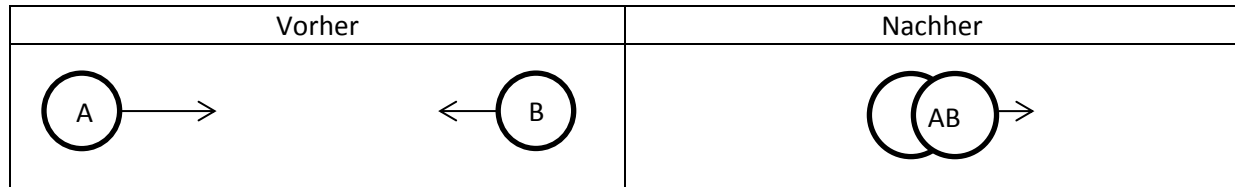
Für sein Gedankenexperiment beginnt Leibniz mit der Vorstellung, dass ein Körper, der von einer bestimmten Höhe herabfällt, die Kraft erlangt, um ebenso hoch wieder steigen zu können. In einer Höhe h hat ein Körper das Vermögen zu einer lebendigen Kraft, also nach Leibniz eine Kraft, die er tote Kraft nennt. Da sein Kraftbegriff und das gesuchte Maß mit dem insgesamt erzielbaren Effekt gleich zu setzen ist, wird die tote Kraft bei Verdopplung der Höhe für den gleichen Körper auch verdoppelt sein. Aus dem Ansatz gleichen Effekts folgt für Leibniz logisch auch, dass wenn man vier gleiche Körper auf die gleiche Höhe bringt, ein aus diesen vier Körper bestehendes Objekt eine viermal so große tote Kraft hat. Gleiches gilt, wenn ein einzelner Körper viermal so hoch gesetzt ist – er hat dann die gleiche tote Kraft wie vier solcher Körper auf der einfachen Höhe. Dieses Prinzip des Kräftegleichgewichtes ist bei den damals betrachteten einfachen Maschinen wie Hebel und Flaschenzug als fundamental gültig anerkannt worden. Damit hat Leibniz zwei Ausgangssituationen mit gleichen toten Kräften konstruiert; lässt man nun den einzelnen Körper und die vier Körper zusammen fallen, dann müssen sie schließlich am Boden die gleiche lebendige Kraft haben. Aus den Fallgesetzen von Galilei (beschleunigte Bewegung) ist aber bekannt, dass der Körper aus der vierfachen Höhe die doppelte Geschwindigkeit besitzt. Würde man das Kraftmaß als Produkt von Masse und Geschwindigkeit wie nach der Schule Descartes' ansetzen, so hätten beide Körper eine unterschiedliche Kraft, nämlich der aus größerer Höhe nur halb so viel wie der andere, im Widerspruch zum Prinzip von der Erhaltung der Kraft. Wählt man als Kraftmaß jedoch das Produkt von Masse mal Quadrat der Geschwindigkeit, so erhält man die vom Prinzip geforderte Gleichheit. Deswegen erhält bei Leibniz das Kraftmaß die Formel $m \cdot v^2$.

Wie auch Descartes geht Leibniz von einer Erhaltung seiner Kraft aus.

Arbeitsblatt
Widerlegung zu Leibniz' Kraftbegriff

Datum: _____

Eine Widerlegung dieses Kraftbegriffs kann mithilfe eines unelastischen Stoßes vollführt werden. Wobei unelastisch bedeutet, dass die beiden sich stoßenden Körper nach dem Stoß aneinander hängenbleiben.



Vorher gibt es einerseits das Kraftvermögen von Körper A ($K_A = m_A v_A^2$), sowie äquivalent von Körper B ($K_B = m_B v_B^2$). Nach dem Stoß gibt es nur noch ein Körper mit der Gesamtmasse $m_A + m_B$ und einer verringerten Geschwindigkeit. Insgesamt sollte das Kraftvermögen also nachher $K_{AB} = (m_A + m_B) \cdot v_{AB}^2$ sein. Da keine Kraft verloren geht müsste also

$$m_A v_A^2 + m_B v_B^2 = (m_A + m_B) \cdot v_{AB}^2$$

gelten.

Bei Experimenten von Descartes hat sich dieser Zusammenhang aber leider nicht ergeben. Der rechte Term (Kraft nach dem Stoß) war immer etwas kleiner als der Linke.

Somit konnte das Kraftmaß nach Leibniz letztendlich auch nicht passen. Was Leibniz hier tatsächlich entdeckte war der heutige Energiebegriff.

Theorie von René Descartes.

René Descartes war in seinen naturphilosophischen Überlegungen zum Schluss gekommen, dass zwei Körper sich nur beeinflussen können bzw. Kräfte zwischen ihnen wirken, wenn sie sich berühren. Er fühlte sich durch seine Untersuchungen der Stoßprozesse in dieser Ansicht bestätigt. So versuchte er sogar den Denkprozess mit Vorgängen zu beschreiben in dem sich kleine Körper im Gehirn stoßen. Die Begriffe Bewegung und Kraft benutzte Descartes synonym. Hier einige seiner Lehrsätze:



1. René Descartes war ein französischer Philosoph, Mathematiker und Naturwissenschaftler.

Lehrsatz XX: Wenn ein Körper A auf einen Körper B trifft und ihn mitreißt, wird A so viel von seiner Bewegung verlieren, wie B aufgrund des Zusammentreffens mit A von diesem A erhält.

Lehrsatz XXI: Wenn ein Körper A doppelt so groß ist wie B und sich mit gleicher Geschwindigkeit bewegt, wird A auch doppelt so viel an Bewegung haben wie B, d.h. an Kraft, eine gleiche Geschwindigkeit wie B einzuhalten.

Lehrsatz XXII: Wenn ein Körper A einem Körper B gleich ist und A sich doppelt so schnell bewegt wie B, wird die Kraft oder Bewegung in A doppelt so groß sein wie in B.

Folgesatz: Je langsamer Körper sich bewegen, desto mehr haben sie teil an Ruhe.

Folgesatz: Wenn ein Körper A sich doppelt so schnell bewegt wie ein Körper B und B doppelt so groß ist wie A, dann ist in dem größeren B gleich viel an Bewegung wie in dem kleineren A, und folglich auch gleich viel an Kraft.

Quelle der Lehrsätze: „Descartes' Prinzipien der Philosophie auf geometrische Weise dargestellt“ von *Baruch de Spinoza* (S. 17 f.)

Quelle Bild: <http://finanz.math.tugraz.at/~predota/old/history/mathematiker/img/descartes1.jpg>

Folgerungen:

Satz XX: Körper A und B tauschen beim Zusammentreffen Kraft aus, jedoch ist vorher und nachher dieselbe Bewegungsmenge vorhanden. Folglich ist die Bewegung, also die Kraft eine Erhaltungsgröße.

Satz XXI: Doppelt so groß (doppelte Masse) $\Rightarrow$ doppelte Kraft

Satz XXII: Doppelt so schnell (doppelte Geschwindigkeit) $\Rightarrow$ doppelte Kraft

Folgesatz I: Bewegung und Ruhe sind grundsätzlich verschiedene Dinge

Folgesatz II: Zusammenfassung von XXI und XXII

Kraftbegriff nach Descartes:

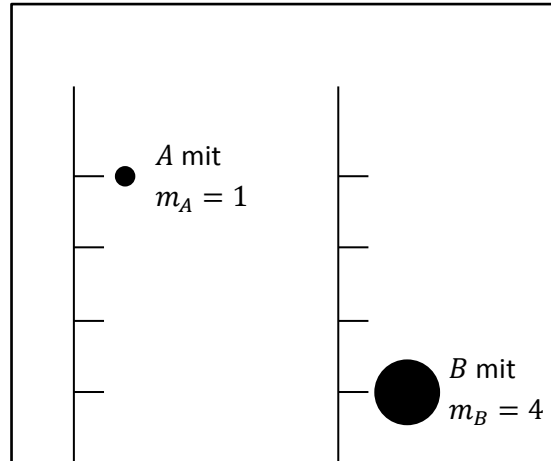
$$\text{Kraft} = \text{Masse} * \text{Geschwindigkeit}$$

Widerlegung zu Descartes' Kraftbegriff durch Leibniz

In einem Artikel von 1686 widerlegt Leibniz das Kraftmaß von Descartes ($K = m \cdot v$) durch folgende Überlegung.

Angenommen wir haben zwei Körper A und B.

Körper A habe die Masse $m_A = 1$ und B die Masse $m_B = 4$. Zudem befinde sich A vier Einheiten über dem Boden, während B sich nur eine Einheit über dem Boden befindet. Nun hat A, nachdem es vier Einheiten gefallen ist, eine Kraft (K_A), die es ihm erlaubt einen Körper seiner Masse (1) wieder um vier Einheiten zu heben. Ganz analog hat der Körper B, nachdem er eine Einheit gefallen ist, die Kraft (K_B) einen Körper seiner Masse (4) um eine Einheit zu heben. Diese Kraft (K_B) reicht natürlich auch aus, einen Körper wie A mit Masse 1 um vier Einheiten zu heben, genau wie die Kraft (K_A) ausreicht einen Körper der Masse 4 um eine Einheit zu heben. Damit gilt offensichtlich, dass die beiden Kräfte, die beim Fall von A um vier Einheiten und beim Fall von B um eine Einheit entstehen, gleich groß sind, d.h. $K_A = K_B$. Nach Descartes' Theorie würde die Kraft oder das Bewegungsvermögen eines Körpers nun einem einfachen Produkt seiner Masse und seiner Geschwindigkeit bestehen.



Da es sich bei dem Fall aber um eine beschleunigte Bewegung handelt, ist die Fallstrecke proportional zum Quadrat der Fallgeschwindigkeit. Damit ist die Geschwindigkeit v_A von A nach dem Fall der vier Einheiten doppelt so groß wie die Geschwindigkeit v_B von B nach einer Einheit. Wenn man der Einfachheit halber annimmt, dass $v_B = 1$ ist, ist $v_A = 2$. Nach Descartes hätte der Körper A nach seinem Fall also ein Bewegungsvermögen (Kraft) von $K_A = m_A \cdot v_A = 1 \cdot 2 = 2$, während der Körper B nach seinem Fall die Kraft $K_B = m_B \cdot v_B = 4 \cdot 1 = 4$ aufweist. Dies widerspricht aber eben genannter Gleichheit von K_A und K_B .

Mit dem Ansatz von Leibniz ($K = m \cdot v^2$) würde obiges Gedankenexperiment funktionieren.

Was Descartes hier aber tatsächlich entdeckte war der heutige Impulsbegriff.

Masse ist nicht gleich Masse

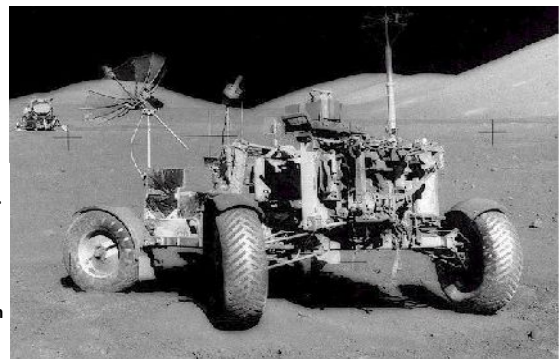
Bei Betrachtung von Bauwerken fällt auf, dass umso höher diese sind, desto massiver sind auch die Träger und Stützen die sie halten. Grund hierfür ist das automatisch größer werdende Gewicht bei höheren Gebäuden.

Wenn wir also irgendwann einmal eine Kolonie auf dem Erdmond errichten würden, könnten die Gebäude mit wesentlich weniger Material gebaut werden. Die Gewichtskraft auf dem Mond beträgt lediglich nur rund $1/6$ von dem auf der Erde. Bspw. könnte das Stahlgerüst des Eiffelturms wesentlich filigraner ausgeführt werden. Als einfache Annahme könnte man ja von nur $1/6$ der Stärke der Stahlverstrebungen ausgehen.



Genauso gut könnte man ja auch ein Mondauto aus wesentlich dünneren Bauelementen zusammenbauen. Der Rahmen, die Lenkstangen, der Überrollkäfig etc. könnte um ein Vielfaches feingliedriger sein. Hier würde der Vorteil nicht nur in der architektonischen Ästhetik sein – wie bei Gebäuden – sondern würde auch eine schlankere Ausführung bedeuten, die wesentlich einfacher und vor allem günstiger überhaupt auf den Mond zu fliegen wäre.

Bei Betrachtung des Bildes fällt aber auf, dass das Mondauto von 1969 einen stabilen Stahlrahmen besaß und auch die Lenkstangen mit denen von „Erdautos“ vergleichbar sind.



Quelle:
<http://members.chello.at/hw.graz/htm-dateien/mondfahrt/mondlandung-5.htm>

Aufgabe 1

Erörtere, warum das Mondauto, trotz der wesentlich geringeren Schwerkraft sehr massiv gebaut werden musste.

Lösung:

Aufgabe 2

Siehe dir das Video des Astronauten an, der mit einem Hammer eine Stange in den Mondboden schlägt.

Analysiere, mithilfe der eben gelösten Aufgabe, das Video unter den Gesichtspunkten:

- Warum ist der Hammer so klein? Sollte der Hammer aufgrund der geringeren Anziehungskraft nicht größer dimensioniert sein, um dem Astronauten die Arbeit zu erleichtern.
- Warum verliert der Astronaut sofort den Hammer, nachdem er bei einem Schlag nicht die Stange getroffen hat.

Quelle Video:

„Astronaut Charles Duke During an Apollo 16 Lunar Surface EVA“ (URL: www.youtube.com/watch?v=NiJ54Jj2rck)

Mögliche Gesichtspunkte zur Lösung der ersten Aufgabe:

- Das Mondauto musste auf der Erde beispielsweise in einer Wüste getestet werden. Hierfür musste es unter Erdbedingungen natürlich stabil gebaut sein.
- Die Trägheit: Das Gewicht des Autos ist zwar wesentlich geringer als auf der Erde, aber ob das Auto auf der Erde oder auf dem Mond mit 30 km/h bspw. in einen kleinen Krater stürzt und schlagartig abgebremst wird, ist das gleiche. Denn hier kommt die Trägheit, die jedem Körper anhaftet zum Tragen und diese ist auf der Erde und auf dem Mond dieselbe.

Mögliche Gesichtspunkte zur Lösung der zweiten Aufgabe:

Dimensionierung der Hammers:

- Der Hammer kann ähnlich dimensioniert sein wie auf der Erde, da seine Trägheit dieselbe ist. Ob der 200g Hammer auf der Erde oder auf dem Mond schlagartig bei Auftreffen auf die Stange abgebremst wird ist das gleiche.

Verlust des Hammers

- Aufgrund des geringeren Gewichtes des Hammers auf dem Mond, wird der Astronaut den Hammer nicht allzu stark festhalten. Wir würden ein leeres Glas Wasser auch „lockerer“ halten als ein Volles. Wenn der Astronaut nun aber nicht die Stange trifft, muss er den Hammer mit seiner Trägheit abbremsen und dies kann er mit seinem lockeren Griff nicht bewerkstelligen.

Schwere/Träge Masse und Experiment zu Newton II

Schwere und träge Masse

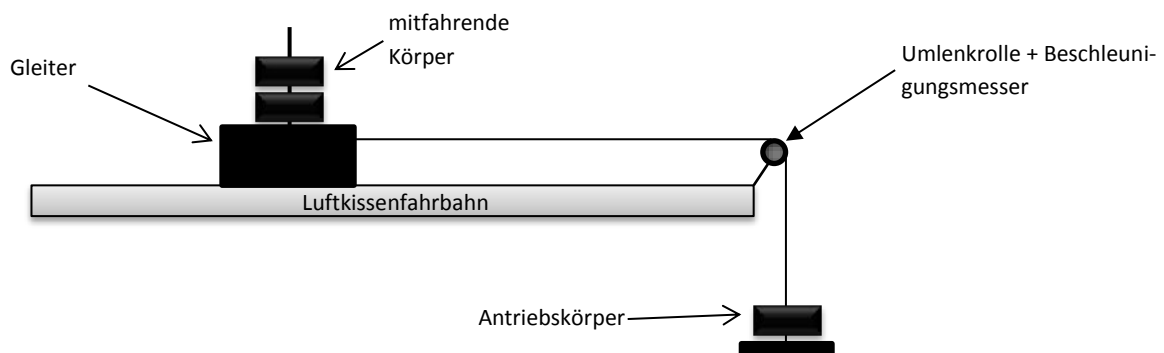
Aufgrund der Erdanziehungskraft (Gravitation) hat jeder Körper ein Gewicht. Eine 1kg Masse lässt sich einfacher hochheben als eine 5kg Masse. Aus diesen Überlegungen ergibt sich der Begriff *schwere Masse*. Die *träge Masse* spielt bei Bewegungsänderungen eine Rolle. Wiederum lässt sich ein Wagen auf dem 1kg Masse liegt, leichter beschleunigen, als ein Wagen mit 5kg Masse. Aus der Alltagserfahrung und aus präzise ausgeführten Experimenten lässt sich schließen, dass träge und schwere Masse gleich groß sind.

Merksatz: Schwere und Trägheit sind Eigenschaften der Masse eines Körpers.

Wobei gilt: $m_s = m_t$

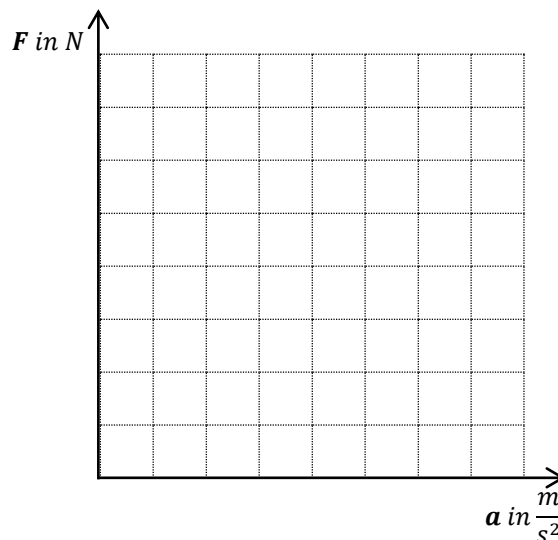
Experiment zur Verdeutlichung von Newton II

Auf einer Luftkissenfahrbahn werden unterschiedliche Gleiter durch unterschiedliche Antriebskörper beschleunigt. Die Antriebsmasse wird nun vergrößert, indem die Anzahl der Antriebskörper vervielfacht wird. Die zu beschleunigte Gesamtmasse des Zuges wird konstant gehalten, indem die nicht als Antrieb benötigten Körper auf dem Gleiter mitfahren. Die Beschleunigung a wird gemessen.



Messerwerte:

Auf der y-Achse ist die Antriebskraft und auf der x-Achse die gemessene Beschleunigung aufgetragen.



Axiome, Gesetze und Prinzipien

Jede Theorie bezieht sich auf die Wirklichkeit. Eine Theorie ist nicht selbst die Wirklichkeit, sondern ein vereinfachendes, gedankliches Modell, das zur Beschreibung der Wirklichkeit mehr oder weniger gut geeignet ist. Folglich haben auch Gesetze, Axiome und Prinzipien, die sich zu einer Theorie zusammensetzen, den Charakter von Modellen – sie müssen sich an der Wirklichkeit bewähren. Wir sagen ein Gesetz ist gültig, wenn es sich als Modell für bestimmte Phänomene eignen.

Für viele physikalische Beschreibungen haben sich in der Vergangenheit Bezeichnungen eingebürgert, die der heutigen Bedeutung der Begriffe zuwider laufen. Dennoch sind die traditionellen Namen fest verwurzelt. Manchmal werden der physikalischen Literatur die drei Begriffe *Gesetz*, *Axiom* und *Prinzip* sogar synonym verwendet. So findet man die Bezeichnungen „Newton'sche Axiome“, „Newton'sche Gesetze“ und „Newton'sche Prinzipien“ gleichbedeutend im Gebrauch. Trotzdem ist es wichtig, die Begriffe zu unterscheiden und sich klar zu machen, ob die Bezeichnungen zutreffen:

- Das Gesetz des freien Falls bezeichnet man – völlig richtig – nicht als Axiom.
- Das Archimedische Prinzip, das den Auftrieb eines Körpers in einer Flüssigkeit beschreibt, hat eher Gesetzescharakter.

Gesetze

Das Gesetz des freien Falls besagt: Im Vakuum fallen alle Körper gleichmäßig beschleunigt. Die Beschleunigung ist für alle Körper gleich. Die zurückgelegte Strecke beträgt:

$$s = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

Dieses Gesetz besteht aus mehreren Aussagen: Es beschreibt einen Zusammenhang zwischen den physikalischen Größen Zeit und Fallstrecke. Es besagt außerdem, dass sich die Beschleunigung während des Falls nicht ändert. Zusätzlich steckt in dem Gesetz auch die Unabhängigkeit der Beschleunigung von der Masse des Körpers.

Das Gesetz ist allgemeingültig, solange seine Voraussetzungen gegeben sind. Es gilt an verschiedenen Orten auf der Erde und ebenso auf anderen Himmelskörpern. Dabei kann g an jedem Ort einen anderen Wert besitzen, ist dort aber jeweils konstant.

Weltraumschrott, der zur Erde fällt, unterliegt dem Gesetz des freien Falls nicht: Die Luftreibung bremst seinen Fall. Aber auch auf dem Mond, der keine Atmosphäre besitzt, gilt das Fallgesetz nicht für Körper, die vom Weltall auf die Oberfläche fallen. Denn die Gravitationskraft nimmt quadratisch mit dem Abstand zum Mittelpunkt des Himmelskörpers ab. Beim Fall über große Distanzen wächst folglich die Anziehung und damit die Beschleunigung, wenn keine weitere Kraft auf den Körper ausgeübt wird. Nach dem zweiten Newton'schen Axiom ist die Beschleunigung aber nur dann konstant, wenn auch die Kraft konstant bleibt. Fallender Weltraumschrott lässt sich somit nicht mehr durch eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung beschreiben. Das Gesetz des freien Falls ist nur eingeschränkt auf begrenzte Raumbereiche gültig.

Um das Fallen auch außerhalb des Bereichs zu erfassen, in dem das Fallgesetzes gilt, wird es einerseits ergänzt um die Theorie von Reibung und Strömung und andererseits eingebettet in die umfassendere Theorie der Gravitation.

Traditionell betrachtet gibt es zwei Wege, wie Gesetze entdeckt werden können:

- **Induktiv**

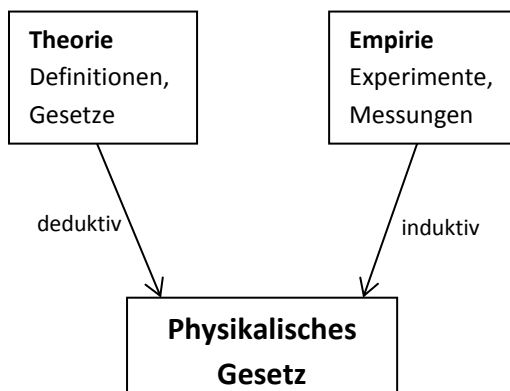
Man lässt eine Kugel aus verschiedenen Höhen fallen und misst die Zeit. Die Experimente zeigen, dass die Fallstrecke quadratisch von der Zeit abhängt. Der freie Fall ist also eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

Durch Beobachten vieler Experimente schließt man auf einen Zusammenhang zwischen zwei Größen. Methodisch geht man dabei so vor, dass eine Größe gezielt variiert wird, während man die Veränderung einer zweiten Größe beobachtet. Dabei müssen alle anderen Größen konstant gehalten werden. Aber durch noch so viele Experimente wird kein Gesetz *bewiesen*.

- **Deduktiv**

Die Gravitation beschleunigt die Kugel. Die Gravitationskraft ist im erdnahen Bereich konstant. Folglich ist auch die Beschleunigung konstant. Daher ist der freie Fall eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

Aus dem Kraftgesetz wird das Bewegungsgesetz gefolgert. Aus der Gültigkeit allgemeiner Gesetze ergibt sich logisch die Gültigkeit weiterer Gesetze. Aber alle logischen Schlussfolgerungen beweisen nicht, dass die Phänomene tatsächlich so auftreten wie vorhergesagt. Denn selbst wenn der Schluss richtig ist, können die Voraussetzungen falsch sein.



Aus diesem Beispiel lassen sich einige Charakteristika physikalischer Gesetze folgern. Physikalische Gesetze...

... sind Aussagen über Zusammenhänge zwischen physikalischen Größen, Veränderungen oder Zuständen.

... sind Modelle, die beobachtbare Zusammenhänge zwischen den Größen beschreiben. Sie haben einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich.

... müssen experimentell bestätigt werden: Die Modelle müssen sich in der Realität bewähren.

... sind eingebettet in eine Theorie. Sie verflechten sich widerspruchsfrei mit anderen Aussagen der Theorie. In der Gesamtheorie werden sie verständlich und bestätigen damit auch die Theorie selbst.

Axiome

Das erste Newton'sche Axiom lautet:

Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, sofern er nicht durch äußere Kräfte zur Änderung seines Zustands gezwungen wird.

Dieses Axiom wird auch Trägheitsgesetz genannt. Es beschreibt – wie andere Gesetze auch – einen Zusammenhang zwischen zwei Größen, hier: Kraft und Geschwindigkeitsänderung. Wenn keine Kraft ausgeübt wird, ändert sich auch die Geschwindigkeit nicht.

Im Gegensatz zu einem physikalischen Gesetz ist das Axiom aber nicht nur für ein einzelnes oder eine eng begrenzte Gruppe von Phänomenen gültig. Es erhebt vielmehr den Anspruch für die komplette Mechanik zu gelten. Die Grenzen ergeben sich nur durch die Grenzen der Theorie.

Mit den Newton'schen Axiomen sind die Grundlagen der Mechanik gelegt. Insoweit sind sie nicht einfach Gesetze sondern Grundgesetze der gesamten Theorie. Sie bilden das Fundament der Mechanik. Die Newton'schen Axiome sind fundamentale Annahmen, die sich weder theoretisch herleiten, noch empirisch aus Experimenten gewinnen lassen.

Die Aussagen und Gesetze der Mechanik lassen sich aus den Newton'schen Axiomen deduzieren. Die gesamte Theorie und ihre Anwendbarkeit in der Realität bestätigen, dass diese Axiome sinnvoll sind. Die drei Axiome sind die einfachsten Annahmen, die die Mechanik noch eindeutig beschreiben.

Allgemein sind Axiome also die einfachsten Gesetze, auf denen sich eine Theorie aufbauen lässt. Sie sind nicht weiter in Teilaussagen zerlegbar und können nicht bewiesen werden.

Prinzipien

Das Galilei'sche Relativitätsprinzip besagt, dass alle Beobachter, die sich mit konstanter Geschwindigkeit zu einander bewegen, in der Beschreibung der Physik gleichberechtigt sind. In Inertialsystemen haben die physikalischen Gesetze die gleiche Form. Dieses Prinzip reicht weiter als die einzelnen Gesetze. Es beschreibt aber keinen unmittelbaren Zusammenhang zwischen zwei Größen, sondern trifft Aussagen über die Gesetze selbst.

Ein Beispiel dafür ist auch das Überlagerungs- oder Superpositionsprinzip: Werden mehrere Kräfte auf einen Körper ausgeübt, so lassen sich diese Kräfte durch eine einzige Kraft ersetzen, die sich durch vektorielle Addition ergibt. Das Superpositionsprinzip besitzt wieder einen grundlegenden Charakter für die Physik. Es ist eine Regel für den Umgang mit Kräften. Ein solches Superpositionsprinzip gibt es auch bei Wellen. Ein Prinzip ist also ein gemeinsames Muster, das in verschiedenen Bereichen der Theorie wiederkehrt.

Theorie

Die Mechanik ist eine Theorie. In ihr sind Definitionen und gesetzesartige Aussagen systematisch geordnet. Aus Grundannahmen – den drei Newton'schen Axiomen – lassen sich die Gesetze deduktiv herleiten. Alle Aussagen der Theorie müssen widerspruchsfrei sein. Axiome und Prinzipien gehören zur Basis einer Theorie. Axiome haben dabei eher den Charakter eines Gesetzes, während Prinzipien eher Regeln sind und strukturelle Muster beschreiben. Gesetze setzen dieses Fundament voraus, lassen sich aus den Axiomen deduzieren und beschreiben einen Zusammenhang zwischen Größen in einem begrenzten Gültigkeitsbereich.

Betrachtet man eine Theorie als ein Fachwerkhaus, bilden die Axiome das Fundament. Die Prinzipien sind wiederkehrende Regeln, wie das gesamte Haus gebaut wird. Auf den Axiomen bauen die einzelnen Gesetze auf und stützen sich gegenseitig wie die Streben des Fachwerks. Die Stabilität des ganzen Gebäudes ist ein Maß für die Qualität und Verlässlichkeit der Theorie. Die Eignung des Gebäudes zeigt sich erst bei seiner Nutzung.



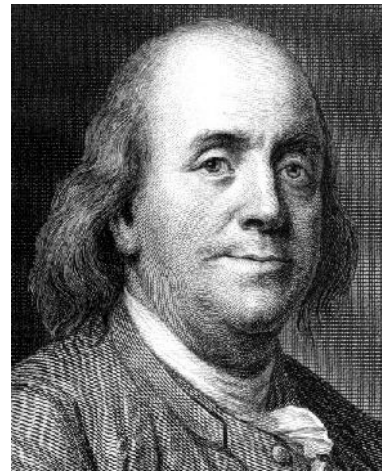
A.2. Arbeitsblätter zum Feldkonzept

Theorie von Benjamin Franklin

Eine weitere namhafte Persönlichkeit, die sich mit dem Zustandekommen der Elektrizität befasst war Benjamin Franklin. Er schlug in den 1750er Jahren erstmals eine Fluidatheorie der Elektrizität vor. Er ging von der Existenz nur eines einzigen Fluidums aus, durch dessen Überschuss oder Mangel die makroskopische Bipolarität der Elektrizität zustande kam. Konsequenterweise führte er auch eine neue Terminologie ein: Statt wie Dufay die beiden elektrischen Zustände als „glasartig“ oder „harzartig“ zu bezeichnen, sprach er von „positiv“ und „negativ“.

Franklin hat sich nicht nur als Naturwissenschaftler, sondern auch als amerikanischer Politiker, Botschafter in Paris und als Ökonom hervorgetan. Lange bevor er seine Theorie der Elektrizität entwickelte, hatte er bereits ein ungewöhnliches Papier veröffentlicht: *The Nature and Necessity of a Paper Currency* (1729). Darin machte er sich für die vermehrte Einspeisung von Papiergeld in den Geldkreislauf stark.

Die wesentlichen Prinzipien seiner neuen Elektrizitätstheorie hatte Franklin bereits 1745/46 formuliert. Er interpretierte Naturvorgänge nach dem Muster eines Buchhalters, der Geld verwaltet. Die folgende Deutung eines von ihm durchgeführten Versuchs zur Ein-Fluidum-Theorie zeigt diesen charakteristischen Zug Franklins:



1. Benjamin Franklin war ein nordamerikanischer Drucker, Verleger, Schriftsteller, Naturwissenschaftler, Erfinder und Staatsmann. Quelle: www.wikipedia.org

1. Zwei Versuchspersonen stehen elektrisch isoliert auf dem Erdboden (z.B. auf isolierenden Elektrisierschemeln). Die Person A reibt einen Glasstab, während Person B sich wiederholt dem Stab annähert und elektrische Funken zieht. Beide Personen A und B erscheinen gegenüber einer dritten Person C, die ohne elektrische Isolierung auf dem Erdboden steht, elektrisiert.
2. Berühren sich A und B nach dem unter 1. beschriebenen Vorgang, dann ist der Funke zwischen ihnen stärker als jener zwischen A und C oder B und C.

Franklin deutet dieses Experiment folgendermaßen:

Jede Person A, B und C bringt 10 Einheiten elektrisches Fluidum von Natur aus mit in dieses Geschäft. Durch Reiben der Glasröhre stellen A und B eine neue Verteilung her. A gibt beispielsweise 2 Einheiten an B ab. A besitzt noch 8 Einheiten und erleidet einen Mangel an elektrischem Fluidum. B dagegen besitzt mit 12 Einheiten nun einen Überschuss. Die Differenz zwischen A und B beträgt also 4 Einheiten, die zwischen A und C oder B und C aber nur jeweils 2 Einheiten. Daher ist der elektrische Funke zwischen A und B auch doppelt so stark wie zwischen A und C oder B und C.

Mit seinem Modell ging es ihm nicht um ein Bestreiten der Bipolarität, sondern um eine mikroskopische Erklärung für dieses Verhalten. Diese Erklärung, die er präsentierte, wurde in der zweiten Jahrhunderthälfte dann höchst kontrovers diskutiert und gegen eine mögliche Zwei-Fluida-Theorie gestellt, ohne dass es zu einer Lösung kam. Noch im 19. Jahrhundert war die Frage, ob es im mikroskopischen Bereich wirklich zwei unterschiedliche Ladungstypen gab, keineswegs abschließend beantwortet.

Theorie von Charles Dufay

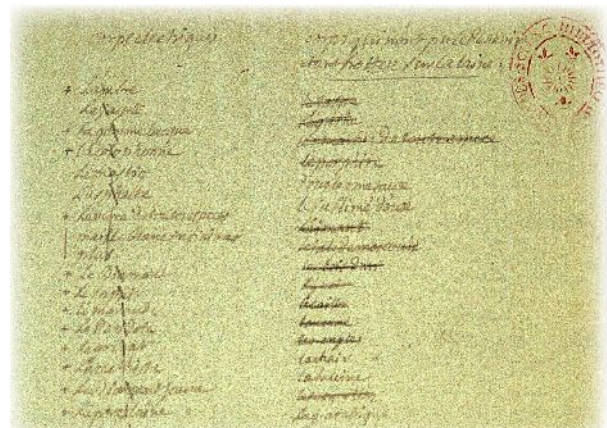
Eines seiner wichtigsten Ergebnisse betraf die Klasse von Materialien, die elektrisch werden können. Seit William Gilbert im Jahr 1600 erstmals elektrische Effekte als eigene, vom Magnetismus verschiedene Klasse identifiziert und benannt hatte, gab es eine sich ständig erweiternde Liste von Körpern, die diese „virtus electrica“ annehmen konnten, die also, wenn gerieben, kleine in der Nähe befindliche Körper anzogen. Man sprach einfach von „electrica“ – der Bernstein („elektron“) war damit Pate für eine ganze Klasse von Materialien geworden. Gilbert selbst hatte gleich eine zweite Liste von solchen Körpern hinzugelegt, die diese virtus gerade nicht hatten. Beide Listen wurden ab dem späten 17. Jahrhundert beständig erweitert. In jesuitischen wie weltlichen Kreisen, in Italien, Frankreich und England gleichermaßen gab es immer wieder einzelne Forscher, die sich für diese Kuriosität der Natur interessierten und neue Materialien ausprobierten. Darunter finden sich auch Namen wie Niccolò Cabeo, Honoré Fabri SJ und Robert Boyle.

Dufay kannte diese Bemühungen wohl, stellte sie in der ersten jemals verfassten „histoire de l'électricité“ zusammen. Die Liste der Materialien allerdings erschien ihm offenbar nicht überzeugend. In ausgedehnten eigenen Experimenten untersuchte er systematisch alle Materialien, deren er habhaft werden konnte. Er fragte sich, welche Substanzen durch Reiben die elektrische Eigenschaft erhalten konnten, und auf welche sich die Eigenschaft dann übertragen ließ. Wie viele vor ihm begann er mit einer Positiv- und einer Negativliste, trieb aber die beiden als förderlich bekannten Bedingungen – Trockenheit und Wärme – konsequent zu ihren Extremen. Unter solchen verschärften experimentellen Bedingungen schrumpfte die Negativliste kontinuierlich, viele Substanzen wanderten von rechts nach links (Abb. 2). Im Resultat formulierte er zwei verblüffende Ergebnisse: Zum einen wurden alle Körper, die sich überhaupt reiben ließen, dabei auch elektrisch, zumindest, wenn sie genügend warm und trocken waren. Die einzige signifikante Ausnahme hier bildeten die Metalle. Durch Übertragung hingegen, und das war das zweite Ergebnis, konnten alle Körper schlechthin elektrisch werden.

Noch fundamentaler war allerdings Dufays zweite Innovation, die mit der Frage elektrischer Anziehung und Abstoßung zu tun hatte. Wie schon erwähnt, waren elektrische Abstoßungseffekte von einigen berichtet worden, andere hatten das aber bestritten: Bei genauem Hinsehen erwies sich das nur als ein Scheineffekt, als Überlagerung verschiedener Anziehungseffekte. In seinen Experimenten ging es Dufay deshalb zunächst um ein stabiles, d. h. reproduzierbares Aufweisen von experimentellen Einzelbefunden. Durch Verändern der Umgebungskonstellationen konnte er den



1. Charles du Fay war ein französischer Naturforscher der hauptsächlich bekannt wurde durch seine Abhandlungen über Elektrizität. Quelle: www.wikipedia.org



2. In seinen Listen von elektrischen (links) und nicht elektrischen Materialien (rechts) musste Dufay viele, die zunächst rechts eingetragen waren, austreichen und nach links setzen (1733)

Quelle: Archives de l'Académie des sciences, Paris

Einwand, dass es sich um Überlagerungen von Anziehungseffekten benachbarter Körper handelte, als nicht haltbar erweisen. Dabei gelang es ihm, den Effekt auch unter Variation vieler experimenteller Parameter zu reproduzieren: elektrische Abstoßung existierte ohne Zweifel. In einem spektakulären Versuch konnte er etwa ein kleines Stückchen Blattgold über beträchtliche Zeit hinweg über dem elektrischen Glasrohr in der Schwebe halten.

Ganz im Sinne seiner Suche nach Gesetzmäßigkeiten stand er damit aber vor der Frage, wann denn genau nun Anziehung auftrat, wann Abstoßung, und von welchen Umständen das jeweils abhing. Wieder war die vornehmliche Strategie Dufays die Variation von Parametern: die Art der Elektrifizierung der Körper (Reiben, Übertragen), der Grad der Elektrifizierung, die Größe der elektrifizierten Körper, ihr Material und die Beschaffenheit der Unterlage. Er variierte den Abstand

der Körper und untersuchte den Einfluss dritter, in der Nähe befindlicher Körper. Trotz einem derartig breit angelegten Experimentieren stellte sich das Problem als weitaus schwieriger heraus als die vorigen. Die Resultate blieben verwirrend und fügten sich nicht in eine Gesetzmäßigkeit. Nur für sehr spezielle Konstellationen zeichnete sich eine Regel ab: Wenn ein elektrifizierter Körper einen nicht-elektrifizierten anzog und dieser sich ihm so weit näherte, dass er durch Übertragung selbst elektrisch wurde, schlug die Anziehung in Abstoßung um und der zunächst angezogene Körper entfernte sich wieder. Diese Regel war offenbar sehr allgemein gültig und konnte schon viele Effekte verständlich machen. Zugleich war sie aber doch explizit eingeschränkt auf Paare von Körpern, von denen der eine durch den anderen elektrifiziert worden war. Für alle anderen Fälle zeigten sich die Verhältnisse immer noch als verwirrend und scheinbar regellos. Bei der weiteren Durchführung seiner Variationsmethode ergab sich für Dufay ein entscheidender Hinweis aus einem Experiment, bei dem er wieder das erwähnte Goldblättchen schwebend über dem Glasrohr hielt und nun einen dritten, elektrifizierten Körper hinzubachte. Wenn dieser dritte Körper aus Glas war, wurde das Goldblättchen auch von diesem abgestoßen, wenn es aber aus Kopal (junger Bernstein) war, wurde es angezogen! Das Ergebnis verwirrte Dufay vollständig, gab ihm aber einen starken Hinweis auf eine Materialabhängigkeit, und dieser Spur ging Dufay dann ausführlich nach. Die Resultate waren immer verblüffender – es zeigte sich eine sehr klare Materialabhängigkeit in dichotomer Weise. Das bewegte Dufay schließlich zu einem radikalen Vorschlag: Statt von Elektrizität im Allgemeinen sollte man von zwei Elektrizitäten sprechen. Dabei galt dann die Regel, dass ein elektrifizierter Körper alle diejenigen abstieß, die dieselbe Elektrizität trugen, zugleich aber jene anzog, welche die jeweils andere trugen. Die beiden Elektrizitäten behielten überdies, wie die Experimente zeigten, ihren jeweiligen Charakter auch beim Übertragen auf andere bei. Damit stellte sich die obige Regularität über das Auftreten von Abstoßung als ein Spezialfall heraus. Welche Elektrizität ein Körper beim Reiben annahm, hing, so Dufays Befund, nur vom Material des Körpers ab. Damit induzierte die Unterscheidung von zwei Elektrizitäten auch eine Einteilung aller Materialien in zwei Klassen, die eben für die eine oder andere Elektrizität suszeptibel waren. Umgekehrt konnten die Elektrizitäten nach diesen Klassen bzw. nach prominenten Stellvertretern derselben benannt werden: Dufay sprach deshalb von *Glas-* bzw. *Harz-Elektrizität*. Mit diesen neuen Begriffen konnte er, so seine Aussage, nicht nur seine eigenen, wirklich sehr zahlreichen Experimente zu Anziehung und Abstoßung ausnahmslos verstehen, sondern auch die von anderen Forschern.

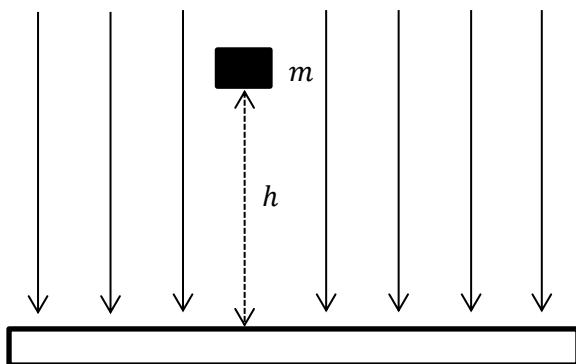
Sie wurde bekannt als *Zwei-Fluida-Theorie*.

Herleitung der elektrischen Spannung und anderer Größen mithilfe einer Analogie zum Gravitationsfeld

Im Gravitationsfeld

Die Feldstärke $g = \frac{F}{m}$ (Kraft pro grav. Ladung)

Felddarstellung:



Energie: $E_{pot} = m \cdot g \cdot h$

Aus der Division mit der Probeladung m ergibt sich das Potential.

Potential: $\Phi = g \cdot h$

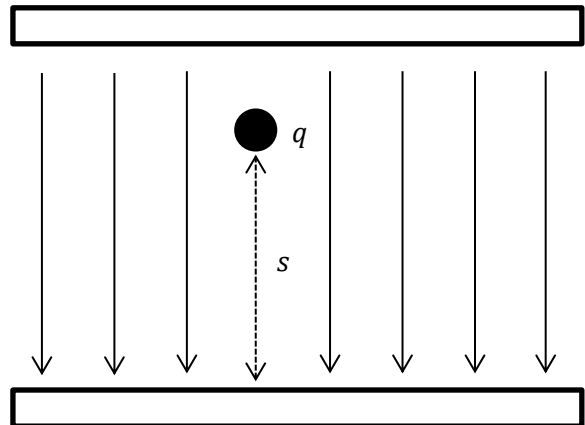
Die Differenz aus zwei Potentialen ergibt eine Potentialdifferenz, also eine gravitative Spannung, die aber eher selten benutzt wird.

Potentialdifferenz: $\Delta\Phi = g \cdot \Delta h$

Im elektrischen Feld

Die Feldstärke: $E = \frac{F}{q}$ (Kraft pro el. Ladung)

Felddarstellung:



Energie: $E_{pot} = q \cdot E \cdot s$

Aus der Division mit der Probeladung q ergibt sich das Potential.

Potential: $\Phi = E \cdot s$

Die Differenz aus zwei Potentialen ergibt eine Potentialdifferenz, also eine elektrische Spannung, die fast immer benutzt wird.

Potentialdifferenz: $\Delta\Phi = E \cdot \Delta s = U$

Mit Einsetzen der Definition der Feldstärke

ergibt sich $U = \frac{F}{q} \cdot \Delta s \quad | \cdot q$

$$q \cdot U = \underbrace{F \cdot \Delta s}_{\text{Arbeit}}$$

der Ausdruck für die Arbeit im el. Feld: $W_{el} = q \cdot U$

Da Ladung pro Zeit der Stromstärke entspricht

$$I = \frac{q}{t} \quad \Leftrightarrow \quad q = I \cdot t$$

entsteht durch die Ersetzung von q

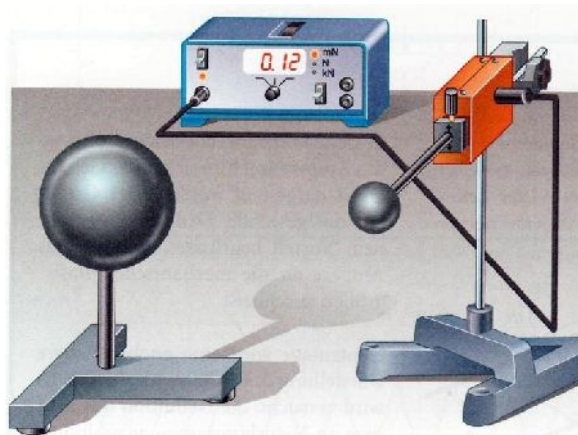
$E_{el} = U \cdot I \cdot t$ ein Ausdruck der el. Energie

Aufgabe: Erörtere, warum bei der Gravitation die Potentialdifferenz eine wesentlich geringere rechnerische Bedeutung spielt als in der Elektrodynamik.

Versuch

Aufbau und Durchführung:

Eine kleine Metallkugel ist isoliert mit einem digitalen Kraftmesser verbunden. Sie wird aufgeladen und in die Nähe einer großen geladenen Kugel gebracht. Die durch das elektrische Feld auf die kleine Kugel ausgeübte Kraft F und ihre Ladung q werden gemessen. Die Messung wird immer an derselben Stelle des Feldes für verschiedene Probeladungen wiederholt.



Quelle: Grehn, Joachim (Hrsg.), et al.: Metzler Physik. Aufl. 4 Braunschweig: Bildungshaus Schulbuchverlag, 2007 (S.192)

Messwerte:

q in nC	225	160	77	38	18
F in mN	1,48	1,05	0,51	0,25	0,12
$\frac{F}{q}$ in —					

Deutung:

Definition: Die elektrische Feldstärke

Auszug aus: „Über Faradays Kraftlinien“ von J.C. Maxwell



1. Michael Faraday (1791-1867) war ein englischer Naturforscher, der als einer der bedeutendsten Experimentalphysiker gilt.



2. J.C. Maxwell (1831-1879) war ein schottischer Physiker. Er entwickelte einen Satz von Gleichungen (die Maxwell'schen Gleichungen), welche die Grundlagen der Elektrizitätslehre und des Magnetismus bilden.

Wir haben uns alle an den mathematischen Begriff dieser Fernwirkung gewöhnt. Wir können daraus Schlüsse ziehen und die betreffenden Gesetze in Formeln fassen, welche eine bestimmte mathematische Bedeutung haben und in voller Uebereinstimmung mit den Naturerscheinungen stehen. Ja, es giebt in der angewandten Mathematik keine Formel, die mit der Natur besser stimmen würde, als das *Newton'sche* Gravitationsgesetz, und keine Theorie hat im menschlichen Geiste fester Wurzel gefasst als die der Fernwirkung der Körper.

Ich habe an erster Stelle den Begriff der Kraftlinien zu erklären und zu erläutern. Wenn ein Körper in gegebener Weise elektrisirt ist, so wird ein kleiner, mit positiver Elektrizität geladener Körper in jeder gegebenen Lage in der Nähe des ersten Körpers eine Kraft erfahren, die ihn nach einer bestimmten Richtung treibt. Wenn der kleine Körper gleich stark negativ elektrisirt ist, wird er durch eine gleiche Kraft gerade nach der entgegengesetzten Richtung getrieben. Genau in derselben Beziehung steht ein magnetischer Körper zum Nord- oder Südpol eines kleinen Magnets. Wenn der Nordpol nach der einen, so wird der Südpol gerade nach der entgegengesetzten Richtung getrieben.

Wir können daher durch jeden Punkt des Raumes eine Linie so ziehen, dass sie die Richtung der elektrischen oder magnetischen Kraft, d. h. der Kraft, welche daselbst auf ein positiv elektrisirtes Theilchen oder auf einen punktförmigen Nordpol wirkt, darstellt, oder auch die umgekehrte Richtung der Kraft auf ein negativ elektrisirtes Theilchen oder einen Südpol. Da dies für jeden Punkt des Raumes gilt, so können wir, von irgend einem Punkte ausgehend, eine Linie so ziehen, dass ihre Richtung in jedem ihrer Punkte mit der elektrischen oder magnetischen Kraft in diesem Punkte zusammenfällt. Diese Curve wird für jeden ihrer Punkte die Richtung dieser Kraft anzeigen und sie mag deshalb Kraftlinie heißen. Wir können in derselben Weise andere Kraftlinien ziehen, bis wir den ganzen Raum mit Curven angefüllt haben, welche durch ihre Richtung die der Kraft in jedem beliebigen Punkte anzeigen.

Mögliche Schülerlösung

Gemeinsamkeiten und Unterschiede von elektrischen, magnetischen und gravitativen Feldern.

Elektrisches Feld	Magnetisches Feld	Gravitationsfeld
Kraftwirkung auf Probeladung	Kraftwirkung auf Magnete, Eisen und fließende Ströme	Kraftwirkung auf Massen
Felderzeugend ist: Elektrische Ladung (Q)	Felderzeugend sind: Permanentmagnete (Ladung ?) und elekt. Ströme (I)	Felderzeugend ist: Masse (m)
Zwei Arten von Ladungen: Positiv und Negativ	Zwei Arten von Polen: Nord- und Südpol	Eine Art von Ladung: Masse
Eine Feldlinie ist eine gedachte Linie auf der sich Probekörper (Ladung, Pol, Masse) bewegen. Ihre Tangenten geben an jeder Stelle der Feldlinie die Richtung der wirkenden Kraft an.		
Feldtypen: Radial (Ladung, gel. Kugel), homogen (Kondensator), inhomogen	Feldtypen: Radial (?), homogen (Hufeisenmag.), inhomogen	Feldtypen: Radial (Masse, Erde), homogen (nahe Erdoberflä.), inhomogen
Eigenschaften der Feldlinien: - Zeigen in Richtung der Kraft auf eine positive Probenladung - Verlaufen von positiver zu negativer Ladung - Berühren sich nicht - Dichte ein Maß für die Feldstärke	Eigenschaften der Feldlinien: - Zeigen in Richtung der Kraft auf einen Probenordpol - Verlaufen vom Nordpol zum Südpol ⁽¹⁾ - Berühren sich nicht - Dichte ein Maß für die Feldstärke	Eigenschaften der Feldlinien: - Zeigen in Richtung der Kraft auf Probemasse - Stets zur felderzeugenden Masse - Berühren sich nicht - Dichte ein Maß für die Feldstärke
Trägermedium: Keins, wirken auch im Vakuum		
Abschirmung möglich	Abschirmung möglich ⁽²⁾	Abschirmung nicht möglich
Die wirkende Kraft nimmt mit der Entfernung ab		
Rechnerische Größen		
Feldstärke: $E = \frac{F}{q}$	Feldstärke: $M = \frac{F}{I?}$	Feldstärke: $G = \frac{F}{m}$
Kraftwirkung mittels: Coulombgesetz $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ Mit Konstante: ϵ_0	Kraftwirkung mittels ⁽³⁾ : $F = k? \cdot \frac{?}{r^2}$ Mit Konstante: ?	Kraftwirkung mittels: Gravitationsgesetz $F = \gamma \frac{M_1 M_2}{r^2}$ Mit Konstante: γ
Potential: $\varphi_{el} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$	Potential: $\varphi_{mag} = k? \frac{I?}{r}$	Potential: $\varphi_g = \gamma \frac{M}{r}$

Anmerkungen:

Zu (1): Magnetfeldlinien sind immer geschlossen und haben nur eine Verlaufsrichtung.

Zu (2). Die Abschirmung von Magnetfeldern ist technisch sehr schwierig und geht nur über das Erzeugen von Gegenmagnetfeldern.

Es gibt also kein Material was Magnetfelder vollends abschirmt. Mithilfe von ferromagnetischen Stoffen kann ein Magnetfeld lediglich gedämpft werden.

Zu (3): Obwohl es keinen magnetischen Monopol gibt, hat man die Möglichkeit ein magnetisches Kraftgesetz in Analogie zur Elektrostatik zu formulieren:

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \cdot \frac{p_1 \cdot p_2}{r^2}$$

μ_0 ist hier die mag. Feldkonstante und p_1, p_2 die mag. Polstärken.

Aufgrund des fehlenden Monopols wird dieses Kraftgesetz aber eigentlich nicht genutzt und die Kraftwirkung mittels der Lorentzkraft definiert.

A.3. Arbeitsblätter zum Geometrisierungskonzept

Die Gravitations-Rotverschiebung: Variante 1

Ein Fahrstuhl hängt im Fahrstuhlschacht, sodass er im Bezugssystem des Schachtes ruht. In dem Augenblick, in welchem das Halteseil zerschnitten wird, werde von einer am Kabinenboden befindlichen Lampe ein Lichtblitz der Wellenlänge λ in Richtung Kabinendecke emittiert. Nach dem Zerschneiden des Seils befindet sich der Fahrstuhl im Zustand des freien Falls. Der im Fahrstuhl befindliche Beobachter **A** registriert in diesem dieselben physikalischen Gesetzmäßigkeiten, wie sie auch ohne Vorhandensein eines äußeren Schwerfeldes beobachtet werden könnten. Nach dem Äquivalenzprinzip stellt sein Labor „Fahrstuhl“ ein Inertialsystem dar. In seiner Beobachtungsposition misst er daher für das ankommende Licht dieselbe Wellenlänge λ mit der das Licht vom Kabinenboden aus abgestrahlt wurde.

Die Laufzeit des Lichtes vom Kabinenboden bis zur Kabinendecke beträgt:

$$t = \frac{h}{c}$$

Der im Fahrstuhlschacht befindliche Beobachter **B** ruht im Gravitationsfeld. Wegen der in der ART nicht mehr vernachlässigbaren Schwerkraftwirkung stellt der Fahrstuhlschacht hier kein Inertialsystem dar. In dem Augenblick, in welchem das Licht an der Fahrstuhldecke eintrifft, stehen Beobachter **B** und Beobachter **A** sich gegenüber. Auch der Beobachter **B** registriert das ankommende Licht, allerdings mit einer größeren Wellenlänge. Ursache dafür ist der Doppler-Effekt: Der Lichtblitz durchquert die Entfernung h , während sich der Fahrstuhlboden mit der Geschwindigkeit

$$v = g \cdot t = g \cdot \frac{h}{c} = \frac{gh}{c}$$

von **B** wegbewegt. Somit folgt für den Quotienten aus Fallgeschwindigkeit des Fahrstuhls und der Lichtgeschwindigkeit:

$$\frac{v}{c} = \frac{gh}{c^2}$$

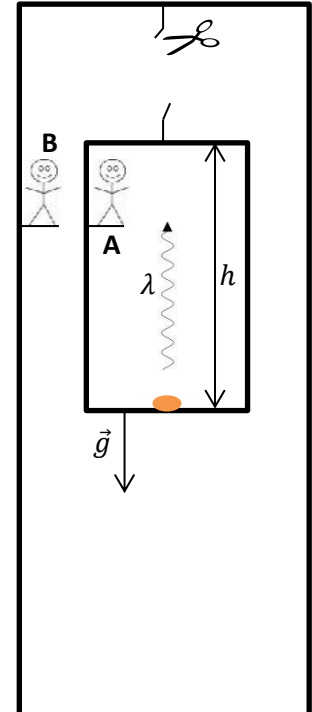
Der Doppler-Effekt (für Wellen, vgl. Krankenwagen fährt von dir weg) wird mit Hilfe der relativistischen Dopplergleichung beschrieben:

$$\lambda_E = \lambda_S \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}}$$

Für $v \ll c$ ist für diese Gleichung folgende Näherung erlaubt:
(E steht für „Empfänger“ und S für „Sender“)

$$\lambda_E = \lambda_S \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} = \lambda_S \sqrt{\left(1 + \frac{v}{c}\right) \frac{1}{1 - \frac{v}{c}}} \approx \lambda_S \sqrt{\left(1 + \frac{v}{c}\right) \left(1 + \frac{v}{c}\right)} = \lambda_S \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

$$\boxed{\frac{1}{1-x} \approx 1+x} \text{ für kleine } x$$



In diesem Falle beobachtet Beobachter **B** eine Verschiebung der Spektrallinien des Lichtes hin zu größeren Wellenlänge (Rotverschiebung). Würde sich im umgekehrten Fall Licht in einem fallenden Kasten nach unten abgestrahlt, so würde Beobachter **B** eine Blauverschiebung registrieren können. Die Verschiebung der Spektrallinie gibt man üblicherweise über eine Maßzahl z an:

$$z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{\left(\lambda_S + \lambda_S \frac{v}{c}\right) - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{v}{c} = \frac{gh}{c^2}$$

Ist $z > 0$, registriert der Beobachter eine Rotverschiebung, dementsprechend für $z < 0$ eine Blauverschiebung. Eine Gleichung für die Gravitations-Rotverschiebung ist somit gegeben durch

$$z = \frac{gh}{c^2}$$

Der Effekt der Gravitations-Rotverschiebung wurde 1960 von den amerikanischen Wissenschaftlern Pound, Rebka und Snider experimentell nachgewiesen. Dabei wurde eine γ -Strahlungsquelle auf dem Fußboden des 22,6m hohen Turms der Harvard-Universität abgelegt und an der Decke ein Absorber angebracht, mit welchem die ankommende Wellenlänge gemessen werden konnte.

Die Strahlungsquelle sendete eine elektromagnetische Welle der Frequenz f aus, der die Energie $E = 14,4 \text{ keV}$ sprach.

Spätere Experimente konnten die Genauigkeit der Messergebnisse im Vergleich zur Theorie bis auf 1% steigern.

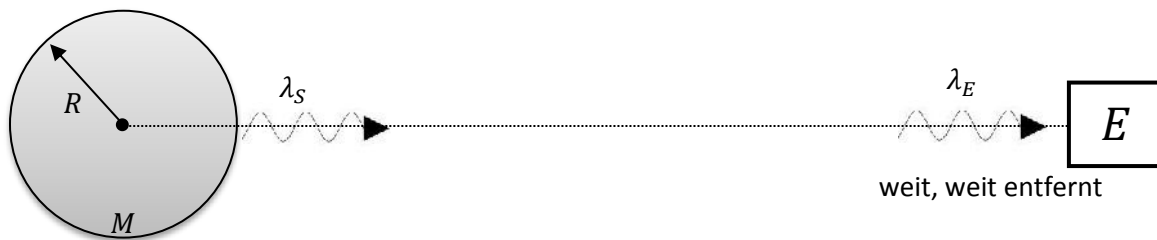
Aufgaben:

Bestimmen sie die auftretende Maßzahl z für das Pound-Rebka Experiment.

Die Gravitations-Rotverschiebung: Variante 2

Von der Oberfläche eines Himmelskörpers (Radius R ; Masse M) werde ein Lichtsignal der Wellenlänge λ_S bzw. der Frequenz f_S emittiert.

Dieses Lichtsignal trifft in sehr großer Entfernung auf einen Empfänger E .



Um das Gravitationsfeld verlassen zu können, muss vom Photon eine Arbeit W verrichtet werden. Diese Arbeit entspricht einer Energieänderung ΔE des Photons:

$$\Delta E = h \cdot \Delta f = h \cdot (f_S - f_E)$$

d.h. die Energieänderung schlägt sich in einer Frequenzverminderung und damit in einer Wellenlängenvergrößerung nieder. Die zu verrichtende Arbeit ist:

$$W = \gamma \cdot \frac{M \cdot m_{ph}}{R}$$

Die Masse ist laut Einstein über $E = mc^2$ gegeben und somit gilt: $m_{ph} = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2}$ (Am Sender) und damit:

$$W = \frac{\gamma M}{R} \cdot \frac{hf_S}{c^2}$$

Da $W = \Delta E$ ist, folgt: $h \cdot (f_S - f_E) = \Delta E = W = \frac{\gamma M}{R} \cdot \frac{hf_S}{c^2}$

$$\Leftrightarrow f_S - f_E = \frac{\gamma M}{Rc^2} \cdot f_S \quad \text{bzw.} \quad f_S - f_E = \frac{R_S}{2R} \cdot f_S \quad (1)$$

Mit dem Schwarzschildradius

$$R_S = \frac{2\gamma M}{c^2}$$

Die Rotverschiebung z ist definiert durch: $z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S}$ d.h. es soll nun der Zusammenhang

(1) mit Hilfe der Wellenlänge dargestellt werden: (Erinnerung ($\lambda = \frac{c}{f}$)):

$$f_S - f_E = \frac{R_S}{2R} \cdot f_S \quad \Rightarrow \quad \frac{c}{\lambda_S} - \frac{c}{\lambda_E} = \frac{R_S}{2R} \cdot \frac{c}{\lambda_S}$$

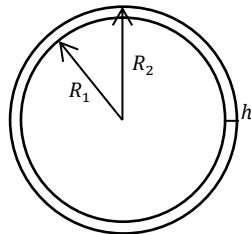
Durch Umstellen, Kürzen und Anwendung der Näherung $\frac{1}{1-x} \approx 1 + x$ (für kleine x) kommt man auf die Beziehung

$$\lambda_E = \left(\frac{1}{1 - \frac{R_S}{2R}} \right) \cdot \lambda_S \approx \left(1 + \frac{R_S}{2R} \right) \cdot \lambda_S \quad (2)$$

Daraus folgt für die Rotverschiebung:

$$z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{R_S}{2R} = \frac{\gamma M}{Rc^2} \quad (3)$$

Der Term beschreibt die Änderung des Gravitationspotentials $\Delta\varphi$ desjenigen Himmelskörpers, welcher durch sein Schwerefeld die Rotverschiebung hervorruft. Für kleinere Entfernung in der Nähe eines Himmelskörpers kann folgendes überlegt werden.



Von fern Betrachtet:
 $R := R_1 \approx R_2$

$$\Delta\varphi = \frac{\gamma M}{R_1} - \frac{\gamma M}{R_2} = \frac{\gamma M R_2}{R_1 R_2} - \frac{\gamma M R_1}{R_1 R_2} = \frac{\gamma M}{R_1 R_2} \underbrace{(R_2 - R_1)}_{=h} = \frac{\gamma M}{R_1 R_2} \cdot h = \underbrace{\frac{\gamma M}{R^2}}_{=g} \cdot h = g \cdot h$$

Setzt man das fettgedruckte in Gleichung (3) ein, so ergibt sich: $z = \frac{ghR}{c^2}$

Mit obiger Näherung, kann auch $\frac{R_S}{2R} \approx \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R_S}{R}}} - 1$ gesetzt werden und man erhält die Lösung der Allgemeinen Relativitätstheorie:

$$z = \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{R_S}{R}}} - 1$$

Hiermit kann auch die Gravitations-Rotverschiebung bspw. in der Umgebung von Schwarzen Löchern berechnet werden.

Aufgaben:

1. Wie muss R_S zu R in (2) stehen, damit die Näherung gemacht werden kann?
2. Berechnen Sie die Gravitations-Rotverschiebung z unserer Sonne.

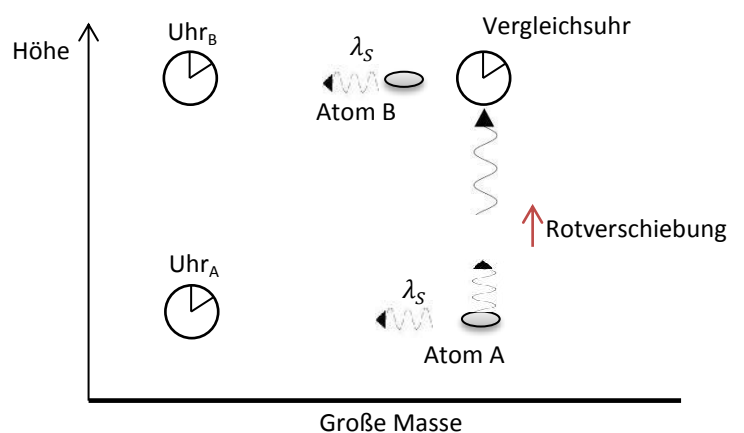
Die Gravitations-Zeitdilatation

Die Zeitdilatation im Gravitationsfeld lässt sich mit Hilfe eines Gedankenexperiments darstellen. Dabei wird auf den Effekt der Gravitations-Rotverschiebung zurückgegriffen (vgl. Gruppe 1).

Zwei Atome ruhen zusammen mit drei Uhren in einem Gravitationsfeld. Atom **B** besitzt dabei mit einer Uhr und einer zugehörigen Vergleichsuhr eine größere Höhe als Atom **A** mit seiner zugehörigen Uhr. Das untere Atom sendet Licht aus welches bei Atom **B** nach der Beziehung:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{gh}{c^2} \quad (1)$$

rotverschoben ankommt. Die Lichtabstrahlung erfolge so, dass mit jedem Umlauf des Elektrons um den Atomkern ein Wellenberg ausgesandt wird. Gelangt der Wellenberg zur zugehörigen Uhr, wird der Zeiger dieser Uhr um 1s vorgerückt. Das Atom **B** ist genauso konstruiert wie Atom **A** und strahlt mit der gleichen Wellenlänge Licht aus. Die Zahl der von **B** emittierten Wellenberge wird analog wie beim unteren Atom mit Hilfe der zugehörigen Uhr gemessen.



Außerdem befindet sich in der Höhe von B eine Vergleichsuhr. Diese Uhr registriert diejenigen Wellenberge, welche vom tiefer liegenden Atom A „abgestrahlt“ werden. Aufgrund der Gravitations-Rotverschiebung vergrößert sich nun entlang des Lichtweges der Abstand zwischen diesen Wellenbergen. Das heißt aber nichts anderes, als dass sich die Zeiger der Vergleichsuhr langsamer vorwärts bewegen als die Zeiger der anderen in gleicher Höhe angebrachten Uhr. Aus Sicht eines Beobachters bei B scheinen diejenigen Vorgänge unter ihm, welcher tiefer im Gravitationsfeld stattfinden, mit einer anderen Zeit abzulaufen als analoge Vorgänge in seiner unmittelbaren Umgebung.

Folgerung: In der Umgebung schwerer Massen erfolgt der Zeitablauf verlangsamt. Uhren in großer Höhe über der Masse gehen schneller als Uhren in geringerer Höhe.

Die Größe dieses Effektes lässt sich wie folgt ableiten:

$$\text{Betrachte Gleichung (1): } \frac{\lambda_E - \lambda_S}{\lambda_S} = \frac{gh}{c^2} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{\lambda_E}{\lambda_S} - 1 = \frac{gh}{c^2}$$

Mit jedem von A ausgesandten Wellenberg rückt der Zeiger der zugehörigen Uhr wie auch der höheren Vergleichsuhr um 1s vor. Da mit Hilfe der Uhren die Zeit T bestimmt wird, gilt für die jeweils abgelesenen Zeiten: $T_S \sim \lambda_S$ und $T_E \sim \lambda_E$ (S : Sender, befindet sich tiefer im Gravitationsfeld als Empfänger; E : Empfänger)

Aufgrund dieser Proportionalität gilt:

$$\frac{T_E}{T_S} - 1 = \frac{gh}{c^2} \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{T_E = \left(\frac{gh}{c^2} + 1 \right) \cdot T_S} \quad (2)$$

Die Gleichung lässt sich auf gleiche Weise wie bei der Gravitations-Rotverschiebung (vgl. Gruppe 2) für große Entfernungen verallgemeinern. Dazu benutzt man $g = \frac{\gamma M}{R^2}$ (Newton) und die Höhe h vom Massenmittelpunkt gesehen R entspricht ($R + h \approx R$).

$$T_E = \left(\frac{\gamma M}{Rc^2} + 1 \right) \cdot T_S = \left(\frac{R_S}{2R} + 1 \right) \cdot T_S$$

Messtechnisch konnte die Gravitations-Zeitdilatation erst 1971 von den amerikanischen Wissenschaftlern Hafele und Keating nachgewiesen werden. Sie brachten vier Cäsium-Atomuhren an Bord eines kommerziellen Linienflugzeugs, und flogen zweimal rund um die Welt, zuerst ostwärts, dann westwärts, und verglichen die Borduhren mit denen des United States Naval Observatory. Mit den unterschiedlichen Flugrichtungen wurde zudem die Zeitdilatation nach der Speziellen Relativitätstheorie nachgewiesen. Mit diesem Experiment wurden also die Effekte

- Bewegte Uhren gehen langsamer (SRT)
- Uhren in größeren Höhen gehen schneller (ART)

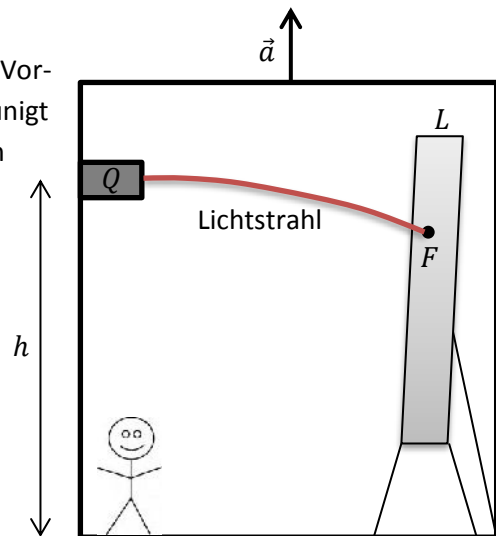
bestätigt.

Aufgaben:

- 1) *Rechnen Sie beide Äquivalenzumformungen auf Seite 1 (unten) nach.*
- 2) Ein Mann besteigt mit einer Uhr den Mount Everest (8900m) und bleibt dort 65 Jahre lang wohnen. Eine Vergleichsperson, wohnhaft in Meeresspiegelhöhe, hat zuvor ihre Uhr mit der des Bergsteigers synchronisiert. Nach genau 65 Jahren wird die Zeitdifferenz gemessen. *Bestimmen Sie diese zeitliche Abweichung.*

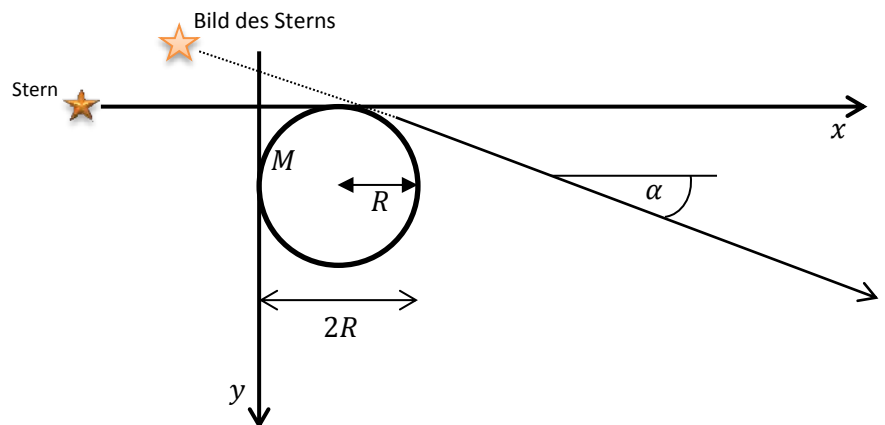
Die Gravitations-Lichtablenkung

Ein Beobachter befinde sich in einem Kasten, welcher ohne Vorhandsein eines Schwerefelds im leeren Raum mit $\vec{a}$ beschleunigt werde. In diesem Kasten befindet sich eine Lichtquelle Q , von welcher in der (in Bewegungsrichtung gemessenen) Höhe h ein Lichtstrahl in Richtung der Leinwand L ausgesandt wird. Der in der Leinwand eingebrannte Fleck F besitzt nun nicht mehr die Höhe h sondern liegt aufgrund der Trägheit des abgestrahlten Lichtes etwas tiefer. Gemäß dem Äquivalenzprinzip wird der Beobachter, wenn er nun mit seinem Kasten innerhalb eines Schwerefeldes bei gleicher Versuchsanordnung und der Fallbeschleunigung $g = a$ ruht, dieselben Erscheinungen wahrnehmen können, wie im zuvor beschleunigten System. Er wird ohne Überschreitung der Grenzen seines Systems weder experimentell noch durch Beobachtung entscheiden können, ob sein Kasten außerhalb eines Gravitationsfeldes beschleunigt wird, oder ob er innerhalb des Schwerefeldes ruht. Der im beschleunigten Kasten beobachtete Lichtweg ist demzufolge derselbe wie in dem Schwerefeld ruhendem System.



Folgerung: Lichtwege werden im Gravitationsfeld gekrümmt.

Betrachten wir nun die Lichtablenkung am Sonnenrand. Albert Einstein war es 1911, noch ohne das theoretische Fundament der ART, möglich den Effekt mathematisch mit Newton's Theorie zu zeigen. Zwar nicht genau, weil die Raum-Zeit-Krümmung nicht mit eingeht, aber die Größenordnung des Effektes wird sichtbar.



Die Gestalt der Lichtbahn hat nach $x = c \cdot t$ und $y = \frac{1}{2} g t^2$ die Gestalt einer Wurfparabel $y = \frac{1}{2} g \frac{x^2}{c^2}$
(g sei die Fallbeschleunigung an der Sonnenoberfläche)

Mit der Beziehung: $g = \frac{\gamma M}{R^2}$ ergibt sich:

$$y(x) = \frac{1}{2} \frac{\gamma M}{c^2} \frac{x^2}{R^2}$$

Die Ablenkung soll nun am Rand der Sonne bei $x = 2R$ geschehen. Damit ergibt sich der Ablenkwinkel α zu:

$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx} = y'(x) = \frac{\gamma M}{c^2} \frac{x}{R^2} \quad \text{mit } x = 2R \text{ folgt: } \tan \alpha = \frac{2\gamma M}{c^2 R}$$

Da, dass Verhältnis auf der linken Seite sehr klein ist, darf die Kleinwinkelnäherung ($\tan \alpha \approx \alpha$) angewandt werden und es ergibt sich für am Sonnenrand abgelenktes Licht:

$$\alpha = \frac{2\gamma M}{c^2 R}$$

Dieser Wert stellt genau die Hälfte des mit der Allgemeinen Relativitätstheorie abgeleiteten Wertes dar, welche die zusätzliche Krümmung der Raum-Zeit in der Umgebung großer Massen in ihre Untersuchung mit einbezieht.

Hier gilt: $\alpha_{ART} = 2 \cdot \frac{2\gamma M}{c^2 R}$

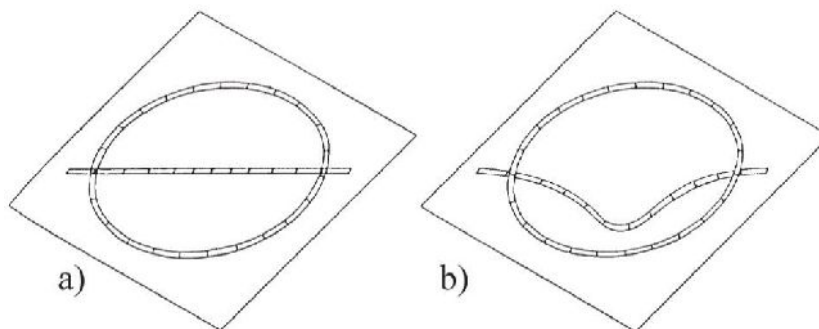
Aufgaben:

1. *Bestimmen Sie den Ablenkwinkel eines Lichtstrahls, der am Rand unserer Sonne (Erde) vorbei läuft.*
2. Der eben berechnete Winkel ist sehr klein, daher werden diese oft in Bogenminuten/Bogensekunden angegeben. Umrechnung:
 - $\varphi_{Bogen} = \frac{\pi}{180} \cdot \varphi_{Grad}$
 - $1^\circ \triangleq 60 \text{ Minuten bzw. } 1^\circ \triangleq 3600 \text{ Sekunden}$

Geben Sie die Ergebnisse aus Aufg. 1 in Bogensekunden an.

Die Gravitations-Längenkontraktion

Eine mathematische Ableitung der Gleichung zur Bestimmung der Längenkontraktion ist mit der Schulmathematik leider nicht möglich. Somit können wir es nur versuchen bildlich vorzustellen. Unten wird dir eine Fläche gezeigt, welche die Sonne und den sie umgebenden Raum in zwei Teile schneidet. Aus der Schnittfläche wurden Maßstäbe so ausgelegt, dass eine Messung von Umfang und Durchmesser eines Kreises um das Gravitationszentrum herum durchgeführt werden kann. Zählt man die angelegten Maßstäbe ab und bestimmt auf diese Weise den Umfang U und den Radius r des Kreises, so ergibt sich nicht wie erwartet $U = 2\pi r$ bzw. das Verhältnis $\frac{U}{r} = 2\pi$, sondern man erhält ein Verhältnis $\frac{U}{r} < 2\pi$. Das heißt in dem gekrümmten Gebiet sind die Maßstäbe von außen betrachtet kürzer.



1. Aus R.Sexl & H. Sexl: Weiße Zwerge-Schwarze Löcher. Vieweg Verlag: Wiesbaden 1979

Eine weitere Veranschaulichung bietet Abb. 2. Wenn man zwei Kugeln (gleiche Höhe, Abstand s) in einen krummen Trichter rollen lässt, so werden sie sich immer weiter annähern in Richtung Zentrum.

Anders herum betrachtet werden sie sich bei Verlassen des Trichters auseinanderbewegen. Nun legen wir einen Stab der Länge L_0 in die Nähe des Zentrums. Von beiden Enden aus ($x; x + L_0$) senden wir ein Photon aus dem Trichter heraus. Mit den eben gemachten Überlegungen wissen wir, dass sie sich dabei auseinanderbewegen, sprich von außen betrachtet der Abstand zwischen Ihnen und damit die Länge L_0 größer scheint.

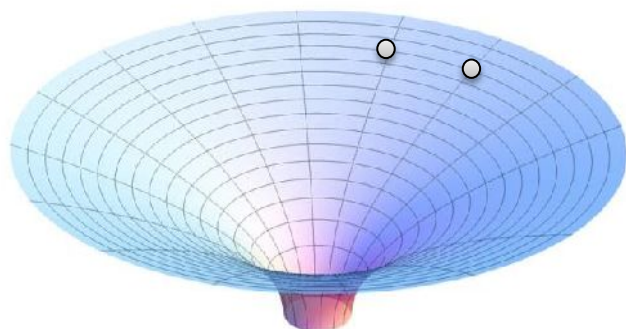


Abbildung 2

Der Faktor zwischen der weit entfernt gesehenen Länge L und der tatsächlichen Länge L_0 hat dieselbe Gestalt wie bei der Zeitdilatation:

$$L = \left(1 - \frac{\gamma M}{Rc^2}\right) \cdot L_0 \quad \text{bzw. (ohne Näherungen)} \quad L = \sqrt{1 - \frac{R_S}{R}} \cdot L_0$$

Die Maßstabsänderungen kann man nicht wie die Zeitänderungen im Experiment direkt nachweisen, denn sobald man den verkürzten Maßstab zum feldfreien Beobachter bringt, bekommt er ja wieder seine ursprüngliche Länge. Allerdings kann die Maßstabsveränderung indirekt nachgewiesen werden.

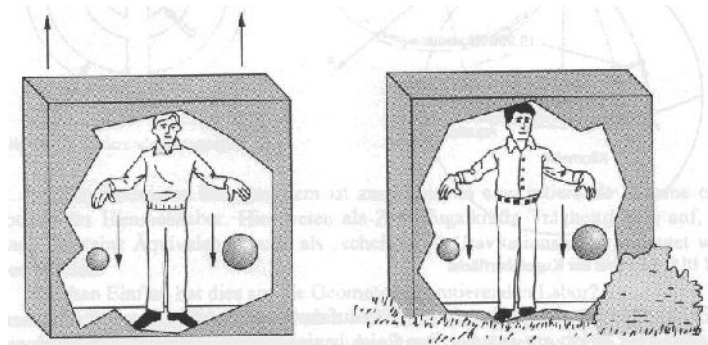
Aufgabe:

- 1) Bestimmen Sie den scheinbaren Durchmesser unserer Sonne von der Erde aus gesehen:

($D_{\odot} = 1.392.684 \text{ km}$, $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, Abstand Erde-Sonne 149600000 km)

Gedankenexperiment 1

Betrachten Sie folgendes Bild zu einem Gedankenexperiment von Albert Einstein.



1. Gedankenexperiment zum Äquivalenzprinzip aus (Kuhn, Wilfried: *Ideengeschichte der Physik*. Aufl. 1. Wiesbaden: Vieweg, 2001)

Das linke Laboratorium, ab jetzt Himmelslabor genannt, befindet sich im Weltraum und soll fernab von kosmischen Massen sein, man spürt also nahezu keine gravitative Wechselwirkung. Würde man im Himmelslabor die zwei Kugeln loslassen, würden auf sie keinerlei Kräfte wirken und sie würden schwerelos am Ort schweben.

Das rechte Laboratorium, ab jetzt Erdlabor genannt, steht auf der Erde und erfährt somit die Schwerkraft unseres Planeten. Das Gravitationsfeld sehen wir in diesem kleinen Laboratorium als homogen an.

Nun wollen wir das Himmelslabor mit der Beschleunigung $a = 9,81 \frac{m}{s^2} = g$ nach oben bewegen. Würde man die zwei Kugeln jetzt dort loslassen, würden sich diese relativ zum Labor nach unten bewegen, und zwar genauso wie im Erdlabor.

Könnten die Experimentatoren feststellen wo sie sich befinden?

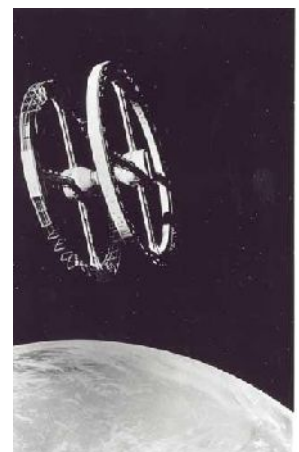
Nein!

Man kann also nicht unterscheiden, ob die gravitative oder eine anderweitige Beschleunigung vorliegt. In beiden Laboratorien laufen die Experimente äquivalent ab; dieses Prinzip nennt man *Einsteinsches Äquivalenzprinzip* (vgl. letzte Std.).

Dieser Sachverhalt lässt sich in der Realität auch sehr gut an sogenannten Parabelflügen sehen, die zum Training von Astronauten eingesetzt werden. Die künftigen Astronauten befinden sich hierbei in einem Flugzeug, das einen „Sturzflug“ vollführt. Während des Sturzfluges erleben sie Schwerelosigkeit, da sie keine Beschleunigung relativ zum Flugzeug erfahren.

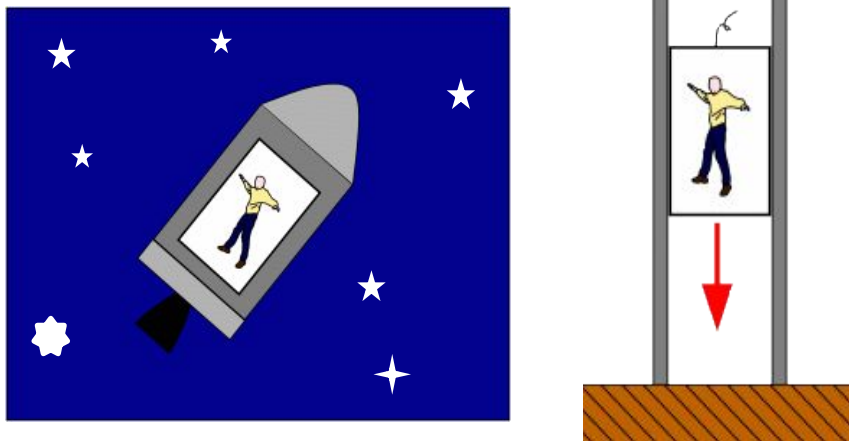
Im Umkehrschluss kann durch ein beschleunigtes Bezugssystem auch die Gravitation simuliert werden. Dieses haben sich auch viele Drehbuchschreiber von Filmen, beispielsweise bei *James Bonds Moonraker* oder *Odysee im Weltraum*, zu Nutze gemacht. Durch eine Rotation einer hypothetischen Raumstation erfahren Körper eine Beschleunigung nach außen. Wenn nun Radius und Winkelgeschwindigkeit passend gewählt werden, erhält man eine Schwerkraft, die äquivalent zu der gravitativen Schwere auf dem Erdboden ist.

2. Raumstation aus dem Film *Odysee im Weltraum*
(<http://www.spiegel.de/img/0,1020,560011,00.jpg>)



Gedankenexperiment 2

Betrachten Sie folgendes Bild zu einem Gedankenexperiment von Albert Einstein. Er kam auf die Idee, als er im Berner Patentamt saß und sich dachte: „Wenn ich frei falle, spüre ich mein Gewicht nicht mehr.“



Das linke Laboratorium, ab jetzt Himmelslabor genannt, befindet sich im Weltraum und soll fernab von allen kosmischen Massen sein, man spürt also nahezu keine gravitative Wechselwirkung. Man kann keinerlei Kräfte spüren und überall können Gegenstände frei um einen herum schweben.

Kann man daraus schließen, dass man sich in gravitationsfreier Umgebung – im Weltall – befindet?

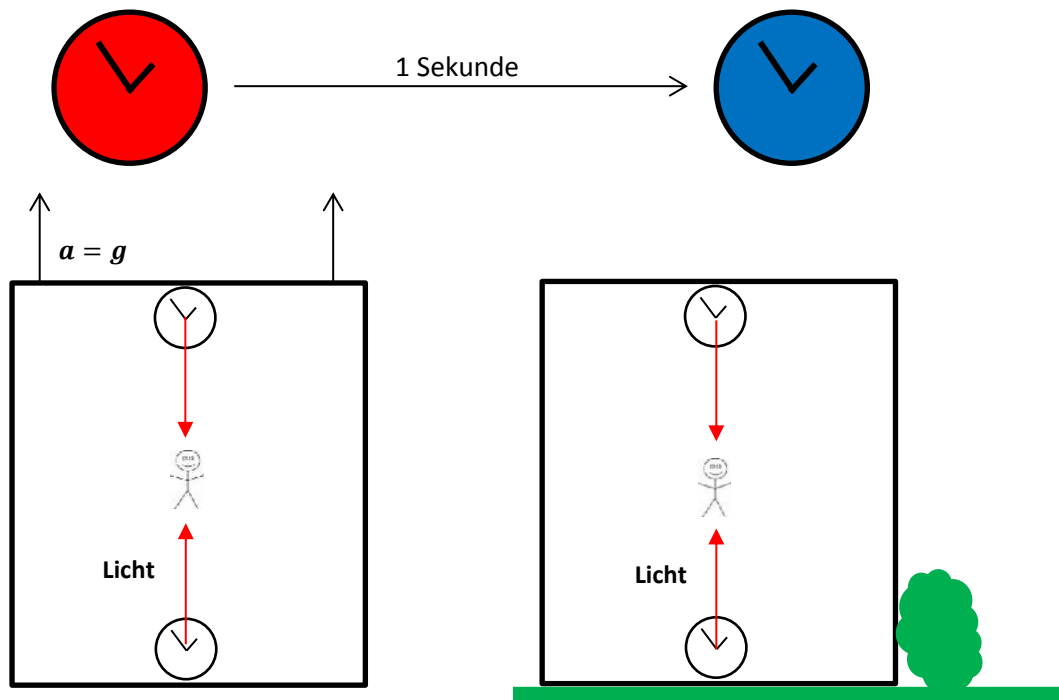
Nein!

Es kann ja sein, dass man sich im linken Labor – im Erdlabor – befindet. Hier befindet man sich im Gravitationsfeld einer Masse, der Erde, allerdings soll dieses Labor nun frei fallen. Da man selbst sowie das Labor und alle Gegenstände in diesem Gravitationsfeld in gleicher Weise beschleunigt werden, ist im Raum selbst keine Wirkung der Gravitation zu spüren. Alles fliegt kraftlos im Raum herum, so als ob man sich im Weltall, dem Himmelslabor, befinden würde. Auch man selbst fühlt sich schwerelos. Im Alltag fühlt man die Schwerkraft schließlich dadurch, dass der eigene Körper in Richtung Fußboden gezogen wird. In der Kabine dagegen fallen der eigene Körper und der Kabinenboden nebeneinander in gleicher Weise.

Tatsächlich ist dies die Art von Schwerelosigkeit, wie wir sie beispielsweise von den Astronauten auf der ISS kennen. Raumstation und Besatzung haben ja nicht etwa das Schwerfeld der Erde hinter sich gelassen - in der Flughöhe der Raumstation hat die Erdschwerkraft immerhin noch 90 % jener Stärke, die wir von der Erdoberfläche kennen. Die Schwerelosigkeit der Astronauten kommt dadurch zustande, dass sie sich mitsamt ihrer Station im freien Fall befinden. Zwar nicht im freien Fall direkt auf die Erde zu, aber immerhin im freien Fall um die Erde herum - auf einer Erdumlaufbahn.

Gedankenexperiment 3

Betrachten Sie folgendes Bild zu einem Gedankenexperiment von Albert Einstein. Zur besseren Erklärung wählen wir statt einer standardmäßigen Uhr mit Sekundenzeiger, eine Uhr die, den Ablauf einer Sekunde mithilfe eines Farbwechsels von Rot nach Blau darstellt.



Das linke Laboratorium, ab jetzt Himmelslabor genannt, befindet sich im Weltraum und soll fernab von allen kosmischen Massen sein, man spürt also nahezu keine gravitative Wechselwirkung. Das rechte Laboratorium, ab jetzt Erdlabor genannt, steht auf der Erde und erfährt somit die Schwerkraft unseres Planeten. Das Gravitationsfeld sehen wir in diesem kleinen Laboratorium als homogen an. In beiden Laboratorien stellen wir eine Uhr auf den Boden und hängen eine andere Uhr an die Decke. Beide Uhren sollen exakt gleich gehen. Nun wird das Himmelslabor mit g nach oben beschleunigt und man stellt sich vor, dass man selbst in der Mitte des Labs zwischen den beiden Uhren ist. Wenn man beide Uhren im Blick hat, muss man die Laufzeit des Lichtes berücksichtigen, die es benötigt, um von der Uhr zum Auge zu fliegen. Da das Himmelslabor nach oben eine Beschleunigung erfährt, wird das Licht von der unteren Uhr „länger“ brauchen, da der Beobachter seit der Aussendung des Lichtes weiter „weg“ beschleunigt wird. Das heißt, der Farbwechsel ist verzögert und es scheint, als ob die untere Uhr langsamer geht. Ein entsprechendes experimentelles Resultat erwartet man im Erdlabor, obwohl hier keine direkte Beschleunigung stattfindet. Einstein schloss daraus, dass das abgestrahlte Licht von der unteren Uhr gegen die entgegengesetzte Beschleunigung „arbeiten“ muss und somit an der Decke mit einer niedrigeren Frequenz ankommt. Dies kann man vergleichen mit einem Stein den man nach oben in die Luft wirft, auch dieser muss entgegen der Beschleunigung arbeiten und verliert dabei an Geschwindigkeit.

Warum aber eine niedrigere Frequenz?

Wenn das Licht sich entgegen einer wirkenden Beschleunigung bewegt, muss es dafür Energie aufwenden. Da die Lichtgeschwindigkeit in allen Bezugssystemen gleich ist, kann es nicht, wie der Stein, an Geschwindigkeit verlieren, sondern die verringerte Energie des Lichtquants schlägt sich über

$$E = h \cdot f$$

auf eine geringere Frequenz aus. Sie wird entsprechend der Energie kleiner. Wenn man diesen Gedanken weiter führt, folgt über

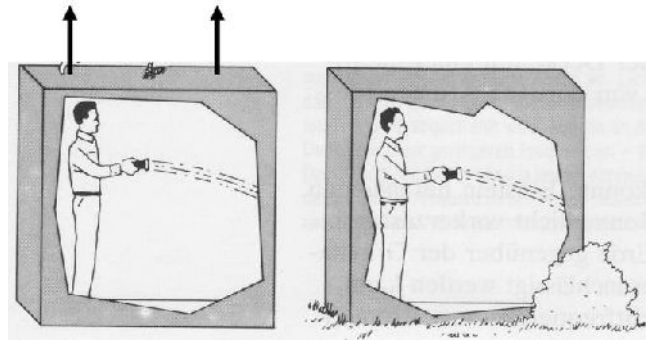
$$c = \lambda \cdot f \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = \frac{c}{f}$$

dass die Wellenlänge des Lichtes größer wird. Diese Vergrößerung bedeutet eine Verschiebung ins rote Lichtspektrum. Der Farbwechsel läuft dementsprechend langsamer ab.

Da dies auch im Erdlabor passiert, wird dieser Effekt auch als *gravitative Rotverschiebung* bezeichnet.

Gedankenexperiment 4

Betrachten Sie folgendes Bild zu einem Gedankenexperiment von Albert Einstein.



Das linke Laboratorium, ab jetzt Himmelslabor genannt, befindet sich im Weltraum und soll fernab von allen kosmischen Massen sein, man spürt also nahezu keine gravitative Wechselwirkung. Das rechte Laboratorium, ab jetzt Erdlabor genannt, steht auf der Erde und erfährt somit die Schwerkraft unseres Planeten. Das Gravitationsfeld sehen wir in diesem kleinen Laboratorium als homogen an. Nun wollen wir das Himmelslabor mit der Beschleunigung $a = 9,81 \frac{m}{s^2} = g$ nach oben bewegen.

Im Himmelslabor krümmt sich der Lichtstrahl durch die Beschleunigungswirkung relativ zum Labor nach unten. Zur besseren Veranschaulichung wird dies mit Hilfe eines Wasserstrahls symbolisiert. Dieser Effekt würde sich aber auch bei einem Lichtstrahl zeigen. Im Erdlabor wirkt die Erdbeschleunigung g , das heißt eine genauso große Beschleunigung wie im Himmelslabor. Somit sind in beiden Laboratorien die experimentellen Befunde äquivalent, dass Licht wird durch gravitative Einflüsse – im Erdlabor – durch externe Beschleunigung – im Himmelslabor – gekrümmt.

Man kann sich diesen Sachverhalt auch anderweitig überlegen. Mithilfe der Formeln

$$E = m \cdot c^2 \quad \text{und} \quad E = h \cdot f$$

folgt, dass man Lichtquanten auch eine Masse $m = \frac{h \cdot f}{c^2}$ zuordnen kann und damit wird verständlich das der Lichtstrahl wie der Wasserstrahl abgelenkt wird.

A.4. Arbeitsblätter zum Austauschteilchenkonzept

Laufzettel für die Bestandteile der Welt:

Hier kannst du die neu gefundenen Teilchen immer wieder eintragen und damit deren Entwicklung darstellen. Es gibt zur Übersicht mehrere Tabellen, wenn ein Teilchenfund revidiert wird, kannst du eine neue Tabelle ausfüllen:

Tabelle

Bekannte Teilchen			

Besondere Teilchen

Aktualisierung:

Bekannte Teilchen			

Besondere Teilchen

Aktualisierung:

Bekannte Teilchen			

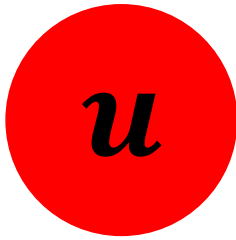
Besondere Teilchen

Aktualisierung:

Bekannte Teilchen			

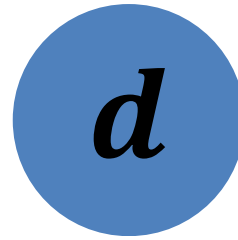
Besondere Teilchen

QUARKS



Elektrische Ladung

$$+\frac{2}{3}$$



Elektrische Ladung

$$-\frac{1}{3}$$

Es wurden aber in der Natur noch keine drittelzahligen Ladungen entdeckt.

Beispiele:

Zweierverbindungen aus u und d Quarks

$$u + u : +\frac{2}{3} + \frac{2}{3} = +\frac{4}{3}$$

$$d + d : -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} = -\frac{2}{3}$$

$$u + d : +\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +\frac{1}{3}$$

Gibt es nicht bzw. wurden noch nicht entdeckt

Dreierverbindungen aus u und d Quarks

$$u + u + u : \frac{2}{3} + \frac{2}{3} + \frac{2}{3} = +2 \text{ (instabil)}$$

$$u + u + d : \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1 \text{ (Proton)}$$

$$u + d + d : \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0 \text{ (Neutron)}$$

$$d + d + d : -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = -1 \text{ (instabil)}$$

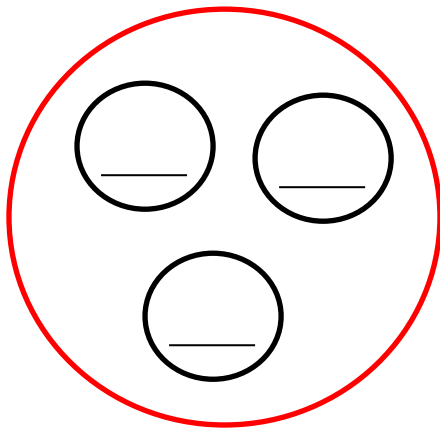
Gibt es, manche sind stabil, manche nicht

Aufbau der Nukleonen

Das Proton sowie das Neutron sind jeweils aus drei Subteilchen – den Quarks – aufgebaut. Es gibt zwei unterschiedliche Quarks, das up-Quark (kurz **u**) und das down-Quark (kurz **d**).

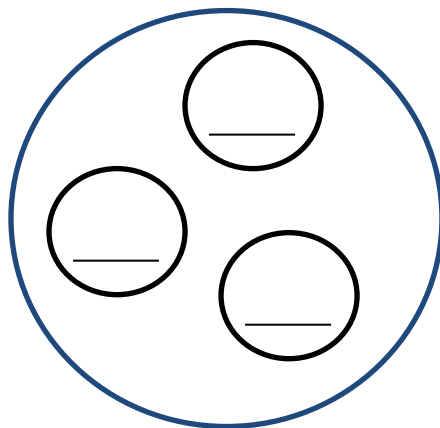
Gebe den Quarks eine Ladung und versuche durch Ausprobieren verschiedener Ladungen beim Proton auf die Ladung +1 und beim Neutron auf die Ladung 0 zu kommen.

Proton



_____	+	_____	+	_____	=	+1
Ladung Quark		Ladung Quark		Ladung Quark	=	Ladung Proton

Neutron



_____	+	_____	+	_____	=	0
Ladung Quark		Ladung Quark		Ladung Quark	=	Ladung Neutron

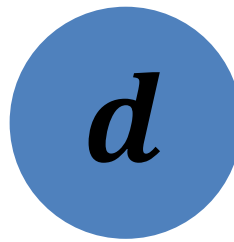
Die Ladung von up- bzw. down-Quark müsste sein: $u =$ _____ $d =$ _____

QUARKVERBINDUNGEN



Elektrische Ladung

$$+\frac{2}{3}$$



Elektrische Ladung

$$-\frac{1}{3}$$

Bau von 4er-Verbindungen von $u, \bar{u}, d, \bar{d}$ – Quarks

Möglichkeiten 4er-Quarksystem aus 4 unterschiedlichen Quarks

$$\text{aufzubauen: } \binom{7}{4} = 35^1$$

Verbindung	Ladung	Erscheint in
$(uuuu)$	$8/3$	
$(uuu\bar{u})$	$4/3$	
$(uu\bar{u}\bar{u})$	0	$2 \cdot \pi^0$
$(u\bar{u}\bar{u}\bar{u})$	$-4/3$	
$(\bar{u}\bar{u}\bar{u}\bar{u})$	$-8/3$	
$(uuud)$	$5/3$	
$(uudd)$	$2/3$	
$(uddd)$	$-1/3$	
$(dddd)$	$-4/3$	
$(uud\bar{d})$	$4/3$	
$(uud\bar{\bar{d}})$	2	$2 \cdot \pi^+$
$(u\bar{d}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$5/3$	
$(\bar{d}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$4/3$	
$(\bar{u}\bar{u}\bar{u}d)$	$-7/3$	
$(\bar{u}\bar{u}d\bar{d})$	-2	$2 \cdot \pi^-$
$(\bar{u}d\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$-5/3$	
$(\bar{u}\bar{u}\bar{u}\bar{d})$	$-5/3$	
$(\bar{u}\bar{u}\bar{d}\bar{\bar{d}})$	$-2/3$	

Verbindung	Ladung	Erscheint in
$(\bar{u}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$1/3$	
$(d\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$-2/3$	
$(d\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	0	$2 \cdot \pi^0$
$(d\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$2/3$	
$(u\bar{u}dd)$	$-2/3$	
$(u\bar{u}\bar{u}d)$	-1	π^-, π^0
$(uu\bar{u}\bar{d})$	$1/3$	
$(u\bar{u}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$2/3$	
$(u\bar{u}\bar{u}\bar{d})$	$-1/3$	
$(uu\bar{u}\bar{\bar{d}})$	1	π^+, π^0
$(u\bar{d}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	1	π^+, π^0
$(udd\bar{\bar{d}})$	$1/3$	
$(uudd)$	$4/3$	
$(\bar{u}\bar{u}d\bar{\bar{d}})$	$-4/3$	
$(\bar{u}d\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	-1	π^-, π^0
$(\bar{u}\bar{d}\bar{\bar{d}}\bar{\bar{d}})$	$-1/3$	
$(u\bar{u}d\bar{\bar{d}})$	0	π^+, π^-

Legende: $(u\bar{d}) \triangleq \pi^+ \quad (\bar{u}d) \triangleq \pi^- \quad (u\bar{u}) \triangleq \pi^0 \quad (d\bar{d}) \triangleq \pi^0$

Bei höheren Energien gibt es angeregte Zustände der π -Mesonen, die ρ -Mesonen. Sie haben dieselbe Quarkzusammensetzungen, weisen aber eine höhere Masse auf.

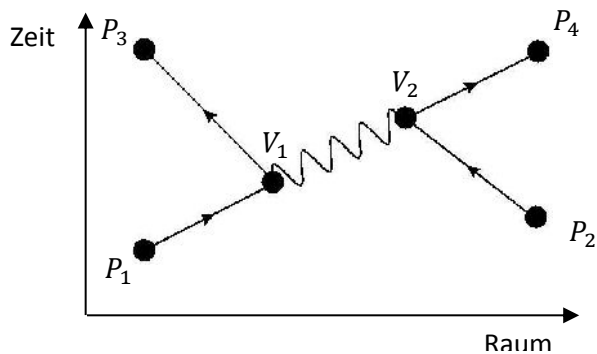
¹ Aus der Kombinatorik: Mit Wiederholung / Ohne Reihenfolge: $\binom{n+k-1}{k}$

Feynman-Diagramme

In der Teilchenphysik werden Prozesse mithilfe von Feynman-Diagrammen dargestellt. Aus diesen Diagrammen kann man die Wahrscheinlichkeit für einen möglichen Prozess rechnerisch bestimmen.

Siehe dazu folgendes Beispiel:

Die geladenen Teilchen sollen im Folgenden immer Elektronen sein.



- P_i : Ort-Zeit-Punkt eines Teilchens
- V_i : Wechselwirkungspunkt (geladenes Teilchen sendet Austauschteilchen aus)
- $\rightarrow$: Teilchenbewegung
- $\sim$: Bewegung Austauschteilchen (hier Photon)

Bestimmung der Wahrscheinlichkeit

In Textform

Ein Elektron bewegt sich von P_1 nach V_1 und
 ein Photon wird emittiert und
 ein Photon bewegt sich von V_1 nach V_2 und
 ein Elektron bewegt sich von V_1 nach P_3 und
 ein Elektron bewegt sich von P_2 nach V_2 und
 ein Photon wird absorbiert und
 ein Elektron bewegt sich von V_2 nach P_4

mathematisch

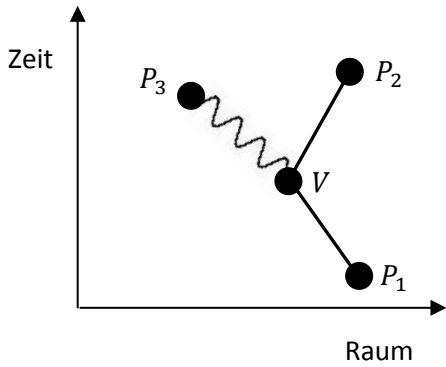
$E(P_1, V_1)$ ·
 $\sqrt{\alpha}$ ·
 $P(V_1, V_2)$ ·
 $E(V_1, P_3)$ ·
 $E(P_2, V_2)$ ·
 $\sqrt{\alpha}$ ·
 $E(V_2, P_4)$

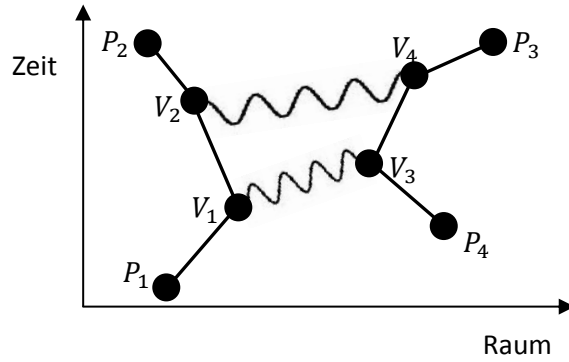
Dies ergibt mathematisch die Gesamtwahrscheinlichkeit:

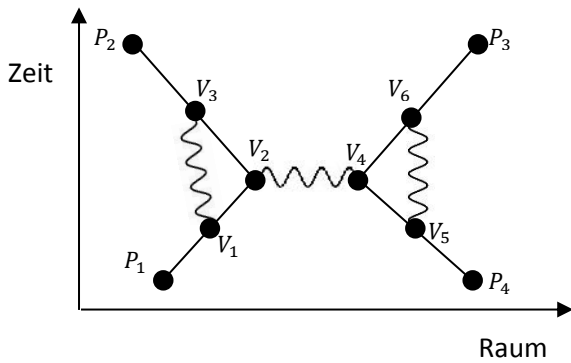
$$W_{Ges} = E(P_1, V_1) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot P(V_1, V_2) \cdot E(V_1, P_3) \cdot E(P_2, V_2) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot E(V_2, P_4)$$

Aufgabe 1:

Schaue dir folgende Feynman-Diagramme an und gebe die Gesamtwahrscheinlichkeit des Prozesses an:







Aufgabe 2:

Gebe zu folgenden Gesamtwahrscheinlichkeiten ein mögliches Feynman-Diagramm an.



$$W_{ges} = E(P_1, P_2) \cdot E(P_2, V) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot P(V, P_4) \cdot E(V, P_3)$$



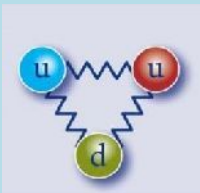
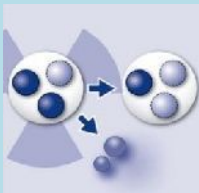
$$W_{ges} = E(P_1, V_1) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot P(V_1, V_2) \cdot E(V_1, V_3) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot P(V_3, P_4) \\ \cdot E(V_3, V_2) \cdot \sqrt{\alpha} \cdot E(V_3, P_2)$$

Die vier Wechselwirkungen: Was die Welt zusammenhält

Aufgabe 1: Welche der vier Wechselwirkungen spielt für die beschriebenen Vorgänge jeweils die Hauptrolle? Erkläre, falls mehrere Wechselwirkungen im Spiel sind.

a) Ein Glas fällt vom Tisch.	f) Eine Kompassnadel richtet sich nach Norden aus.
b) Du telefonierst mit deinem Handy.	g) Zwei Atome gehen eine chemische Bindung ein.
c) Ein Atomkern wandelt sich durch einen β^- -Zerfall in einen anderen um.	h) Die Erde kreist um die Sonne.
d) Dein Gehirn schickt einen Nervenimpuls zu einem Muskel.	i) Drei Quarks bilden ein Proton oder ein Neutron.
e) Viele Atomkerne sind stabil.	j) In der Sonne verschmelzen vier Protonen zu einem Heliumkern (Kernfusion).

Aufgabe 2: Was bewirken die vier Wechselwirkungen und welche Eigenschaften haben sie? Fülle dazu die Tabelle aus.

				
	Starke Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung	Gravitations Wechselwirkung
Betroffene Teilchen				
Zugehörige Ladung				
Austauschteilchen				
Masse der Austauschteilchen				
Reichweite				
Kopplungskonstante				
Wirkungen				

Aufgabe 3: *Beantworte folgende Fragenstellungen.*

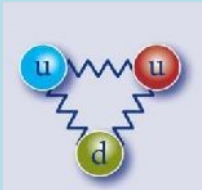
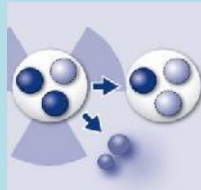
1. Welche Wechselwirkungen spüren wir direkt im Alltag, welche nicht? Warum?
2. Welche Wechselwirkung ist in Atomkernen stärker: Die elektromagnetische oder die starke Wechselwirkung? Begründe deine Antwort.
3. Wie groß ist das Verhältnis zwischen der elektromagnetischen Anziehungskraft (Coulombkraft) zwischen zwei Elektronen und der Gravitationskraft, die sie aufeinander ausüben?
4. Was unterscheidet die Gravitation von den anderen Wechselwirkungen?
5. Warum können wir nicht durch feste Gegenstände hindurchgreifen?
6. Beim Beta-Minus-Zerfall wandelt sich ein Neutron in ein Proton um, wobei ein Elektron und ein Antineutrino entstehen. Warum ist das Antineutrino notwendig?

Aufgabe 1:

a) Gravitation	b) Elektromagnetische Wechselwirkung
c) Schwache Wechselwirkung	d) Elektromagnetische Wechselwirkung
e) Starke Wechselwirkung	f) Elektromagnetische Wechselwirkung
g) Elektromagnetische Wechselwirkung	h) Gravitation
i) Starke Wechselwirkung	
j) Alle Vier	

Erklärung: Durch die Gravitation werden die Teilchen im Inneren der Sonne sehr stark zusammengepresst. Der extreme Druck und die hohe Temperatur sind notwendig, um die Kernfusion zu ermöglichen: Die Energie der Protonen muss hoch genug sein, damit sie ihre elektromagnetische Abstoßung überwinden können. Erst wenn die Protonen sich näher als etwa $10^{-15}m$ kommen, überwiegt die starke Wechselwirkung und hält sie zusammen. Ein Atomkern aus vier Protonen wäre allerdings nicht stabil. Um einen stabilen Heliumkern zu bilden, müssen sich zwei Protonen jeweils in ein Neutron umwandeln (indem sich jeweils ein Up-Quark in ein Down-Quark umwandelt). Das ermöglicht die schwache Wechselwirkung.

Aufgabe 2:

				
	Starke Wechselwirkung	Elektromagnetische Wechselwirkung	Schwache Wechselwirkung	Gravitationswechselwirkung
Betroffene Teilchen	Quarks	Quarks und elektr. geladene Leptonen	Alle	Alle
Zugehörige Ladung	Starke Ladung (Farbladung)	Elektrische Ladung	Schwache Ladung	Masse
Austauschteilchen	8 Gluonen	Photon	W^+, W^-, Z^0	(Graviton)
Masse der Austauschteilchen	0	0	$m_{W^\pm} \approx 80,4 \frac{GeV}{c^2}$ $m_{Z^0} \approx 91,2 \frac{GeV}{c^2}$	0
Reichweite	$10^{-15}m$ (Protonendurchmesser)	∞	$10^{-18}m$ Ein Tausendstel des Protonendurchmessers	∞
Kopplungskonstante	$\alpha_s \approx 0,1 - 1$	$\alpha_{em} \approx \frac{1}{137}$	$\alpha_{sch} \approx 10^{-14}$	$\alpha_G \approx 10^{-40}$
Wirkungen	Anziehung zwischen Quarks, Zusammenhalt von Atomkernen	Licht, Strom, Magnetismus, Zusammenhalt von Atomen	Betazerfall, Kernfusion	Anziehung zwischen Massen, Schwerkraft, Umlauf von Planeten um die Sonne

Aufgabe 3:

- zu 1. Die Reichweiten der Gravitation und der elektromagnetischen Wechselwirkung sind prinzipiell unbegrenzt. Daher spielen sie für makroskopische Objekte eine Rolle, so dass wir sie direkt spüren.

Die starke und die schwache Wechselwirkung spüren wir nicht direkt, da ihre Reichweiten zu gering sind. Jedoch spielen sie trotzdem eine lebenswichtige Rolle: Die starke Wechselwirkung sorgt dafür, dass Atomkerne stabil sein können; die schwache Wechselwirkung ermöglicht unter anderem die Kernfusion, mit der die Sonne ihre Energie erzeugt – ohne sie gäbe es kein Leben auf der Erde.

- zu 2. Die anziehende Kraft zwischen Protonen, welche von der starken Wechselwirkung erzeugt wird, muss deutlich stärker sein als die elektromagnetische Abstoßung zwischen ihnen – sonst könnten sich keine stabilen Atomkerne bilden.

Dieser Vergleich gilt allerdings nur bei Teilchenabständen, die in der Größenordnung eines Protonendurchmessers liegen. Bei größeren Abständen fällt die Kraftwirkung der starken Wechselwirkung deutlich ab, bis sie ab etwa 10-15 m keine Rolle mehr spielt.

- zu 3. Die Gravitationskraft zwischen zwei Massen lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Die Coulombkraft zwischen zwei elektrischen Ladungen ist gegeben durch:

$$F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Berechnet man das Verhältnis der zwei Kräfte, fällt der Abstand r weg:

$$\frac{F_C}{F_G} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 G m_1 m_2} \approx 10^{42}$$

Die elektromagnetische Wechselwirkung ist also sehr viel stärker als die Gravitation. Dies mag zunächst der Intuition widersprechen – schließlich sind die Auswirkungen der Gravitation bzw. Schwerkraft für uns meist offensichtlicher als diejenigen der elektromagnetischen Wechselwirkung. Doch letztere spielt für uns eine mindestens ebenso lebenswichtige Rolle, da sie unter anderem für den Zusammenhalt von Atomen und Molekülen verantwortlich ist.

- zu 4. Die Gravitation passt nicht ins Standardmodell der Teilchenphysik, sondern wird durch die Allgemeine Relativitätstheorie beschrieben. Insbesondere wurden noch keine Austauschteilchen experimentell nachgewiesen. Weiterhin ist die Gravitation um viele Größenordnungen schwächer als die elektromagnetische Wechselwirkung.

- zu 5. Die elektromagnetische Abstoßung zwischen den Elektronen der Atomhüllen verhindert, dass sich Atome zu nahe kommen. Hinzu kommt das Pauli-Prinzip, das besagt, dass sich zwei Elektronen innerhalb eines Atoms nicht im gleichen Zustand befinden können. Deswegen können sich gefüllte Orbitale nicht überlappen.

- zu 6. Der Grund ist die Leptonenzahlerhaltung oder auch die Ladungserhaltung der elektrischen, starken und schwachen Ladung.

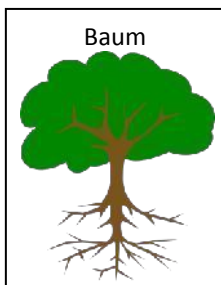
A.5. Allgemeines

Analogie - Theorien und ihre Konzepte am Beispiel Baum

Es gibt viele unterschiedliche Konzepte, mit denen man ein Phänomen behandeln kann. Wir haben bspw. gelernt, dass man die Gravitation mithilfe unterschiedlicher Konzepte beschreiben kann. Mögliche Konzepte sind:

- φ Eine **Kraft** die zwischen zwei Planeten wirkt (Newtons klassisches Gravitationsgesetz).
- φ Ein **Feld** das jeder Planet hervorruft und das auf andere Planeten Wirkung zeigt.
- φ Die **Geometrie** der Raumzeit, die die Planeten auf ihrer Bahn hält.
- φ **Austauschteilchen** (hier das vorhergesagte Graviton), das über Emission und Absorption Anziehung hervorruft.

Jedes dieser Konzepte kann die Theorie der Gravitation aber nicht zugleich einfach, anschaulich, uneingeschränkt und praktisch beschreiben.

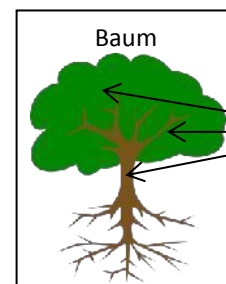


Nun wollen wir uns dazu eine mögliche Analogie genauer betrachten. Unser Naturphänomen soll nun von einem Baum dargestellt werden. Diesen Baum kann man mithilfe unterschiedlicher Konzepte versuchen zu beschreiben.

Mögliche Konzepte wären:

- φ Der Baum kann als Lebensort für Tiere angesehen werden. Vögel nisten auf ihm, Spinnen spannen ihre Netze, Käfer leben geschützt unter der Rinde, Raupen ernähren sich von seinen Blättern usw.

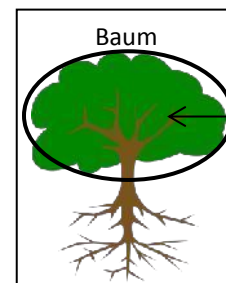
↪ **Lebensraumkonzept**



Lebensraumkonzept

- φ Der Baum kann als Stoffwechselwerk angesehen werden. Er wandelt mithilfe der Photosynthese Kohlenstoffdioxid in Sauerstoff um und erstellt dabei noch für sich Biomasse.

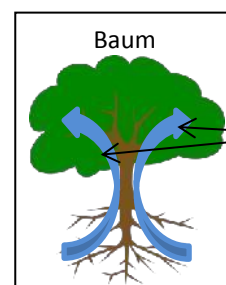
↪ **Stoffwechselkonzept**



Stoffwechselkonzept

- φ Der Baum kann in gewisser Weise als Wasserpumpe angesehen werden. Mithilfe der Kapillarkraft wird das Wasser aus dem Erdboden entgegen der Schwerkraft mehrere Dekameter empor gezogen.

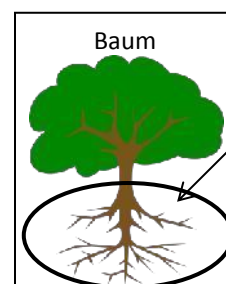
↪ **Transportkonzept**



Transportkonzept

- φ Der Baum kann als Befestigung des Erdbodens angesehen werden. Durch sein großes Wurzelgeflecht mit unterschiedlich dicken Wurzelsträngen hält der Baum die Erde des Waldbodens zusammen. So bleibt selbst bei Starkregen die Erde auf steilen Hängen an Ort und Stelle.

↪ **Stabilisationskonzept**



Stabilisationskonzept

B. Fragebögen zur Evaluation der Wechselwirkungskonzepte

B.1. Kraftkonzept

1. Was verbindest du im alltäglichen Sinne mit dem Begriff Kraft?

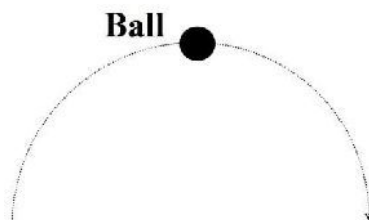
2. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Kraft?

3. Wie hängen deiner Meinung nach Bewegung und Kraft zusammen?

4. Versuche eine Definition der Kraft aufzuschreiben.

5. Wie würdest du die Kraft in einer Formel beschreiben, wovon würde sie abhängen?

6. Ein Ball fliegt die unten dargestellte Kurve entlang. Zeichne alle wirkenden Kräfte mithilfe von Pfeilen ein.



7. Aus der Vogelperspektive siehst du ein Auto durch eine Kurve fahren. Skizziere die Situation und zeichne die wirkenden Kräfte mithilfe von Pfeilen ein.

1. Was verbindest du im alltäglichen Sinne mit dem Begriff Kraft?

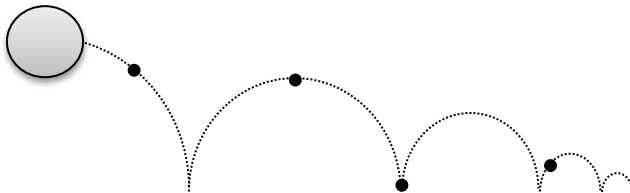
2. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Kraft?

3. Wie hängen deiner Meinung nach Bewegung und Kraft zusammen?

4. Versuche eine Definition der Kraft aufzuschreiben.

5. Wie würdest du die Kraft in einer Formel beschreiben, wovon würde sie abhängen?

6. Ein Ball springt die unten dargestellte Kurve entlang. Zeichne an den Punkten die Geschwindigkeitsrichtung und die wirkenden Kräfte ein.



7. Der schlaue Esel behauptet, dass er wegen der Gültigkeit der Gleichung „Kraft + Gegenkraft = 0“ ($\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$) den Wagen nicht ziehen könnte. Nimm Stellung.



8. Aristoteles hatte folgende Gleichung für die Kraft aufgestellt: $F = \frac{m \cdot v}{R}$, wobei R für die Reibung steht. Nenne Beispiele mit Begründung, warum diese Gleichung nicht gültig sein kann.

B.2. Feldkonzept

1. Was verbindest du im alltäglichen Sinne mit dem Begriff Feld?

2. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Feld?

3. Was erzeugt deiner Meinung nach ein Feld?

4. Was hat deiner Meinung nach der physikalische Kraftbegriff F mit dem Feldbegriff zu tun?

5. Versuche eine Definition des Feldes aufzuschreiben.

6. Kann man ein Feld mithilfe einer Formel beschreiben? Wenn ja, wie würde dies deiner Meinung nach erfolgen?

7. Skizziere sowohl bei dem Magneten als auch bei der elektrisch geladenen Kugel das Feld und klassifiziere es.



1. Was verbindest du im physikalischen Sinne mit dem Begriff Feld?

2. Was erzeugt deiner Meinung nach ein Feld?

3. Was hat deiner Meinung nach die physikalische Kraft F mit dem Feldbegriff zu tun?

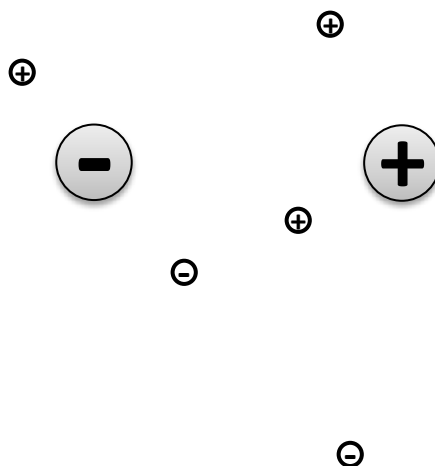
4. Schreibe eine Definition des physikalischen Feldes auf.

5. Kann man ein Feld mithilfe einer Formel darstellen? Wenn ja, wie würde es deiner Meinung nach aussehen?

6. Felder veranschaulichen wir mithilfe von Feldlinien: Erkläre:
Warum dürfen Feldlinien sich nicht schneiden?

Warum gibt es keine geschlossenen elektrischen Feldlinien?

7. Skizziere jeweils die Kraftrichtung und deren Betrag, die auf die kleinen Probeladungen wirken.



C. Verlaufspläne der Unterrichtsstunden

C.1. Kraftkonzept

1. Stunde: Schülervorstellungen

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Einführung	L. nennt kurz die neue zu untersuchende, physikalische Größe und teilt ein Blatt mit Fragen zum Kraftbegriff aus.	KU LB AB	SuS sollen im Lernkontext ankommen.
3	Problemfindung	Die SuS bearbeiten das Arbeitsblatt mit Hilfe der Think-Pair-Share-Methode. In der Share-Phase werden mögliche Definitionen festgehalten.	EA / PA / oUG Arbeit am Material Tafel	An dieser Stelle werden die SuS auf mehrere Probleme stoßen. - Die Schwierigkeit einer eigenen alltags- und physikalische Kraftdefinition. - In der Pair-Phase höchstwahrscheinlich weitere neue Aspekte erfahren. - In der Share-Phase kann es zu einer Flut an Interpretationen kommen. Dabei eigene und andere hinterfragen, ablehnen oder verbessern.
4	Divergierendes Denken	L. und SuS betrachten die notierten Definitionen. L. regt zur Diskussion an; welche Definitionen schließen sich gegenseitig aus? Gibt es aus dem Alltag mögliche Gegenbeispiele zu manchen Definitionen? ...	KU oUG	Hierbei ist es wichtig, dass die SuS möglichst miteinander diskutieren und der L. sich etwas zurück hält. SuS sollen nicht das Gefühl von vorgefertigtem Wissen haben. L. schreitet deshalb notfalls nur mit Anregungen (Alltagsgegenbeispiel) ein → SuS sollen selber die Probleme herausfinden.
5	Bewusstmachung des Lernstandes, Gesamtzusammenfassung	Die richtigen, möglichen, herausgefundenen Definitionen werden nochmals an der Tafel zur Verdeutlichung notiert.	KU LB o. SB Tafel	Hierbei sollen möglichst die Formulierungen der SuS beibehalten werden. Somit werden die Arbeit und das Ergebnis der SuS gewürdigt.
6	Reflexion	Rückblick auf die Stunde	KU SB	Den SuS soll hierbei nochmals der Lernprozess vor Augen geführt werden und damit Sorge getragen werden, dass mögliche falsche Schülervorstellungen verringert wurden.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

2. Stunde: Ideen des Aristoteles

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation	Wiederholung des thematischen Zusammenhangs aus der letzten Stunde.	KU oUG	Das Wissen aus der letzten Stunde muss wieder präsent sein, damit die SuS die später folgenden Probleme erkennen können.
3	Motivation durch Konfrontation mit neuem Sachverhalt	L. teilt Lesetext zu Aristoteles Gedankengänge zur Beschreibung der Kraft aus. SuS bearbeiten die Fragen zum Text.	EA sSA AB	Motivation durch Historie. Die SuS erfahren, wie sich die Menschen vor rund 2000 Jahren versucht haben einen Kraftbegriff rein qualitativ vorzustellen (Formeln, wie wir sie heute kennen, gab es noch nicht (Naturphilosophie)).
4	Problemlösung	SuS sollen in GA versuchen Aristoteles Kraftbegriff in eine Formel zu fassen und anhand dessen, mit ihrem bisherigen Wissen, mögliche Schwierigkeiten in Aristoteles Ansichten finden und diskutieren.	GA sSA	An dieser Stelle haben die SuS die Möglichkeit einer Rückinterpretation von Formeln. SuS fällt es immer schwer Formeln zu deuten (bspw. was passiert mit a, wenn ich b verdopple?). Hier haben sie nun die Möglichkeit eines rückwärtigen Vorgangs. Dadurch wird die Kompetenz der Formelinterpretation weiter ausgebaut und vertieft.
5	Problemlösung durch Gedankenexperiment	L. gibt Impuls durch Aristoteles Gedankenexperiment des Treidelns. Bewusstmachung der fehlenden Reibung in der bisherigen Ansicht Aristoteles. Verbesserung der Formel zum „Grundgesetz der aristotelischen Bewegungslehre“.	KU LB / oUG	Die physikalische Methode des Gedankenexperiments wird weiter vertieft. Nochmaliges Aufgreifen der Rückinterpretation von Formeln. Die Kompetenz wird somit nochmals gestärkt.
6	Sicherung	Die an der Tafel festgehaltene neue Formel wird qualitativ nochmals untersucht, ob sie den Ansprüchen der Reibung genügt.	KU LB	Die Formelinterpretation wird nochmals aufgegriffen um ihren Nutzen weiter hervorzuheben.
7	Reflexion	Wiederholung des Neugelehrten durch SuS.	KU SB	Eine Reflexion ist wichtig, damit die SuS das Neugelehrte in ihren Lernprozess einordnen können.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

3. Stunde: Schwächen des Aristotelischen Grundgesetzes

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation	Rückblick auf die letzte Stunde. Grundgesetz von Aristoteles an der Tafel notieren.	KU LB	Die SuS müssen im Lernkontext ankommen, um die weiteren Aufgaben bewältigen zu können.
3	Problemfindung durch Experimente	L. teilt den Kurs in Gruppen nach der Methode des Expertenpuzzles ein. Jede Gruppe untersucht unterschiedliche (Gedanken)-Experimente. Darunter - <i>Bewegung im luftleeren Raum</i> (Lsg: $W \rightarrow 0 \Rightarrow v \rightarrow \infty$) - <i>Wurfbewegung</i> (Lsg. Kraft müsste der Kugel mitgegeben werden) - <i>Ausrollende Kugel</i> (Lsg. Ende der schiefen Ebene $F = 0 \Rightarrow 0 = m \cdot v \cdot W \Leftrightarrow v = 0$) Diskussion in den Gruppen. (Phase 1 EP)	GA sExp Material	zu 1) Die SuS üben nochmals das Arbeiten an Gedankenexperimenten. zu 2) Die SuS sollen das Problem des fehlenden Bewegers bei Wurfbewegungen erkennen. Entwicklung einer Impetusvorstellung? zu 3) Die SuS sollen das Problem anhand einer Formelbeurteilung erkennen. Stärkung der Formelinterpretation. L. geht herum und gibt im Rahmen der individuellen Förderung passende Impulse.
4	Vertiefung durch Erläuterung	SuS gehen in die Expertengruppen und teilen ihre Erkenntnisse den anderen SuS ihrer Gruppe jeweils mit. (Phase 2 Expertenpuzzles)	GA	Durch die Erklärung des Problems eines Unwissenden wird das eigene Wissen weiter vertieft und vor allem gefestigt.
5	Sicherung	Jeweils ein Experte verdeutlicht das Ergebnis seiner Gruppe an der Tafel. Begriffslose Herausstellung des Trägheitsprinzips	KU SB Tafel	Durch das eigenständige Vorstellen wird das Ergebnis der Schülerarbeit gewürdigt. In der 2. Phase des Expertenpuzzles könnten die Erkenntnisse in einzelnen Gruppen bei der Erklärung weiter vertieft worden sein, somit wird an dieser Stelle sichergestellt, dass alle SuS die neuste Sichtweise erhalten.
6	Reflexion	Wiederholung des Neugelehrten durch SuS	KU SB	Eine Reflexion ist wichtig, damit die SuS das Neugelehrte in ihren Lernprozess einordnen können.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

4/5. Stunde: Descartes vs. Leibniz

Nr.	Unterrichts- schritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation	Rückblick auf die letzte Stunde.	KU oUG	Die SuS müssen im Lernkontext ankommen, um die Problemstellung zu erkennen.
3	Einschub (optional)	Aufgreifen des Aristotelischen Wurfproblems Die mittelalterliche Lösung mittels der Impetustheorie.	KU oUG	Das Aristotelische Wurfproblem hing bisher immer noch unbeantwortet in der Luft, welches demotivierend auf einige SuS wirken kann. Dieser Einschub ist, bei genügend vorhandener Zeit, sinnvoll, da die Impetus-Theorie lange Zeit das Weltbild geprägt hat.
4	Motivation	L. gibt Impuls, dass immer noch keine physikalische Beziehung der Kraft gefunden wurde.	KU LB	Es wird immer und überall von Kräften geredet und auch anscheinend mit ihnen gerechnet. Dies ist den SuS aber immer noch nicht möglich, welches zu einer Motivation der Auffindung führt.
5	Historische Erarbeitung	SuS werden in 2 Gruppen aufgeteilt. - Gruppe 1 erhält einen Text zu der Vorstellung Descartes, der den Kraftbegriff in der Beziehung $F = m \cdot v$ vermutet. - Gruppe 2 erhält einen Text zu der Vorstellung Leibniz, der den Kraftbegriff in der Beziehung $F = m \cdot v^2$ liegen sieht. In jeder Gruppe wird zudem die Placemate-Methode angewandt. Jede Gruppe soll Vor- und Nachteile herausarbeiten. Danach erhalten sie vom L. jeweils die historischen Gegenbeispiele. - Descartes Problem beim freien Fall - Leibniz Problem bei Stoßexperimenten Anschließend sollen sie im Rahmen eines Exper-	EA / PA /GA Placemate und Experten-Puzzle Plakat	SuS werden möglicherweise ihre eigenen falschen Präkonzepte in den jeweiligen historischen Annahmen finden. Somit sehen sie sich erst im Recht, da die damaligen Wissenschaftler ihre Vorstellung teilten (motivierend, Stärkung des Selbstbewusstseins). In der folgenden Phase tauschen sie sich mit anderen aus. Sehen andere Vorstellungen, erleben ein Für und Wider. Nun bekommen sie handfeste Gegenbeispiele zu den/ihren möglichen falschen Vorstellung. Die Misskonzepte bröckeln. Manchen wird ggf. an dieser Stelle ihr Misskonzept mit Schwächen aufgezeigt.

		ten-Puzzle, den jeweilig anderen Gruppen ihre Theorie mit den daraus folgenden Problemen vorstellen.		Bei der eigenen Erklärung wird ihr Wissen nochmals vertieft und gefestigt.
6	Sicherung	Ergebnisse werden nochmals an der Tafel festgehalten. Verdeutlichung, dass die Beziehungen nicht stimmen können.	KU oUG Tafel	Hier wird sichergestellt, dass am Ende alle dasselbe Ergebnis ins Heft übernehmen können. Alle sollen auf dem gleichen Stand sein. Nach Möglichkeit sollen Formulierungen der SuS übernommen werden (Würdigung der Ergebnisse). Es muss sichergestellt werden, dass die SuS ihre möglichen falschen Vorstellungen erkennen und verwerfen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

6/7. Stunde: Heute bin ich aber träge – Das Trägheitsprinzip und seine Folgen.

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Problemfindung	L. stößt ein sehr gut gelagertes und ein normal gelagertes Rad an. (Ggf. hat man die Möglichkeit ein Rad unter eine Vakuumglaslocke zu platzieren, um den Effekt noch zu verstärken) L. verweist darauf, dass man bisher eine Bewegung immer als Prozess angesehen hat. Was könnte uns dieses Experiment sagen? Verweis auf ein mögliches Gedankenexperiment.	KU entG DE	SuS kommen schnell von alleine auf die Beziehung zwischen der Reibung und der Zeitdauer des Ausdrehens. Vom Gegenständlichen zum Ikonischen. SuS sollen selber ein mögliches Gedankenexperiment erarbeiten (Versuch bei Reibungslosigkeit).
3	Problemformulierung und Lösung	Eine gleichförmige Bewegung kann kein Prozess sein, sie muss ein Zustand sein. Folgerung: Keine Kraft zur Aufrechterhaltung von Bewegungen nötig.	KU oUG	Da die Thermodynamik, mit ihren Begriffen, höchstwahrscheinlich noch nicht bearbeitet wurde, muss hierbei unbedingt auf die Begriffe Prozess und Zustand eingegangen werden. Damit ein fachlich adäquates UG gewährleistet ist und es zu keinen Verständnisproblemen kommt.
4	Sicherung 1	Das Trägheitsprinzip wird an der Tafel notiert. Inertialsystem wird definiert.	KU LB/SB Tafel	SuS brauchen einen knackigen Merksatz um ihre neuen Erkenntnisse längerfristig zu verinnerlichen.
5	Vertiefung des bisher Gelernten	L. skizziert das Gedankenexperiment der „ausrollenden Kugel“ von Galilei. Anschließend wird das Experiment real gezeigt und auf den Einfluss der Reibung eingegangen. Drei weitere Experimente werden gezeigt: - Kugel auf Wagen (Wagen fährt in eine Kurve, wobei die Kugel gerade vom Wagen rollt) - Trägheitsprinzip beim langsamen und schnellen	KU LB/SB Tafel/DE	Im historischen Kontext bleiben und eine Stärkung der Gedankenexperimente bei den SuS vollführen. Die Deutung der Versuche soll von den SuS zu Hause (alleine) beschrieben werden. Durch eine Auseinandersetzung ohne Mitschüler wird das Gelernte nochmals vertieft.

		len ziehen eines Fadens an dem in der Mitte ein Gewicht angebracht ist - Zwei Eier werden unter die Enden eines dünnen Holzstabs gelegt. Beim schnellen Schlagen zerbricht der Holzstab, ohne die Eier zu beschädigen.			
6	Problemweiterführung	L. stellt folgenden Versuch vor: <i>Schüler sitzt auf Experimentierwagen, hat einen Glaskasten vor sich und wird gleichförmig vorwärts gerollt. Während der Fahrt lässt er eine Kugel in dem Glaskasten fallen (damit die Kugel keinen Luftwiderstand erfährt).</i> Nichtbeteiligte SuS stellen sich parallel zur Bewegungsrichtung auf und beobachten.	SA sExp Material		Dadurch, dass die SuS auf den Flur gehen müssen und alle angehalten sind den Versuch zu verfolgen entsteht bei den Nichtbeteiligten ein gewisses Maß an Schüleraktivierung. Beteiligte SuS (S. auf Wagen, S. der schiebt) sind voll aktiviert und haben wahrscheinlich viel Spaß an der Sache. Um mehrere SuS einzubinden hat man die Möglichkeit, je nach Zeitkontingenz, die Fahrt mehrmals mit jeweils anderen SuS durchzuführen.
7	Divergierendes Denken	Diskussion über das Gesehene Erstellen einer Verbindung zwischen Trägheitssatz und dem Gesehenen. Lernprodukt: Das Relativitätsprinzip	KU oUG		Schwierige Verknüpfung. Auf das Lernprodukt werden wahrscheinlich nur leistungsstarke SuS alleine kommen.
8	Sicherung 2	Das Relativitätsprinzip wird an der Tafel notiert.	KU LB/SB Tafel		

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

8. Stunde: Kraftwirkung bei Geschwindigkeitsänderung! – Ausnutzung des Relativitätsprinzips zur Auffindung einer möglichen Kraftdefinition.

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation	Wiederholung des Trägheitsprinzips und des Relativitätsprinzips.	KU SB	Ankommen im Lernkontext.
3	Lösungsversuch zur Kraftdefinition	SuS wissen, dass die Kraft mit der Masse zusammenhängen muss, zudem wissen sie, dass die Geschwindigkeit (ob linear oder quadratisch) keinen Einfluss hat. Diskussion über eine Wirkung bei Geschwindigkeitsänderung (Beschleunigung/Verzögerung) Ergebnis: $F = m \cdot a$?	KU oUG	Klassisches Unterrichtsgespräch, um in einer angemessenen Zeit eine „neue“, mögliche Kraftdefinition zu erhalten.
4	Verifikation des Vermutetem	Versuch mit Luftkissenfahrbahn: <i>Auf der Luftkissenfahrbahn werden unterschiedliche Gleiter (Δm) durch unterschiedliche Antriebskörper (Δm) beschleunigt. Wobei bei wechselnden Antriebskörpern, die Gesamtmasse des Systems konstant bleibt.</i> Vor der Durchführung wird über die Begriffe „träge und schwere Masse“ gesprochen.	GA sSA Luftkissenfahrbahn / AB	Der Versuch wird „offen“ ausgeführt, d.h. die SuS bekommen das Material (Luftkissenfahrbahn, unterschiedliche Massen, Beschleunigungssensor (bspw. Cassy)) gestellt und sollen damit selbstständig auf eine mögliche Überprüfung kommen. Damit wird eine hohe Schüleraktivität gewährleistet. Zudem wird das Selbstbewusstsein der SuS bei erfolgreichem Arbeiten im physikalischen Denken gestärkt.
5	Auswertung	Zeichnung und Interpretation von a - F -Diagrammen.	EA sSA	Zeichnung und Interpretation in EA, damit gewährleistet ist, dass alle den Sachverhalt zu interpretieren vermögen.
6	Sicherung	S. stellt dem Kurs das Ergebnis (Diagramm) an der Tafel vor.	KU SB Tafel	

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

9/10. Stunde: Wechselwirkung?! – Eine Untersuchung zu Newtons drittem Axiom

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Wiederholung des bisher Gelernten	Der gefundene Kraft-Begriff wird nochmals wiederholt. Dabei wird mithilfe der HA auf die Begriffe Axiom, Gesetz und Prinzip eingegangen und gemeinsam überlegt, warum $F = m \cdot a$ ein Axiom ist.	KU LB	Die SuS werden auf das Zustandekommen wissenschaftlicher Theorien aufmerksam gemacht.
3	Motivationsexperiment	Auf dem Flur. Zwei gleichschwere SuS sitzen sich auf gut „rollbarem“ Experimentierwagen gegenüber und halten ein Seil zwischen sich. Nun werden unterschiedliche Szenarien durchgeführt (Beide ziehen, beide ziehen unterschiedlich stark, nur einer zieht...). Nicht beteiligte SuS beobachten.	KU sExp/DE Wagen/Seil	Aktivierung der SuS durch Methodenwechsel. Motivationssteigerung durch ein Experiment außerhalb des Physikraums. Falls keine gut gelagerten Wagen zur Verfügung stehen, müssen zwei benutzt werden, die gleich „schlecht“ zu rollen sind.
4	Diskussion des Ergebnisses	SuS sollen Mutmaßungen darüber anstellen, warum sich die Wagen immer in der Mitte treffen. Vorformulierung vom <i>actio=reactio-Prinzip</i>	KU oUG	
5	Motivationsexperiment II	Eben gemachtes Experiment wird nochmals mit SuS durchgeführt, die augenscheinlich sehr unterschiedlich viel wiegen.	KU sExp/DE Wagen/Seil	Falls Phase 2 und 3 gut geklappt haben und man einen leistungsstarken Kurs hat, kann hier festgestellt werden, dass sich die zurückgelegten Wege annähernd umgekehrt zu den Massen verhalten.
6	Sicherung	Zurück im Kursraum wird gemeinsam das <i>actio=reactio-Prinzip</i> (Wechselwirkungskraft) an der Tafel notiert. (Mit dem hervorgehobenen Zusatz, dass die Kräfte nicht am gleichen Körper angreifen!) Qualitative Vermutung wird mit zwei Kraftmessern bestätigt. ⇒ Wiederholender Eingang auf Axiom, Prinzip, Gesetz.	KU Stiller Impuls Tafel	Hier können sehr schülernahe Formulierungen genutzt werden. Die kurze prägnante wissenschaftliche Formulierung kann notiert werden, wenn alle 3 Newton'schen Axiome zu Beginn der nächsten Stunde nochmals wiederholend angeschrieben werden.

7	Verifizierung	L. verweist auf die vielfältigen Gerätschaften auf dem Pult. Dazu werden Federkraftmesser angeboten. <i>Die SuS bilden Gruppen und sollen eigene Versuche zum actio=reactio-Prinzip entwickeln und durchführen.</i>	GA SExp Diverse experimentier Gerätschaften	Die Fülle an Möglichkeiten und der relativ freie Arbeitsauftrag soll eine hohe Schüleraktivierung hervorrufen.
8	Präsentation der Ergebnisse (Sicherungsphase)	Die Gruppen stellen ihre jeweiligen Ergebnisse dem Kurs vor. L. verweist nochmals auf den Begriff der Wechselwirkung von Körpern mittels Kräften.	KU SB Experiment	Stärkung der Präsentationskompetenz der SuS. Zudem werden durch eine eigenständige Vorstellung, in einem gewissen zeitlichen Rahmen, die Ergebnisse der Gruppenarbeitsphase gewürdigt.
9	Reflexion	Antworten suchen auf Fragen wie: Wie fandet ihr diese freie Aufgabenstellung? Wie seid ihr zurecht gekommen? Welche Probleme tauchten auf? Etc.	KU oUG	Der L. holt sich Feedback zum freien Experimentieren, um diese Methode ggf. stärker im Unterricht einzubauen.
10	Vertiefung	L. stellt eine Übungsaufgabe zum drittem Newton'schen Axiom.	KU sSA	Vom Bildlichen zum Symbolischen Die SuS vertiefen ihren neuen Erkenntnisse, in dem sie das Gelernte auf symbolischer Ebene anwenden.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

11. Stunde: Wer hat's erfunden? – Newton und seine Axiome

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS und Festlegung einer Protokollantin bzw. eines Protokollanten	KU LB	Bietet einem/r SuS die Möglichkeit die Note aufzubessern. Zudem eignet sich das Protokoll später gut zur Ergebnissicherung
2	Reorganisation, Erarbeitung und Festigung	Schülerin oder Schüler hält ein Referat über Isaac Newton und fixiert die ersten beiden Newton'schen Axiome an der Tafel.	KU SB Laptop/Beamer	Einerseits erhält hierdurch ein/e SuS die Chance einer Notenaufbesserung durch ein Referat, andererseits erfahren die SuS von welchem Format der Naturwissenschaftler war, der es schaffte diese Axiome aufzustellen. Stärkung des Schüler-Ich's, da diese, zwar angeleitet, aber auch auf diese Ergebnisse gekommen sind. Des Weiteren werden hierdurch die vorherigen Erkenntnisse der Unterrichtsreihe nochmals gefestigt.
3	Kurze Diskussion der Ergebnisse	Was sagen uns die Axiome? Wann wirken Kräfte? Woran kann ich Kräfte erkennen? Was geht mit einer Beschleunigung immer einher, bzw. mit einer Kraft?	KU oUG Durch die Diskussion sich ergebene Handexperimente	Die SuS müssen darüber diskutieren, was die einfach wirkende Formel $F = m \cdot a$ aussagt, für unser naturwissenschaftliches Weltverständnis. Je nachdem müssen etwaige Vermutungen oder Unklarheiten anhand von kleinen Demonstrationsexperimenten besprochen/gezeigt werden.
4	Vertiefung	Zur Vertiefung von Newton III werden je nach Interessenschwerpunkt Beispielsrechnungen durchgeführt. - Küssen im Weltraum - Apfel-Erde-Wechselwirkung - etc.	KU oUG Tafel	Im Unterricht hat sich gezeigt, dass bei vielen SuS das Verständnis durch handfeste Beispielsrechnung erheblich wächst.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

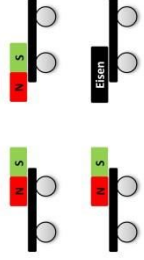
12. Stunde: Üben, üben, üben

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation	SoS wiederholen die Erkenntnisse aus der letzten Stunde.	KU SB	Für die folgenden Aufgaben muss gewährleistet sein, dass alle SuS auf dem aktuellen Stand der Wissenslage sind.
3	Vertiefung der Erkenntnisse	- Relativ homogene Lerngruppe - o Einfaches Aufgabenlösen in EA/PA - o Lösen von Aufgaben mit gestuften Lernhilfen - o Methode des Lerntempoduetts - o ... - Heterogene Lerngruppe - o Binnendifferenzierte Aufgaben mit gestuften Lernhilfen - o Lösen von Aufgaben in Gruppenarbeit (heterogen oder homogen mit den dazugehörigen Aufgabentypen) - o ...	EA/PA/GA sSA Arbeitsblatt	An dieser Stelle kann sehr gut auf das Leistungsvermögen der Lerngruppe eingegangen werden. Es gibt ein großes Methodenrepertoire, was hier adaptiv angesetzt werden kann, um allen SuS ihren individuellen Bedürfnissen gerecht zu werden.
4	Sicherung	L. teilt Musterlösungen aus, die die SuS selbstständig zu Hause mit ihren Ergebnissen vergleichen sollen.		Die SuS sollen in ihrem selbstständigen Arbeiten gestärkt werden. Hier sollen sie lernen sich selbst zu kontrollieren, ihre eigenen Fehler zu reflektieren und auszubessern. Das dient zudem der besseren Klausurvorbereitung. Die SuS müssen lernen mit Musterlösungen (die nicht vom L. erklärt werden) zurecht zu kommen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

13/14. Stunde: Was wissen wir? – Wiederholung zur Geschichte des Kraftbegriffs/Kraftkonzeptes und einen abschließenden Transfer in Richtung Feldbegriff

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Wiederholung und Vertiefung	Die SuS hatten die Hausaufgabe die thematischen Inhalte der Unterrichtsreihe nochmal durchzulesen mit dem Arbeitsauftrag: <i>Entwerft ein Plakat mit der Überschrift „Das Kraftkonzept“</i> Die SuS hatten in der letzten Stunde schon Gruppen gebildet und sollten sich in der HA zudem schon Gedanken, um eine mögliche Gestaltung machen. In der Stunde wird nun ein zeitlicher Rahmen zur Verfügung gestellt, das Plakat zu entwerfen.	GA SA Plakate	Der Arbeitsauftrag wurde bewusst nicht weiter eingegrenzt, um den SuS genügend „Bewegungsfreiheit“ zu ermöglichen. Es können Plakate entstehen, die eher historischer, experimenteller oder anderweitiger Natur sind. Zudem wird es interessant sein zu sehen, wie die SuS mit dem Wort „Konzept“ umgegangen sind.
3	Präsentation	Die Präsentation soll mit Hilfe der Methode des Galerieganges erfolgen. Am Ende des Galerieganges werden die Plakate im Physikraum aufgehangen.	GA SB Plakate	Hier sehen die SuS wie die anderen Gruppen den Arbeitsauftrag erfüllt haben und erweitern bei reichhaltigen Ergebnissen ihren Begriffshorizont. Somit erreicht man bei der Präsentation schon eine gewisse Vertiefung der Erkenntnisse. Des Weiteren haben die SuS wiederum die Möglichkeit sicherer in ihrer Präsentationsfähigkeit zu werden. Gerade für schüchterne Personen ist diese Kleingruppenpräsentation, die „druckfreier“ ist, eine Chance sich zu entwickeln. Durch das dauerhafte Aufhängen der Plakate im Physikraum findet die erbrachte Leistung eine angemessene Anerkennung. Zudem kann im weiteren Unterrichtsverlauf immer wieder auf das Kraftkonzept verwiesen werden.
4	Reflexion	Die SuS sollen ihre Arbeit reflektieren	KU SB	

5	Transfer	Der L. skizziert folgende Aufgabe an die Tafel:  Die SuS sollen den Versuch beschreiben, Ergebnisse vorschlagen und deuten. L. gibt Impuls zur Auffindung der möglichen Kraftwirkung		Die SuS werden schnell wieder darauf verweisen, dass sich die Wagen genau in der Mittel treffen werden, wenn beide gleich schwer sind. Die Einschätzungen, wie die Kraftwirkung über Luft geschiebt sind sehr abhängig von den Vorerfahrungen. Eine Zuschreibung des magnetischen Feldes ist wahrscheinlich, die Tiefe der Erklärung ist schwer abschätzbar. Die SuS sollen die Notwendigkeit eines Feldbegriffs entwickeln.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

C.2. Feldkonzept

1. Stunde: Schülervorstellungen zum physikalischen Feldbegriff

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Einführung, Bewusstmachung des Lernstandes	L. zeigt einen ggf. schon bekannten Versuch. Zwei Wagen sind jeweils mit einem Magneten versehen und stehen in einem gewissen Abstand voneinander entfernt. Nach dem Loslassen fahren sie aufeinander zu.	KU LB Experiment	SuS sollen im Lernkontext ankommen. Dazu wird mithilfe des Versuchs an das dritte Newton'sche Axiom erinnert. Dabei soll zudem die Kraftwirkung über eine Entfernung hinweg thematisiert werden. Der Begriff Feld wird seitens der SuS höchstwahrscheinlich, aus Alltagswissen oder Wissen der Sek I heraus, genannt.
3	Auffindung von Schülervorstellungen	Die SuS bearbeiten das Arbeitsblatt / den Fragebogen mit Hilfe der Think-Pair-Share-Methode. In der Share-Phase werden mögliche Definitionen festgehalten.	EA / PA / oUG Arbeit am Material Tafel	An dieser Stelle werden die SuS auf mehrere Probleme stoßen. - Die Schwierigkeit einer eigenen alltags- und physikalische Felddefinition - In der Pair-Phase höchstwahrscheinlich weitere neue Aspekte erfahren - In der Share-Phase eine Flut an Interpretationen erhalten. Dabei eigene und andere hinterfragen, ablehnen oder verbessern.
4	Divergierendes Denken	L. und SuS betrachten die notierten Definitionen. L. regt zur Diskussion an; welche Definitionen schließen sich gegenseitig aus? Gibt es aus dem Alltag mögliche Gegenbeispiele zu manchen Definitionen? ...	KU oUG	Hierbei ist es wichtig, dass die SuS möglichst miteinander diskutieren und der L. sich etwas zurück hält. SuS sollen nicht das Gefühl von vorgefertigtem Wissen haben. L. schreitet deshalb notfalls nur mit Anregungen (Alltagsgegenbeispiel) ein → SuS sollen selber die Probleme herausfinden. Der Begriff Kraft wird wahrscheinlich häufig genutzt, d.h. die SuS entwickeln ein neues Konzept mithilfe eines bekannten. Aus altem Modell wird neues konstruiert. ⇒ Stärkung der Modellbildung
5	Bewusstmachung des Lernstandes, Gesamtzusammenfassung	Die richtigen möglichen herausgefundenen Definitionen werden nochmals an Tafel notiert und verdeutlicht.	KU LB o. SB Tafel	Hierbei sollen möglichst die Formulierungen der SuS beibehalten werden. Somit werden die Arbeit und das Ergebnis der SuS gewürdigt.

6	Reflexion	Rückblick auf die Stunde	KU SB	Den SuS soll nochmals der Lernprozess vor Augen geführt werden und damit Sorge getragen werden, dass mögliche falsche Schülervorstellungen verringert wurden.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

2. Stunde: Die Ein- und Zwei-Fluida-Theorie – Ansichten von B. Franklin und C. Dufay

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Motivation	Der L. hält einen kurzen Lehrervortrag über die Vorstellungen der Elektrizität von Thales von Milet, William Gilbert und Rene Descartes.	KU LB Experiment	Den SuS soll bewusst werden, wie lange elektrische Phänomene schon bekannt sind und wie sie sich früher erklärt wurden. Dabei ziehen Sie Schlüsse auf ihre eigenen Vorstellungen. ⇒ Bewusstmachung von Schülervorstellungen Motivation den Erkenntnisweg fortzusetzen
3	Schaffung eines Problembewusstseins	Der L. teilt den Kurs in zwei Gruppen ein. Eine Gruppe liest einen Text über die Zwei-Fluida-Theorie (ZFT) von Charles Dufay, die andere über die Ein-Fluida-Theorie (EZT) von Benjamin Franklin. SuS notieren sich Stichpunkte aus dem Text.	EA sSA Lesetext	Die SuS sollen sich an die Elektrostatik mit ihren Phänomenen der Sek. I erinnern. Der Aufbau der Physik soll mittels des historisch dargestellten Erkenntnisweges den SuS vor Augen geführt werden. Die Physik kam nicht aus einem fertigen Lehrbuch, sondern wurde über viele Jahrhunderte mit Hürden und Fehlinterpretationen hinweg entwickelt. Die historische Genese soll die SuS in ihrer Modelbildung stärken.
4	Sammeln der Ergebnisse	Die Ansichten der beiden Vertreter werden an der Tafel von den SuS notiert und kurz erläutert. Die jeweils andere Gruppe hat Zeit sich diese Zusammenfassung durchzulesen.	KU SB Tafel	Um Zeit zu sparen sollen die SuS ihre Stichpunkte selbst an die Tafel schreiben. Somit ist genügend Zeit, dass die jeweils andere Fluida-Theorie anhand der Stichpunkte erfasst werden kann.
5	Konvergierendes Denken	Beide Theorien werden im Plenum von den SuS diskutiert. Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgearbeitet und somit letztendlich die überzeugendere Theorie erwählt. L. gibt, wenn nötig, einen Impuls zum Erhaltungsprinzip.	KU oUG	Der L. sollte sich soweit wie möglich raushalten und nur bei massiven Fehlinterpretationen einschreiten. Höchstwahrscheinlich werden sich die SuS durch ihr Vorwissen auf die EFT einigen, aber die ZFT aus damaliger Sicht als mögliche Interpretation zulassen. Alle SuS sehen positiv geladen als e^- -Mangel und negativ als e^- -Überschuss an. ↳ homogene Vorstellung ⇒ Stärkung des Prinzipiendenkens

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

3. Stunde: Versuche zur geistigen Vorstellung des elektrischen Feldes

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Problemgewinnung	L. zeigt ein Demonstrationsexperiment. Halten einer Probeladung neben einen ungeladenen und geladenen Bandgenerator. Wiederholung des Versuchs, ohne dass eine Probeladung in die Nähe gehalten wird.	KU Beobachtung DE	Dass ein negativ geladener Körper von einem positiv geladenen angezogen wird, wird die SuS nicht weiter verwundern, da sie das Verhalten elekt. geladener Körper aus der Sek I kennen.
3	Deutungsphase	L.-Impuls: „Was hat sich durch das Aufladen verändert?“ „Ist ein Unterschied erkennbar?“	KU entG	Mithilfe des Impulses soll deutlich werden, dass sich etwas verändert, wir es aber ohne Hilfsmittel nicht erkennen können. ⇒ Der Begriff <i>Probekörper</i> wird deutlich. SuS wird klar, dass sich hier nur der Raum um die Kugel geändert haben kann. ↳ Nahwirkung?
4	Vertiefung möglicher Vorstellungen	L. zeigt ein weiteres Demonstrationsexperiment. Wattflocken fliegen durch Influenz zwischen zwei an Hochspannung angeschlossenen Konduktorkugeln hin und her. L. gibt ggf. Impuls, falls von SuS nicht erkannt, dass die Flocken auf diskreten Bahnen fliegen. ⇒ Assoziation mit Feldlinien?	KU Beobachtung DE	Hochspannungsexperimente verfolgen SuS zumeist hochmotiviert, da sie es immer mit Gefahr assoziieren. Nach der Deutung des Hin- und Her-Fliegens müssen die SuS meistens auf die diskreten Bahnen hingewiesen werden, weil sie von dem Effekt an sich schon sehr fasziniert sind und weitere Begebenheiten außer Acht lassen. Der Begriff Feldlinie wird seitens der SuS fallen.
5	Sicherung und Reflexion der Stunde	Ein/e Schüler/in wiederholt den Gang der Stunde und fasst die Erkenntnisse mit eigenen Worten zusammen. Ggf. mit Verweis auf Tafelanschrieb.	KU SB Tafel	Gerade der Sachverhalt der Raumänderung um einen Körper (Feld) und die dadurch entstehende Nahwirkung muss mittels der Wiederholung vertieft werden.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

4. Stunde: Michael Faraday und seine elastischen Schläuche

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Historische Motivation	L. teilt einen Text (Auszug aus: „Über Faraday's Kraftlinien“) von J.C. Maxwell über Faraday's Vorstellungen hinsichtlich seiner Kraftlinien aus. Anschließend wird der Text im Plenum diskutiert.	EA/PA/KU sSA Lesetext	<i>Methode: Think-Pair-Share</i> Um die Authentizität zu gewährleisten wurde der Text aus dem ursprünglichen Buch kopiert. Die SuS brauchen ggf. eine gewisse Zeit sich an die Schrift, die Formulierungen und die Rechtschreibung zu gewöhnen. Die Schüler teilen die Vorstellungen, gerade hinsichtlich des Versuches aus der letzten Stunde. Der Kraftbegriff rückt für die SuS näher in das Feldmodell.
3	Ausbau der Erkenntnisse	L. fragt nach einer möglichen Intensitätsdarstellung mithilfe des Kraftlinienbildes. ↳ Ergebnis: Dichte der Linien $\triangleq$ Intensität	KU entG Tafel	Die SuS sollen nun selbst die Dichte als mögliche Intensitätsdarstellung entwickeln. Durch den selbstentwickelten Ausbau des Modells erfolgen eine positive Motivation und eine Stärkung des Selbstvertrauens. Manche SuS werden hierbei auch eine unterschiedliche Dicke der Linien vorschlagen. Dadurch aufkommende Probleme sind darzustellen und zu diskutieren.
4	Verifizierung der gedanklichen Leistung	L. zeigt ein Demonstrationsexperiment Glasschale wird mit Rizinusöl gefüllt und darauf gleichmäßig Grieskörner verteilt. Zwei Elektroden werden auf den Grund der Glasschale angebracht und an eine Hochspannungsquelle angeschlossen. Diskussion über: - Kraftwirkung entlang der Feldlinien	KU Beobachtung DE	Die SuS haben bei diesem Versuch zum ersten Mal wirklich das Gefühl die Feldlinien als Gebilde zusehen. Zuvor konnten Sie anhand des Waffeflockenexperiments nur erahnt werden. Die tangentielle Krafteinwirkung kann deutlicher gemacht werden, wenn im Anschluss der Versuch nochmals wiederholt wird. Dabei wird erst die Spannung angelegt und danach langsam ein wenig Gries darüber gestreut.

		- Dichteänderung der Linien durch Variation der Spannung bzw. Abstand der Elektroden.		Die SuS fühlen sich in ihrer entwickelten Modellvorstellung (Phase 3) gestärkt.
5	historische Vorstellungsentwicklung	L. entwickelt eine Diskussion über Fern- und Nahwirkungsvorstellung, ggf. auch mit historischen Eckdaten.	KU entG	Den SuS soll die Tragweite des heute Gesehenen deutlich werden. Vorher <i>Fernwirkung</i> $\rightsquigarrow$ jetzt <i>Nahwirkung</i> Die große historische Leistung / Bedeutung kann den SuS nur ansatzweise deutlich werden.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

5. Stunde: Vertiefende Versuche zur Untersuchung des Feldes

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Ankommen im Lernkontext	Wiederholung der Erkenntnisse aus der letzten Stunde und kleine Diskussion über die HA.	KU UG	Damit die SuS gut im Lernkontext ankommen ist eine kleine Wiederholung essentiell, da heute der Versuch aus letzter Stunde abgewandelt behandelt wird. Des Weiteren muss die Raumänderung durch das Feld mit der letztendlichen Aufhebung der Fernwirkung thematisiert werden, um das Wechselwirkungskonzept zu stärken.
3	Ausbau des Konzeptes	Der Grießkörner-Öl-Versuch wird mit anders geformten Elektroden wiederholt, um Feldtypen zu klassifizieren. Die ebenen Schnitte von den unterschiedlichen Feldtypen werden ins Heft skizziert.	KU DE Experiment / Tafel	Die SuS sollen die entstehenden Felder beschreiben und mögliche Definitionen nennen. Die letztendlichen Fachbegriffe (radialsymmetrisch, homogen, inhomogen) sind wahrscheinlich vom L. nennen. L. muss darauf verweisen, dass Feldlinien sich nicht schneiden und die Erklärung am Ende der Stunde thematisiert wird.
4	Vertiefung des Konzeptes	L. legt kleine Probeladung in die Schale und im Plenum wird nochmals entwickelt, dass - die Feldlinien tangential die Richtung der wirkenden Kraft angeben und - je mehr Feldlinien pro Fläche vorhanden sind, die dort wirkende Kraft stärker ist.	KU DE Experiment / Tafel	Diese experimentelle Phase ist ggf. optional, falls keine passenden Experimentierutensilien vorhanden sind. Eine Auslassung dieser Phase ist nicht weiter von Bedeutung, weil das Gezeigte schon aus den letzten Stunden bekannt ist.
5	Phase des konvergierenden Denkens	Diskussion über weitere Eigenschaften der Feldlinien. - Feldlinien schneiden sich nicht. - Feldlinien enden senkrecht auf Oberflächen elektrischer Leiter. - Je nach der Geometrie der Objekte liegen die Feldlinien unterschiedlich dicht.	KU entG	Diese Eigenschaften werden, wegen der kognitiven Leistungsfähigkeit, erst jetzt thematisiert. Die tiefere Untersuchung während Phase 3 wäre zu viel Input für SuS gewesen. An dieser Stelle kann sich im Gespräch auf das Wesentliche konzentriert werden. Gerade der dritte Spiegelpunkt sollte im Alltagskontext angesprochen werden. (Blitzableiter, Verhalten bei Gewitter)
6	Reflexion	S. wiederholt alle Erkenntnisse der Stunde und L. erteilt die Hausaufgabe.	KU SB / LB	Zur Festigung des Wissens ist eine zusammenfassende Wiederholung unabdingbar.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

6. Stunde: Vertiefende Versuche zur Untersuchung des Feldes

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Übertragung des bisher Gelernten auf eine mathematische Beschreibung	L. verweist auf die Notwendigkeit einer mathematischen Beschreibung zum weiteren Ausbau des Feldkonzeptes. SuS sollen Vorschläge unterbreiten. ⇒ Entwicklung eines Experiments	KU entG	Die SuS werden den bekannten Kraftbegriff zur Beschreibung heranziehen ohne genauere Vorstellung. L. muss wahrscheinlich Impulse setzen: Ladung an Federkraftmesser? Wie sieht es aus, wenn unterschiedliche große Ladungen an den Kraftmesser angebracht werden? Etc.
3	Experimentelle Untersuchung	L. zeigt Demonstrationsexperiment und verweist darauf, dass eine jetzige Messung (elektrostatisch) unter diesen Bedingungen schwierig ist und gibt vorher aufgenommenen Messwerte raus.	KU DE Experiment	Der Versuch, mit der Ladungsbestimmung mittels Galvanometer, ist sehr schwierig, zeitaufwändig und liefert nur selten vernünftige Werte. Wenn die Werte nicht passen und somit das Verhältnis stark schwankt, ist eine Definition der Feldstärke wenig einleuchtend für die Lernenden und das Fundament für später daraus abgeleitete Größen wackelig. Dadurch sinkt die Motivation erheblich und kann den weiteren Erkenntnisweg stark gefährden.
4	Experimentelle Auswertung	SuS bearbeiten das AB. Die elektrische Feldstärke wird an der Tafel definiert. $\vec{E} = \vec{F}/q$	PA sSA AB	Die Untersuchung von Proportionalitäten ist den SuS aus der Physik geläufig. Durch die Abhängigkeit der Probeladung wird den SuS deutlich, dass die Feldstärke nicht genau gleich der Kraft sein kann.
5	Gliedern schon gemachter Gedankengänge	L. erinnert an die beiden letzten Stunden und fordert die SuS auf, diese auch mathematisch zu interpretieren. - $U \uparrow \Rightarrow$ Feldlinien dichter $\Rightarrow E \uparrow$ $\Leftrightarrow E \sim U$ - $d \downarrow \Rightarrow$ Feldlinien dichter $\Rightarrow E \uparrow$ $\Leftrightarrow E \sim 1/d$ Zusammenfassend also: $E = U/d$	KU entG	Die Größe der elektrischen Feldstärke ist nun bekannt und kann auf schon bekannte Phänomene angewandt werden. <i>Ikonic</i> $\Rightarrow$ <i>symbolisch</i> Die Übertragung ikonischer Sachverhalte in symbolische stärkt die prozessbezogene Kompetenzen. Die Struktur von Formeln wird dabei gestärkt. Die reziproke Übertragung sorgt erfahrungsgemäß zunächst für kleine Probleme. Sehr wichtig ist eine Diskussion über die Kraftwirkung im homogenen Feld. Fast alle Schülerinnen und Schüler kom-

				men zu dem Schluss, dass je näher eine Ladung an eine Platte kommt, desto größer wird die dort wirkende Kraft. Diese Fehlvorstellung gilt es mit der Formelbetrachtung auszuräumen.
6	Festigung des Wissens	L. teilt ein AB mit Übungsaufgaben aus. Der Rest der Bearbeitung soll zu Hause stattfinden.	PA sSA AB	Der Begriff und seine Definition werden durch die Bearbeitung besser verinnerlicht. Zunächst haben die SuS die Chance mit anderen über die Aufgaben ins Gespräch zu kommen und gewinnen Sicherheit. Diese Souveränität können sie zu Hause alleine weiter ausbauen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

7. Stunde: Das radialsymmetrische Feld

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Erforschung eines weiteren Feld-Typs Experimentelle Untersuchung	Der L. zeigt ein Demonstrationsexperiment: Dazu wird der Versuch aus Stunde 6 mit zwei gleichgroßen und gleichgeladenen Kugeln durchge- führt. Gemessen wird die abstoßende Kraft F bei Variierung des Abstandes r . Gemessen wird mit Cassy.	KU DE Experiment / PC	Der Versuch wird aus aktivierungszwecken mit Hilfe der SuS durchgeführt. Dadurch wird das DE etwas geöffnet und die SuS sitzen nicht einfach alle nur beobachtend. Aus Erfahrung liefern solche Experimente mithilfe von Schulexperimentiermaterial aber fast nie brauchbare Werte. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert die Zeit zu sparen und mit den Schülerinnen und Schülern das Experiment mittels Compu- terprogramm durchzuführen und dabei viel Wert auf die Analogie zum Gravitati- onsfeld zu legen.
3	Experimentelle Auswertung I	Die entstehende Kurve soll zunächst von den SuS interpretiert werden. L. setzt ggf. Impulse. Sobald ein reziproker Zusammenhang erkannt wurde, wird die Abszisse angepasst zur Aufde- ckung der Proportionalität. Ergebnis an Tafel: $F \sim \frac{1}{r^2}$ Diskussion über Ähnlichkeit zum Gravitationsge- setz.	KU entG PC	Ein paar SuS wird aus der Physik oder Mathematik bekannt sein, dass die Gestalt der Kurve der Funktion $x \mapsto \frac{1}{x} \left(\frac{1}{x^2} \right)$ ähnelt. Diese Gestalt sollte danach im Plenum auch noch einmal explizit herausgestellt werden. Nachdem die Achsengröße auf $\frac{1}{r^2}$ angepasst wurde, ist bei der erscheinenden Ursprungsgeraden allen SuS die Proporti- onalität ($F \sim \frac{1}{r^2}$) klar. Durch die identische Abstandsabhängigkeit wird den Ler- nenden die Tragweite des Feldbegriffs vor Augen geführt und der Konzeptgedanke der Wechselwirkung gestärkt.
4	Experimentelle Auswertung II	L. teilt AB mit Messwerten aus. Hier wird F in Ab- hängigkeit von Q gemessen. Durch Begutachtung des Verhältnisses erkennen die SuS $\frac{F}{Q} = konst.$ und somit $F \sim Q$ Ergebnis an Tafel: $F \sim Q$	PA sSA AB	Wie schon bei der vorherigen Stunde wird den SuS gesagt, dass Ladungsmessungen sehr ungenau sind und deshalb auf schon entstandene Werte zurückgegriffen wird. Eine äquivalente Untersuchung fand in der vorherigen Stun- de statt, daher erkennen die SuS schnell, dass $F \sim Q$ gilt.

5	Phase des konvergierenden Denken	Mit den erhaltenen Ergebnissen aus dieser und letzter Stunde ($F \sim q$; $E = F/q$) kann im Plenum oder in GA die Feldstärke im homogenen Feld aufgestellt werden. $E = \frac{F}{q} = k \cdot \frac{q \cdot Q}{q \cdot r^2} = \frac{k \cdot Q}{r^2}$	KU / GA entG / sSA Tafel	Bei Begutachtung aller Proportionalitäten und der Definition der elekt. Feldstärke kann gemeinsam im Plenum oder in GA, je nach Zeit und kognitiver Leistungsfähigkeit, die Feldstärke für ein radialsymmetrisches Feld aufgestellt werden.
6	Sicherung	L. erklärt die Konstante $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ und notiert den letztendlichen Zusammenhang. $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$	KU LB Tafel	Die Proportionalitätskonstante kann ausführlich über die Flächenladungsdichte besprochen werden, ist aber aus Elementarisierungsgründen fragwürdig. Es wäre nur ein neuer zusätzlich verwirrender Begriff, der später nicht mehr für die Schülerinnen und Schüler relevant ist. Eine kurze Beschreibung des L., dass ϵ_0 experimentell bestimmt werden kann und der Term 4π von der Kugeloberfläche herrührt, reicht an dieser Stelle vollkommen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

8. Stunde: Das Coulombsche Gesetz und seine Verwandtschaft zum Gravitationsgesetz

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation des bisher Gelernten	Ein S. oder eine S'. wiederholt die Thematik der letzten Stunde.	KU SB	Damit die SuS das Coulomb-Gesetz selbst herleiten können, müssen sie ihre Erkenntnisse reorganisieren. → Radiale Feldstärke wieder klar.
3	Entwicklung eines Gesetzes	L. stellt die Aufgabe, die Kraft zwischen zwei Punktladungen zu bestimmen. Ergebnis an Tafel: Coulombsches Gesetz: Die Kraft zwischen zwei elektrisch geladenen Körpern kann folgendermaßen berechnet werden: $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	EA/PA/GA TPS / Placemat Heft	<i>Methode: Think-Pair-Share oder Placemat</i> Der L. geht im Rahmen der individuellen Förderung dabei rum und gibt falls nötig Hilfestellungen. Er weist auf die Betrachtung der Wirkungsgefüge hin. Ggf. muss an die Beziehung $E = \frac{F}{q} \Leftrightarrow F = E \cdot q$ erinnert werden.
4	Analyse	L. fordert SuS auf Schlussfolgerungen zu formulieren und Assoziationen zum Gravitationsgesetz zu ziehen.	GA sSA	L. muss darauf verweisen, das Wechselwirkungsprinzip im Rahmen des Coulombschen Gesetzes zu formulieren. Dies wird von den SuS alleine wahrscheinlich nicht kommen. Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Gravitationsgesetz können die SuS selber leicht entdecken.
5	Sicherung Phase des konvergierendes Denken	Alle Ergebnisse der Schülerarbeit werden an der Tafel gesammelt, erklärt und zusammengefasst. Am Ende sollte in etwa folgendes an der Tafel zu Übernahme ins Heft stehen: - Nach dem Wechselwirkungsprinzip <i>actio = reactio</i> ist die Kraft, die das Feld der Ladung Q_1 auf die Ladung Q_2 ausübt, entgegengesetzt gleich der Kraft, die das Feld der Ladung Q_2 auf die Ladung Q_1 ausübt - Das Coulombsche Gesetz entspricht dem Gravitationsgesetz. (Anderer Vorfaktor und elektrische Ladungen statt der Ladung „Masse“) - Die Kraft kann hingegen der Grav.-kraft, sowohl anziehend als auch abstoßend sein. (Ladung Masse immer positiv; elektr. Ladung kann positiv oder negativ sein)	KU SB / LB Tafel	Zur Würdigung der Arbeit müssen zunächst alle Ergebnisse an der Tafel gesammelt werden. Anschließend werden sie erklärt, sodass sich bei der folgenden Zusammenfassung alle SuS beteiligen können. L. muss ggf. erklärend manche Formulierungen aufbessern. Bei der Diskussion sollte auch über die relative Stärke der Wechselwirkungen und über die Kopplung gesprochen werden. → Erste Vorbereitung Austauschteilchenkonzept.
6	Reflexion	Ein S. oder eine S'. wiederholen den Gang der Stunde und es wird die HA erteilt. (Übungen zum Coulomb-Gesetz)		Die SuS sollen ein Gefühl für die Größenordnungen der wirkenden Kraft entwickeln.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

9 /10. Stunde: Spannung – Die elektrische Potentialdifferenz und ihre graphische Veranschaulichung

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation des bisher Gelernten	Im Plenum werden die Ergebnisse der letzten Stunde vorgestellt.	KU UG Aufzeichnungen	Gerade die Analogien zwischen Coulomb-Gesetz und Gravitationsgesetz sollen die SuS für das Folgende sensibilisieren.
3	Entwicklung einer Problemfrage	L. regt an das Potential eines elektrischen Feldes in Analogie zum Gravitationsfeld zu untersuchen. Erinnerung: Heben eines Körpers im Grav.-Feld $W_{pot} = F_g \cdot h = m \cdot g \cdot h$ SuS erarbeiten W_{el} zwischen zwei geladenen Platten. Ergebnis: $W_{el} = F_{el} \cdot d = q \cdot E \cdot d$	PA sSA	Mit der Erinnerung, dass die mechanische Arbeit „Kraft mal Weg“ ist, sollte es für die SuS kein Problem sein, dass Äquivalent zwischen zwei Platten im Abstand d zu bestimmen. Stärkung des Selbstbewusstseins durch eigene Bestimmung.
4	Herleitung einer neuen Größe	L. erklärt Sinnhaftigkeit von: $\varphi = \frac{W}{q}$ in Analogie zu Def. E Weiter mit der Überführungsarbeit zwischen zwei Punkten und der Definition der Potentialdifferenz als Spannung: $\Delta\varphi_{1,2} = \frac{\Delta W_{1,2}}{q} = U$	KU LB Tafel	SuS fragen sich wahrscheinlich über die Notwendigkeit einer weiteren Beschreibungsgröße. L. verweist auf die experimentell schwierige Ladungsbestimmung und die relativ einfache genaue Bestimmung der Spannung. ↳ Alltagsgröße Spannung wird den SuS anschaulich.
5	Ausweitung des neu Gelernten	L. stellt die potentielle Energie und das Potential eines radialsymmetrischen Feldes vor: $W_{pot} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot Q}{r}$ und $\varphi = \frac{W}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$ Skizze eines r-F-Diagramms	KU LB Tafel	Bei Herleitung des Potentials im radialsymmetrischen Feld muss der Integralbegriff vorhanden sein, welcher zu Beginn der Qualifikationsphase nicht vorliegt. Daher sollte hier eine schlichte Nennung der Zusammenhänge reichen. Wichtig ist nur, dass der Bezugspunkt P_2 weit entfernt von der Ladung gewählt wird und somit der Term mit der $\frac{1}{r^2}$ - Abhängigkeit verschwindet.
6	Ikonomische Veranschaulichung	L. zeigt mithilfe eines Programms Ebene Schnitte von Feldlinien / Potentiallinien und 3-D-Potentialgebirgen von verschiedenen Feldkonfigura-	KU oUG PC / Beamer	Wechsel: <i>symbolisch zu ikonisch</i> Mithilfe des Applets können live beliebige Konfigurationen betrachtet werden, d.h. die SuS können mitbestimmen.

		gurationen. Darunter: positive Punktladung, negative Punktladung, zwei positive Punktladungen, zwei negative Punktladungen, positive und negative Punktladung und von entgegengesetzt geladenen Platten.		Bei Betrachtung der Potentiallinien wird der Begriff Äquipotentiallinie / -fläche entwickelt und erklärt. Gerade durch die Darstellung der 3-D-Potentialgebirge sollte das Geometrisierungskonzept angesprochen werden. Zusammenhang zwischen der Geometrie des Objekts (Steigungsverlauf) und der wirkenden Kraft. $\frac{d}{dx} \uparrow \Leftrightarrow F \uparrow$ bzw. $\frac{d}{dx} \downarrow \Leftrightarrow F \downarrow$ Auch Fragen, warum und wann ein Gebirge bzw. ein Tal entsteht vertieft das Feldkonzept.
7	Ausblick	L. gibt Impuls die Erkenntnisse aus den Grafiken auf die Formeln zu übertragen. Begutachtung: $E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$ und $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$ Erkenntnis: $E(r) = -\frac{d}{dr}\varphi(r)$		Wechsel: <i>ikonisch zu symbolisch</i> In der letzten Phase erkannten die SuS, dass je steiler das Potential ist, so dichter sind die Feldlinien, so größer die wirkende Kraft bzw. die Feldstärke. Nun sehen sie auch im symbolischen Bereich, dass die Ableitung des Potentials $\varphi'(r)$ der elektrischen Feldstärke $E(r)$ entspricht. Da den SuS die Differentialrechnung wohl bekannt ist, werden hier keine Verständnisprobleme entstehen. $\Rightarrow$ <i>horizontale Vernetzung</i> zum Fach Mathematik

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

11/12. Stunde: Vertiefung des Feldbegriffs und Auffindung eines Ausbreitungsmediums

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation des bisher Gelernten	Ein S. oder eine S'. wiederholt die Thematik der letzten Stunde.	KU SB	Der bisherige Kenntnisstand muss allen klar sein, damit eine tiefere Auseinandersetzung mit diffizilen Fragestellungen möglich ist. Somit ist gewährleistet, dass auch schwächere SuS sich in der folgenden Diskussion einbringen können.
3	Systematische Analyse des Unterrichtsgegenstandes	Folgende Fragestellungen sollen bearbeitet werden: - Warum werden stets alle Äquipotentialflächen / -linien von den elektrischen Feldlinien senkrecht geschnitten? - Warum zeigen Feldlinien stets in Richtung des abnehmenden elektrischen Potentials? - Warum ist im elektrostatischen Gleichgewicht die Leiteroberfläche stets eine Äquipotentialfläche?	EA / PA / GA TPS Heft	Durch die Klärung dieser Fragestellungen sollen die SuS sich noch einmal vertieft mit dem Feldbegriff und seinen Beschreibungsgroßen auseinandersetzen. Die Methode gewährleistet dabei, dass sich kein S. oder keine S'. aus der Erörterung heraushalten kann.
4	Präsentation der Ergebnisse	Die Antworten werden klar an der Tafel formuliert. Zu 1) Wenn eine Feldlinie eine Fläche nicht senkrecht schneidet, so wirkt auf eine positive Probeladung im Schnittpunkt der Feldlinie mit der Fläche eine Kraft parallel zur Fläche. Diese Kraft beschleunigt die Ladung längs der Fläche. Die Ladung nimmt aus dem Feld kin. Energie auf, befindet sich also in den verschiedenen Punkten der Fläche auf unterschiedlichen Potentialen. Die Fläche kann dann keine Äquipotentialfläche sein. Zu 2) Eine positive Probeladung wird durch eine elektr. Kraft, die tangential zur Feldlinie in Richtung der Feldlinie zeigt, längs der Feldlinie beschleunigt, sie nimmt also aus dem Feld Energie auf, durchläuft demnach Punkte abnehmenden Potentials. Zu 3) Wäre die Leiteroberfläche keine Äquipotentialfläche, so würde es mindestens zwei Punkte auf der Leiteroberfläche geben, die unterschiedliches elekt. Potential haben. Durch die zwischen diesen Punkten herrschende Spannung (Potentialdifferenz) würden freie Ladungsträger in der Leiteroberfläche bewegt werden, was der Voraussetzung widerspricht, dass elektrostatisches Gleichgewicht herrscht.	KU UG Tafel	Alle SuS müssen die Möglichkeit haben zu einem späteren Zeitpunkt Vergessenes wieder aufzufrischen. Die Antworten sollen sehr ausführlich ausgedrückt werden, um auch den leistungsschwächeren SuS zu ermöglichen kleinere Unklarheiten alleine problemlos zu bewältigen.

5	Aufstellen einer leitenden Problemfrage	L. zeigt Grafik der elektrischen Feldstärke sowie des Potentials einer geladenen Hohlkugel. Diskussion zweier Aspekte. 1. Wiederholend: konstantes Potential $\Rightarrow$ verschwindende Feldstärke 2. Ausbau: Warum ist Feldstärke Null im inneren?	KU entG OHP	Von der vorherigen Phase angeregt, soll diese Grafik zum einen $E = -\varphi'$ wiederholen und zum anderen eine Diskussion über das Ausbreitungsmedium des Feldes anregen. Ggf. sagt ein S. oder eine S' oder sonst wird es vom L. motiviert, dass in der Kugel keine Luft ist und deshalb kein Feld zustande kommt.
6	Experimentelle Analyse I	L. zeigt klassischen Vakuumglocken-Versuch. Ergebnis: Felder haben kein Ausbreitungsmedium	KU DE / entG Experiment	<i>Verknüpfung bestehenden Wissens mit Falsifizierung.</i> Nachdem die SuS sehen, dass die innere geladene Kugel sowohl vor als auch nach dem Vakuumieren abgelenkt wird, werden wahrscheinlich viele dieses Ergebnis aus Alltagswissen befürworten. Bspw. sind das Magnetfeld der Erde und das Gravitationsfeld im Weltall (Vakuum) auch vorhanden.
7	Experimentelle Analyse II	L. zeigt selbigen Versuch mit einer Drahthaube statt der Glocke. Ergebnis: (Quasi)-Elektrostatische Felder werden durch geschlossenen Metallgitter abgeschirmt. Definition: Faraday'scher Käfig	KU DE / entG Experiment	Auch diesen Effekt werden die SuS schon vorher aus ihrem Alltag gewusst haben. Der Begriff Faraday'scher Käfig wird jedem bekannt sein. Nun ist aber die Möglichkeit gegeben diesen Effekt über Influenz genau zu beschreiben. Eingang auf weitere <i>Alltagsbezüge</i> . (Abschirmung in Kabeln, Auto als Schutz im Gewitter, Mikrowelle (Effekt andersherum)).
8	Sicherung / Reflexion	S. oder S': fast nochmals die wichtigsten Erkenntnisse der Stunde zusammen.		Der L. sollte nochmals auf das „mediumfreie“ Wechselwirkungskonzept hinweisen bzw. es verdeutlichen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

13/14. Stunde: Vertiefung durch Analogiefindung zwischen unterschiedlichen Feldern

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation des bisher Gelernten Vertiefung des bisher Gelernten durch Analogiebildung	L. teilt den Kurs in Gruppen und teilt Folien aus. Die SuS sollen kurz den Feldbegriff beschreiben und danach mit ihrem bisherigen Wissen Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen elekt. , mag. und Gravitationsfeld tabellarisch herausarbeiten. Differenzierte Aufgabenstellung: • Beginnen Sie zunächst mit Grunderscheidungen, die Sie beobachten können. • Versuchen Sie anschließend Modellbegriffe vom elektrischen auf das magnetische und gravitative Feld zu übertragen. • Überlegen Sie sich, ob Sie Definitionen oder Rechengrößen sinnvoll übertragen können. Übertragen Sie die gefunden Analogien auf eine Folie und präsentieren Sie ihre Ergebnisse im Plenum.	GA sSA Aufzeichnungen / ggf. Lehrbuch	Die SuS haben bereits gelernt, elektrische Felder mit geeigneten Modellbegriffen und Rechengrößen vollständig zu beschreiben. Zudem sind ihnen sowohl die magnetischen Phänomene aus der Mittelstufe als auch die Gravitationskraft aus der Einführungsphase bekannt und beide wurden mit dem physikalischen Begriff des Feldes beschrieben. Sie sollen eigenständig erkennen, welche Phänomene am sinnvollsten als Grundlage für die Definition einer magnetischen und gravitativen Feldstärke geeignet sind. Damit sollen sie sich unübersehbaren Analogien zwischen den Feldern ins Gedächtnis rufen und sich somit vertieft mit dem Feldkonzept auseinandersetzen. Die Gruppen werden möglichst heterogen gewählt, damit die SuS sich gegenseitig helfen und jede Gruppe die Aufgabe adäquat lösen kann. Falls die Aufzeichnungen und ihr Vorwissen nicht genügen, können sie das Lehrbuch zurate ziehen.
3	Präsentation der Ergebnisse	Jede Gruppe präsentiert ihr Ergebnis. Alle hören aufmerksam zu und ergänzen nicht ihre eigene Lösung.	KU UG Folie	Um das Ergebnis der Gruppenarbeitsphase zu würdigen wird jede Gruppe vorstellen. Aus Zeitgründen müssen entstehende Doppelungen nicht mehr erklärt werden.
4	Sicherung durch Erstellen eines Kursergebnisses	Ein gemeinsames Ergebnis wird erstellt und für alle SuS kopiert.		Da es gute und weniger gute Ergebnisse geben wird und während der Präsentationsphase alle aufmerksam zuhören sollen (dementsprechend ihr Ergebnis nicht ergänzen sollen), wird ein gemeinsames <i>Kursergebnis</i> erstellt. So haben alle SuS später dieselbe Aufzeichnung. Des Weiteren findet hierdurch eine zweite Sicherung statt.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

C.3. Geometrisierungskonzept

1. (und 2.) Stunde: Geometrie und Kausalität - Eine Einführung in die Raumzeit und Minkowskidiagramme

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Einführung, Bewusstmachung des Wissenstandes	L. notiert „ <i>Raumzeit</i> “ an der Tafel und lässt die Lernenden eine Mindmap an der erstellen. L. legt Bild von schematischer Raumzeitkrümmung auf.	KU SB Tafel / Mindmap OHP	Der Begriff wirkt alleine durch seinen „Sciencefiction- Verbundenheit“ motivierend und sorgt ggf. für eine rege Beteiligung. Soll für einen zusätzlichen Impuls sorgen und weitere / neue Begriffe bei den SuS hervorrufen. L. muss darauf verweisen, dass eine 4-dim Problematik auf 2-dim reduziert dargestellt wird.
3	Wiederholung von schon Bekanntem	Im Plenum werden die wichtigsten Phänomene der SRT (Zeitdilatation, Längenkontraktion, Massenzunahme) wiederholt.	KU oUG Tafel	Um die Sachverhalte der SRT wieder ins Bewusstsein der SuS zu rufen, wir ein offener Dialog geführt.
4	Lesung eines historischen Originaltextes	L. zeigt die historische Rede von H. Minkowski. SuS deuten die Rede	EA / PA / KU SB AB / OHP / TPS	Motivation durch Lesung eines Originaltextes. SuS sehen die Physik als langsam gewachsene Naturwissenschaft an. <i>Think-Pair-Share</i> dient zur tiefergehenden Auseinandersetzung mit dem Material.
5	Die ikonische Ebene als Verständnissförderndes Mittel	L. entwickelt mit den SuS die Minkowskidiagramme unter Zuhilfenahme passender Medien. Dazu wird ein Experiment mithilfe einer gedehnten Gummihaut durchgeführt und entsprechende Maßstäbe betrachtet. Besprechung unterschiedlicher Strecken im Minkowski-Diagramm, auch unter Einbeziehung des Winkels zur x-Achse. Speziell der Lichtblitz ($\varphi = 45^\circ$) wird angesprochen.	KU entG Tafel / OHP / DE	Je nach Ausstattung, Zeit und kognitiver Leistungsfähigkeit kann die Entwicklung mithilfe eines Tafelbildes, einer OHP-Folie oder eines angeleiteten Arbeitsblattes entwickelt werden. Hilfreich ist das Experiment mit einer Gummihaut, um die Vorstellungskraft der SuS anzuregen.
6	Reflexion	Im Plenum wird kurz das neu Gelernte reflektiert.	KU SB	Die SuS erkennen die Geometrie als nützliches Werkzeug zur Deutung tiefergehender physikalischer Gesetze. Aufgrund der Fortführung in der nächsten Stunde zum Minkowski-Kegel ist eine gute Einbettung des erhaltenen Wissens sehr wichtig.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

2. Stunde: Der Lichtkegel - Einteilung der Raumzeit in den Kausalitäts-Minkowski-Kegel

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Motivation	Problemstellung: <i>Kann die NASA die Astronauten auf dem Mond rechtzeitig vor Meteoriteneinschläge warnen.</i>	KU entG Tafel / OHP	Aufstellen eines kognitiven Konflikts. Bei zeitlich hintereinanderliegenden Ereignissen geht jeder zunächst von einer möglichen Warnung aus.
3	Schaffung eines Problembewusstseins	L. entwickelt mit den Lernenden den Minkowski-Kegel.	EA sSA Lesetext	Zu Beginn wird ein Impuls zur Motivation gegeben, dass nun versucht wird geometrisch kausale Zusammenhänge zu entschlüsseln.
4	Vertiefung durch weitere Beispiele	Die SuS bekommen den Auftrag sich Ereignisse zu überlegen, die danach von anderen SuS auf ihre Kausalität hin zu interpretieren sind. Einige Ergebnisse werden beispielhaft vorgestellt.	PA sSA	Motivation durch eigenständige Konstruktion kniffliger kausaler Zusammenhänge. Die selbstständige Arbeit lässt den neuen Inhalt besser in den Wissensbestand eingliedern. SuS haben die Möglichkeit andere Ergebnisse mit ihren zu vergleichen. Aus zeitlichen Gründen ist es schwierig alle Ergebnisse vorzustellen.
5	Verallgemeinerung durch konvergierendes Denken	Im Plenum werden unter Zuhilfenahme der Ergebnisse aus dem vorherigen Unterrichtsschritt allgemeine Zusammenhänge erarbeitet und der Kegel in die Zukunft, Vergangenheit und die nicht reale Welt eingeteilt.	KU oUG Tafel	Beispiele verknüpft mit Verallgemeinerungen helfen Sachverhalte einfacher zu behalten.
6	Reflexion	Am Ende der Stunde reflektiert ein SuS das neu Gelernte. Der L. weist nochmals darauf hin, dass hier nur eine 2-dim Vereinfachung behandelt wurde.	KU SB / LB	Festigung des Wissens durch Wiederholung. Die eigentliche Vierdimensionalität darf von den SuS nicht völlig ausgeblendet werden.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbstständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

3. Stunde: Die nichteuklidische Geometrie – Untersuchung der Längeninvarianz eines Stabes in zwei unterschiedlichen Systemen

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Prinzipien in der Physik	L. legt einen Stab mitten in den Raum und die SuS sollen die Länge schätzen.	KU Beobachtung DE	Die SuS haben alle einen unterschiedlichen Blickwinkel zum Stab, schätzen die Länge aber in der Regel alle ähnlich.
3	Mathematisierung	Der Sachverhalt wird mithilfe einer Folie, auf dem zwei zueinander gedrehte KS dargestellt sind, veranschaulicht. An der Tafel wird die Länge mathematisch mithilfe des Satzes von Pythagoras bestimmt. Prinzip der „Invarianz“ wird entwickelt.	KU entG Tafel	Eine vorbereitete Folie mit den KS spart Zeit. Die Längenbestimmung über Pythagoras wird den SuS schnell klar sein und keine Probleme aufwerfen. Mit diesem einfachen Beispiel kann den SuS ein wichtiges physikalisches Prinzip gut veranschaulicht werden und die Prinzipienhaftigkeit weiter verdeutlicht werden.
4	Zusammenführung / Übertragung des bisher Gelernten auf ähnliche Probleme	L. zeigt dieselbe Problematik im Kontext eines Raumzeitabstandes. SuS leiten mithilfe des Lehrers und / oder Hilfekarten eine Formel zu Bestimmung des Raumzeitabstandes her.	GA sSA Hilfekarten	Durch die eigenständige Herleitung werden die SuS stärker in den Unterricht mit einbezogen und verinnerlichen die Thematik besser. Die Herleitung stellt größere kognitive Herausforderungen dar, gerade für leistungsschwächere SuS. Aus diesem Grund werden Hilfekarten bereit gelegt, damit entweder Anregungen geholt oder eigenständig erarbeitete Ergebnisse kontrolliert werden können.
5	Interpretation Divergierendes Denken	Das Ergebnis $\overline{P_1P_2} = \sqrt{(c\Delta t)^2 - (\Delta x)^2}$ wird in Hinsicht auf das Minuszeichen diskutiert. L. erläutert die nichteuklidische Geometrie beispielhaft mithilfe des Parallelenaxioms und der Geometrie auf einer Kugeloberfläche.	KU entG Tafel	Das Ergebnis werden die SuS höchstwahrscheinlich hinnehmen, haben aber Probleme mit der Deutung / Tragweite. Aus diesem Grund muss beispielhaft auf die nicht-euklidische Geometrie eingegangen werden. Hierzu eignen sich aus anschaulichen Gründen die äquatorial parallelen Längenzirkel, die an den Polen Schnittpunkte aufweisen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

4. Stunde: Einsteins Motivation - Beweggründe zur Aufstellung der Allgemeinen Relativitätstheorie

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Besprechung der HA	Eine Schülerin oder ein Schüler stellt die Hausaufgabe vor und der Sachverhalt wird im Plenum diskutiert und ggf. ergänzt.	KU SB	Mit der HA wurde die eigenständige Recherche geübt. Eine Vorstellung zur Würdigung der SA und eine anschließende Diskussion zur Ergänzung sind wichtige Bestandteile zum richtigen Umgang mit HA.
3	Symbolisierung	Die Bekannte Euklidische Metrik: $\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ Und die aus der letzten UR-Stunde hergeleitete Minkowski-Metrik: $\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2$ Werden an der Tafel nochmals notiert.	KU UG Tafel	Es sollte nochmals auf die Besonderheit der negativ eingehenden Raumkoordinaten eingegangen werden, um die SuS zu sensibilisieren.
4	Einsteins Motivation	Der Lehrer erläutert nochmals das bisher bekannte Relativitätsprinzip bei gleichförmigen Bewegungen und verweist auf die Einfachheit der Naturgesetze, wenn alles relativ wäre.	KU LB Ggf. Tafel	Zur Auffrischung ist eine Wiederholung für die SuS sehr wichtig, da sonst Neurungen nicht richtig eingeordnet werden können.
5	Zusammenschluss zweier Teilgebiete der Physik	Lehrer gibt den Impuls, dass der Zusammenschluss von Gravitation und SRT eine Verallgemeinerung des Relativitätsprinzips bedeuten würde. SuS sollen darüber diskutieren.	KU entG Tafel	Die Metrik stellt eine hohe kognitive Belastung für die SuS dar. Die Leistungsstarken sind hier gefordert, aber auch die Leistungsschwächeren (gerade wenn es aufs mathematische beschränkt ist) können hier im freien Dialog Beiträge liefern.
6	Elementarisieren auf Grundlagen	Das Ergebnis der Diskussion wird auf zwei Grundannahmen der ART polarisiert und dokumentiert. - Allgemeines Relativitätsprinzip - Äquivalenzprinzip	KU LB Tafel	Zur besseren Einbindung des neu Gelernten hilft gerade den Leistungsschwächeren eine Elementarisierung auf Grundlegendes enorm.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

5/6. Stunde: Himmel- und Erdlabor - Gruppenteilige Erarbeitung der zugrundeliegenden Gedankenexperimente

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Schaffung notwendiger Voraussetzungen	Der L. stellt das Gedankenexperiment des Himmel- und Erdlabors vor. • Erdlabor: Labor auf der Erde • Himmelslabor: Labor, dass fernab jeglicher gravitativer Einflüsse mit $a = g$ im All beschleunigt wird.	KU LB Ggf. Tafel	Die SuS müssen wieder mit der Kraft und Sinnhaftigkeit von Gedankenexperimenten vertraut gemacht werden. Aus der SRT müssten diese intelligenten „Gedankenspiele“ noch bekannt sein.
3	Betrachtung von Teilproblemen	Die SuS werden in 8 Gruppen eingeteilt und bearbeiten 4 unterschiedliche Problemstellungen: • Fallende Körper • Schwerelosigkeit • Laufzeitvergleich von Uhren • Lichtablenkung	GA sSA Material	Die eigenständige Erarbeitung von Sachverhalten, auch wenn sie angeleitet geschieht, sorgt für ein besseres Verständnis des neuen Stoffes. Dazu kommt noch, dass eine Gruppenarbeit meist motivierender für die SuS ist.
4	Vorstellung der Schülerarbeit	Die 4 unterschiedlichen Problemstellungen werden im Plenum vorgestellt. Wobei das Los entscheidet, welche Gruppe vorstellt. Am Ende der Vorstellungsrunde bekommen alle SuS jedes Blatt der anderen Gruppen ausgeteilt.	KU SB Tafel / OHP	Damit sich keine Gruppe zurückzieht, wird das Los entschieden. Die Gruppe die nicht vorstellt kann im Anschluss Ergänzungen einbringen, so ist gewährleistet, dass jede Schülerarbeit gewürdigt wird. Alle SuS sollen dieselben Materialien in ihren Aufzeichnungen haben.
5	Experimentelle Verifizierung	Der L. stellt die verifizierenden Experimente vor. • <i>Sonnenfinsternis 1919</i> (Lichtablenkung) • <i>Pound-Rebka</i> (Rotverschiebung) • <i>Hafele-Keating</i> (Laufzeitverlängerung) Andere Variante: Die Experimente wurden vorher als Schülerreferate rausgegeben und werden nun vorgestellt.	KU entG Tafel	Eine hohe kognitive Belastung für die SuS. Die Leistungstarken sind hier gefordert, aber auch die Leistungsschwächeren (gerade wenn es aufs mathematische beschränkt ist) können hier im freien Dialog Beiträge liefern. Je nach Zeit oder Lerngruppe können die Experimente auch im Rahmen von Schülerreferaten vorgestellt werden. Hiermit können sich besonders intrinsisch Motivierte tiefergehend mit der Thematik auseinandersetzen oder Leistungsschwächeren eine zusätzliche Verbesserungschance gegeben werden.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

7/8. Stunde: Einstein mit Newton - Gruppenarbeit zur Berechnung der Raumzeit- Effekte mithilfe der newtonschen Physik

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Schaffung notwendiger Voraussetzungen	Der L. erläutert kurz den Begriff und die Formel zur Berechnung der Fluchtgeschwindigkeit. $v_F = \sqrt{\frac{2\gamma M}{R}}$ Hiermit werden Rückschlüsse auf den Schwarzschildradius gezogen.	KU LB Tafel / Folie	Auf manchen AB's wird die Fluchtgeschwindigkeit im Rahmen des Schwarzschildradius genutzt. Um die eigenständigen Herleitungen bzw. die damit verbunden hohen kognitiven Leistungen der SuS nicht zu überstrapazieren, wird eine schnelle effektive Weise bevorzugt.
3	Betrachtung von Teilproblemen	Die SuS werden in 5 Gruppen eingeteilt und bearbeiten mathematisch unterschiedliche Problemstellungen: • Gravitationsrotverschiebung 1 • Gravitationsrotverschiebung 2 • Gravitationszeitdilatation • Gravitations-Lichtablenkung • Gravitations-Längenkontraktion	GA sSA Material	Die eigenständige Erarbeitung von Sachverhalten, auch wenn sie angeleitet geschieht, sorgt für ein besseres Verständnis des neuen Stoffes. Dazu kommt noch, dass eine Gruppenarbeit meist motivierender für die SuS ist. Die Effekte der letzten drei Aufgabenstellungen sind schon aus der SRT bekannt und können ggf. an leistungsschwächere SuS verteilt werden.
4	Vorstellung der Schülerarbeit	Die 5 unterschiedlichen Aufgabenstellungen werden im Plenum vorgestellt. Hierbei ist auf die Reihenfolge zu achten. Am Ende der Vorstellungsrunde bekommen alle SuS jedes Blatt der anderen Gruppen ausgeteilt.	KU SB Tafel / OHP	Gruppe eins zeigt ein Ergebnis, dass Gruppe zwei als Voraussetzung braucht, bzw. Gruppe fünf braucht den Dilationsfaktor von Gruppe drei. Für die vorherige Bearbeitung ist dies nicht relevant, hier wird Nichtbekanntes als gegeben vorausgesetzt, aber die Präsentation sollte durch Einhaltung der Reihenfolge in sich schlüssig sein und somit ein didaktisch rundes Ergebnis liefern. Alle SuS sollen dieselben Materialien in ihren Aufzeichnungen haben.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

9.Stunde: Der geometrische Aspekt – Experimentelle Untersuchung zur ART und ihre geometrische Deutung

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Entwicklung einer leitenden Problemfrage	Der L. legt eine Folie mit einem Raumzeit-Krümmungsbild auf. SuS sollen das Bild kommentieren. <i>Ziel:</i> Am Ende der Diskussion sollte die Gravitation als Krümmung der Raumzeit an der Tafel benannt werden. L. stellt als Analogie das elektrische Potential vor. Stärkere Krümmung, größer wirkende Kraft.	KU oUG OHP	Die meisten SuS werden eine ähnlich graphische Darstellung schon in den Medien o.ä. gesehen haben und werden diffuses Vorwissen formulieren. Durch geeignete Lehrerimpulse können die SuS auf die richtige Lösung kommen. Hierbei ist sehr sensibel vorzugehen. Die SuS dürfen später die Krümmung der Raumzeit nicht mit Potentialdarstellungen verwechseln.
3	Analogie	L. stellt den Versuch mit einem drehenden Trichter vor, in welchem sich unterschiedlich große Kugeln befinden, die wiederum bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten andere Abstände zum Mittelpunkt einnehmen. Es werden unterschiedliche Konfigurationen aus Masse und Drehgeschwindigkeiten ausprobiert.	KU LB	An dieser Stelle habe ich mich für dieses Experiment und gegen das „Gummituch“ entschieden, da die nötigen Utensilien einfacher zu beschaffen sind und sich durch das Gummituch seitens der Schülerinnen und Schüler oft folgende Frage entwickelt. <i>Massereiche Objekte krümmen das Raumzeit-Tuch, weil sie nach unten gezogen werden durch... Was?</i> Diese Frage wird dadurch suggeriert, da in diesem Modell das Tuch durch das aufliegende Gewicht (Schwerkraft) nach unten gekrümmt wird. Aber die Krümmung eigentlich die Kraft repräsentieren soll.
4	Mechanisches Analogieexperiment	Der L. stellt den Versuch mit einem drehenden Trichter vor, in welchem sich unterschiedlich große Kugeln befinden, die wiederum bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten andere Abstände zum Mittelpunkt einnehmen. Es werden unterschiedliche Konfigurationen aus Masse und Drehgeschwindigkeiten ausprobiert.	KU SB Tafel / OHP	An dieser Stelle habe ich mich für dieses Experiment und gegen das „Gummituch“ entschieden, da die nötigen Utensilien einfacher zu beschaffen sind und sich durch das Gummituch seitens der Schülerinnen und Schüler oft folgende Frage entwickelt. <i>Massereiche Objekte krümmen das Raumzeit-Tuch, weil sie nach unten gezogen werden durch... Was?</i> Diese Frage wird dadurch suggeriert, da in diesem Modell das Tuch durch das aufliegende Gewicht (Schwerkraft) nach unten gekrümmt wird. Aber die Krümmung eigentlich die Kraft repräsentieren soll.
5	Transfer auf astronomische Größen in besonderer Berücksichtigung der Krümmung	Die besprochenen Effekte werden nun im Ple-num geometrisch analysiert. <i>gravitative Rotverschiebung, Zeitdilatation, Längenkontraktion und Lichtablenkung</i> Alles wird mithilfe von Folien und/oder Tafelskizzen verdeutlicht.	KU LV Tafel / OHP	Eine selbstständige Erarbeitung durch die Schülerinnen und Schüler ist für sie kognitiv sehr schwierig und manche Fehldeutungen geraten oft in Misskonzept, um diesem vorzubeugen und Zeit zu sparen ist dieser Unterrichtsschritt sehr lehrerzentriert gehalten.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

10/11. Stunde: Das Schwarze Loch - Einblick in die Schwarzschildmetrik, die einsteinsche Feldgleichung und ihre jeweiligen geo. Deutungen

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU / LB	
2	Mathematisierung Induktionsschritt 1	Der L. stellt den pythagoreischen Abstand der Ebene in der Schreibweise von metrischen Tensoren vor. $ds^2 = g_{11}dx^2 + g_{12}dxdy + g_{21}dydx + g_{22}dy^2$ Mit: $\begin{pmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	KU LB Tafel / OHP	Der induktive Weg zur Vorstellungen von metrischen Tensoren macht es den SuS einfacher den Sinn der neuen Schreibweise zu verdeutlichen.
3	Metrik der Kugel Induktionsschritt 2	L. stellt die Kugelkoordinaten vor und zeigt den SuS die zugehörige Metrik.	KU LB Tafel / OHP	Dieser zweite Schritt dient nicht nur zur Aufzeigung eines anderen Beispiels, es soll den SuS auch weitere mögliche Koordinatensysteme neben dem Kartesischen zeigen. Hierbei können Vorteile anderer KS diskutiert werden, hier bspw. bei der geometrischen Beschreibung auf der Erdoberfläche (Längen- und Breitengrad).
4	Metrik der Raumzeit Induktionsschritt 3	L. stellt die Aufgabe den metrischen Tensor der aus der vierten Stunde bekannten Minkowskimetrik aufzustellen. $ds^2 = c^2(dt)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2 \Leftrightarrow$ $g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$	GA sSA	Da die SuS bei der Herleitung von Metriken nur eher passiv in Erscheinung treten können, muss versucht werden jede eigenständige Schüleraktivität zu nutzen. Dadurch soll die Motivation der SuS gesteigert werden.
5	Das Schwarze Loch und seine Metrik	LB oder Schülerreferat über Schwarze Löcher. Vorstellung der Schwarzschildmetrik. Diskussion über Auffälligkeiten.	KU Referat OHP o. PC	Bei der Nennung dieses Objekts werden die SuS aktiviert, da in Filmen oder allg. in populärwissenschaftlichen Medien oft über Schwarze Löcher als zerstörerische astronomische Objekte gesprochen wird und somit unweigerlich Faszination hervorrufen. Die Metrik wird beim Vergleich mit der Kugelmetrik und bei der Untersuchung der Polstellen mathematisch analysiert, dadurch rückt die Stärke der Mathematik in den Fokus und unterstützt die mat. Kompetenzentwicklung.
6	Die Feldgleichung	Der L. gibt die Feldgleichung der ART an und erläutert sie kurz. Ergebnis: physikalisches Verhalten von Körpern entspricht den geometrischen Eigenschaften des Raumes.	KU LB	Die Lernenden können und sollen die Feldgleichung nicht verstehen. Ihnen soll nur klar werden, dass die Gleichung eine Äquivalenz zwischen dem physikalischen Verhalten von Körpern und den geometrischen Eigenschaften des Raumes aufzeigt. Wechselwirkung durch Geometrie.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

12. Stunde: Der Flammsche Paraboloid - Vereinfachte Herleitung des Krümmungsgraphen und mögliche Interpretationen

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Motivation	Der L. wiederholt die Schwarzschildmetrik und elementarisiert Sie. $\left(\vartheta = \frac{\pi}{2} \Leftrightarrow d\vartheta = 0; dt = 0; r > 0\right)$ $\Rightarrow ds^2 = \frac{1}{1-\frac{R_S}{r}} dr^2$	KU LB Tafel	Mathematisch muss die S-Metrik deutlich vereinfacht werden, damit die SuS ansatzweise die Möglichkeit haben weitere mathematische Schlüsse aus ihr zu ziehen.
3	Einbettung des Raums	L. stellt eine mögliche Einbettung von Räumen dar, um die Krümmung mathematisch darzustellen.	KU LB Tafel / OHP	Sehr schwierig für die SuS nachzuvollziehen und für den weiteren auch nicht unbedingt notwendig. Aus diesem Grund ist diese Erläuterung optional.
4	Problemlösung	L. zeigt die Raumkrümmung als Differentialgleichung. $ds^2 = dr^2 + dw^2$ dr : radialer Abstand dw : Krümmung Lösen der DGL.	KU entG Tafel	Diese Darstellung mit einem zugehörigen Bild kennen die SuS als die pythagoreische Lehrformel und ihre Differentiale aus der Einführung in die Differentialrechnung aus dem Mathematikunterricht. Die Lösung ist anspruchsvoll und wird gemeinsam mit den SuS entwickelt.
5	Ikonische Darstellung	Die aus Schritt 4 erhaltene Funktion wird für verschiedene R_S mit einem Funktionsplotter dargestellt. $w(r) = \pm 2R_S \sqrt{\frac{r}{R_S} - 1} + C$ Diskussion über die Graphen.	KU Referat OHP o. PC	Den Zusammenhang zwischen R_S und der Krümmung können die SuS sehr einfach erkennen und formulieren. Die Diskussion über das unbekannte Vorzeichen wird viele SuS motivieren (Wurmloch?). Eine mathematische Begebenheit bringt uns zu Phänomenen des Universums. Dadurch wird wiederum die Stärke der Mathematik in den Naturwissenschaften dargelegt.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

C.4. Austauschteilchenkonzept

1. Stunde: Bindung über Teilchen - Einführung des Austauschteilchenkonzeptes über das Yukawa-Teilchen

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Einführung, Bewusstmachung des Wissenstandes	Es wird die schematische Darstellung eines Atoms gezeigt und darüber diskutiert. Kernzusammenhalt? Kernkraft?	KU oUG Tafel / OHP	Wiederholung des bohrschen Atommodells und der Anziehung zwischen ungleichnamiger Ladungen. Die SuS werden wahrscheinlich die „ominöse“ Kernkraft nennen.
3	Motivation durch Unverständnis	Einstieg in eine mögliche Erklärung über die Betrachtung der kovalenten Elektronenpaarbindung.	KU entG OHP	Das Elektron tritt als Austauschteilchen auf und sorgt für die Bindung / Wechselwirkung zwischen zwei Atomen.
4	Blick in Historie	Lehrervortrag über die Ansichten von Hideki Yukawa, sein postuliertes Teilchen und den Kernzusammenhalt über diese Teilchen.	KU LV	Mit der Nennung von damaligen Physikern in der Geschichte wird eine persönliche Ebene in den Unterricht geführt, die die SuS motiviert.
5	Phase des divergierenden Denkens	L. gibt Impuls zur Postulierung weiterer Teilchen, um alle Bindungen zwischen den Nukleonen zu erklären. SuS sollen weitere Teilchen postulieren und die zugrundeliegende Reaktion darstellen.	EA / PA / GA TPS	Wiederholung der Ladungserhaltung als Erhaltungssatz. Motivation durch eigenständige „Denk-Forschung“. TPS soll die eigenständige Bearbeitung mit dem späteren Austauschpotential zw. den SuS verbinden.
6	Sicherung und Bedeutung	Die vier Austauschprozesse werden an der Tafel festgehalten und die Tragweite dieses Erklärungsmodells geklärt. Die SuS tragen die Ihnen bekannten Teilchen in ihren Laufzettel ein.	KU SB Tafel	Den SuS muss klar gemacht werden, dass dies ein neues Wechselwirkungsmodell neben dem bekannten Kraftkonzept und Feldkonzept darstellt.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

2/3. Stunde: Erweiterung von schon Bekanntem - Warum wird die Elektrodynamik zur Quantenelektrodynamik?

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Einführung, Bewusstmachung des Wissenstandes	Wurfexperiment mit SuS zur Veranschaulichung der möglichen Anziehung und Abstoßung über den Austausch eines Balls (Teilchen). L. diskutiert mit SuS über einen möglichen Ausbau der E-Dynamik mithilfe von Austauschteilchen. Was fehlt in der E-Dynamik? Welches Teilchen taugt als Austauschteilchen? Etc. Ergebnis: Photon als Austauschteilchen, neues Konzept muss alles Bekannte aber auch erklären können.	KU entG	Die E-Dynamik eignet sich aus zweierlei Hinsicht besser als die starke Kraft, um das Konzept näher zu erläutern. Zum einen haben die SuS eine bessere Vorstellung von diesem Themengebiet und kennen das hier auftretende Feldteilchen mit seinen Eigenschaften und zum anderen ist die Vorstellung vom vorher behandelte Austauschteilchen aus heutiger Sicht überholt und wird nur noch als grobes Modell genutzt.
3	Vorstellungsergründung	Der L. entwickelt mit den SuS eine Vorstellung über den Austauschprozess. Unschärferelation, Emissionswahrscheinlichkeit $\alpha = 1/137$ als relative Stärke der WW. Zu letzterem wird ein Gedankenexperiment vorgestellt	KU entG OHP	SuS werden vertraut mit Theorien und ihrer Entwicklung. Neue Theorien müssen bekannte Sachverhalte erklären können, sonst haben sie keine „Daseinsberechtigung“.
4	Altes neu gedacht	Es werden die Abstandsabhängigkeit und Reichweite der Wechselwirkung mathematisch hergeleitet.	KU entG Tafel	Die SuS sind dafür zu sensibilisieren, dass die Wechselwirkung über Teilchen schwer vorzustellen, aber mit bekannten Gesetzen vereinbar ist. Gedankenexperimente helfen sich den Sachverhalt besser vorzustellen.
5	Sicherung	Ein Schüler wiederholt das Neu-Gelernte. Erweiterung auf weitere Kräfte folgt in den nächsten Stunden.	KU SB	Die Aufzeigung, dass $F \sim r^{-2}$ gilt, bestätigt, dass die neue Theorie im Grunde stimmt und ein weiterer Ausbau sinnvoll ist. Mithilfe des neuen Konzeptes kann erstmals gezeigt werden, dass die Reichweite der em-WW unendlich ist, bei Feldern wurde das nur postuliert. Dadurch entsteht eine Motivation die neue Theorie weiter zu entwickeln. Neu Gelerntes wird nochmals zusammengefasst und wiederholt, damit die SuS ihr Wissen besser festigen können.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

4. Stunde: Vorstellungshilfe - Darstellungen von Prozessen mithilfe von Feynman-Diagrammen

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Konfrontation mit einem neuen Sachverhalt	Der L. legt kommentarlos eine Folie mit verschiedenen Feynman-Diagrammen auf. Die SuS sollen beschreiben und diskutieren.	KU oUG OHP	Methode <i>Stiller Impuls</i> Zunächst werden die SuS nur beschreiben, was sie sehen (ohne Deutung). Hier können gerade schwächere SuS Beiträge liefern (Achsen benennen, etc.) Bei der anschließenden Diskussion sollte besprochen werden, was die Punkte (P , V) und geraden (kurvigen) Linien bedeuten. L. gibt an passenden Stellen Impulse, falls die SuS auf eine „falschen Spur“ geraten.
3	Informationsstrukturierung	Im Plenum werden die dargestellten Prozesse analysiert und in einem Satz an der Tafel zusammengefasst.	KU entG	Zur Sicherung und zur später möglichen Wiederholung müssen die Ideen/Lösungen an der Tafel festhalten werden, besonders als Bsp. für Phase 5.
4	Anwendung	Der L. erklärt die folgenden Rechenanweisungen, die dem Diagramm entnommen werden können.	KU LB Tafel	Grundlage ist, dass dadurch weitergehende Aufgabenstellungen in dieser UR-Reihe möglich sind.
5	Sicherung durch sSA	Die SuS bekommen ein Aufgabenblatt zu Feynman-Graphen und bearbeiten es. Bei zeitlichen Problemen kann der Rest als HA bearbeitet werden.	EA / PA sSA AB	Für ein besseres Verständnis der Prozesse und zur Steigerung der Eigenaktivität sollen die SuS mithilfe der Beispiele aus Schritt 2 selber Aufgaben lösen. Zum einen können sie die Gesamtwahrscheinlichkeit mancher Feynman-Diagramme bestimmen und zum anderen können Sie bei Angabe einer Gesamtwahrscheinlichkeit mögliche Feynman-Graphen skizzieren. Die mögliche PA lockert das selbstständige Arbeiten etwas auf.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbstständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

5/6. Stunde: Beobachtungsmaschine - Funktionsweise und Gebrauch von Teilchendetektoren

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU / LB	
2	Konfrontation mit einem neuen Sachverhalt	L. legt Folie mit einem Bild von der Höhenstrahlung mit den sich ergebenden Kaskaden auf. Diskussion mit Verweis auf der Entdeckung des Yukawa-Teilchens. Weiterführung auf heutige Untersuchungsverfahren. L. gibt einem Impuls auf bekannte Teilchenbeschleuniger.	KU entG OHP	Methode <i>Stiller Impuls</i> Zunächst werden die SuS nur beschreiben was sie sehen (ohne Deutung). Hier können gerade schwächere SuS Beiträge liefern. Bei der anschließenden Diskussion soll erörtert werden, dass zur Untersuchung von Teilchen, Teilchenkollisionen dienen. Diese können einfacher und exakter auf der Erde untersucht werden. ⇒ Bau von Teilchendetektoren.
3	Verknüpfung mit Bekanntem	L. gibt einem Impuls auf bekannte Teilchenbeschleuniger. L. gibt die wichtigsten Komponenten an.	KU entG OHP / Tafel	Den LHC werden ggf. SuS aus den Medien bzw. Filme (Iluminati) kennen. Aus Zeitgründen elementarisiert der L. die sehr komplexe Maschine.
4	Stellung eines Arbeitsauftrags	Der Kurs wird in Gruppen eingeteilt, die sich mit den folgenden Bauteilen beschäftigen sollen: • Protonquelle • Ablenkung auf Kreisbahn • Fokussierung • Detektor (Aufsplitterung in äußeren und inneren Detektor.) Die SuS sollen bis zur nächsten Stunde einen kleinen Vortrag zusammenstellen.	GA sSA Material / Internet	Die SuS bekommen Materialien und adäquate Internetlinks. Der Vortrag sollte graphische Veranschaulichungen (Bilder, Animationen) enthalten, um die geistige Vorstellung zu vereinfachen.
5	Nächste Stunde: Vorstellung der Arbeitsergebnisse	Jede Gruppe stellt kurz ihr kleines Referat vor. Die Fokussierungs-Gruppe wird mit einem D.-Experiment vom L. unterstützt. Am Ende wird der komplette Teilchendetektor didaktisch rekonstruiert.	KU SB OHP / Beamer	Motivationssteigerung der SuS durch Beschäftigung mit aktueller physikalischer Forschung. Aufgrund der niedrigen Anzahl an möglichen Experimenten in dieser U-Reihe, sollte jedes genutzt werden. Die vorstellten Teilstücke müssen nun wieder gemeinsam zu einer Maschine zusammengefasst werden. Würdigung der sSA, da jedes Ergebnis wird gebraucht bei der Zusammenfassung.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

7. Stunde: Nicht elementar - Der Aufbau der Nukleonen

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reproduktion von schon Gelerntem	Im Plenum werden die Einheiten der Teilchenphysik aus der schon bekannten Kernphysik re-produziert.	KU entG OHP	Die SuS müssen sich daran gewöhnen, dass ihre bekannten Größen Energie, Masse und Impuls in Vielfachen von Elektronenvolt (eV) angegeben werden. Zur Unterstützung werden Beispiele durchgegangen.
3	Weckung eines Problembewusstseins	Der L. stellt die bis 1960 bekannten Teilchen mithilfe eines Zeitstrahls vor. Impuls: Möglichkeit die Komplexität zu mindern? Ziel: Teilchen sind wiederum aus Teilchen aufgebaut. (vgl. Periodensystem)	KU entG OHP	Verweis auf nichtverstandene Vielzahl. Manchen SuS wird bekannt sein, dass die bekannten Nukleonen aus Quarks aufgebaut sind. Ggf. ist dadurch eine Transferleistung möglich, dies auf weitere Teilchen auszubauen.
4	Verifizierungsmöglichkeit	Es wird ein Streuversuch mit Sand gezeigt, um eine Möglichkeit zur Klärung der These zu verdeutlichen. Streuung über eine große Kugel und Streuung über drei kleine Kugeln. Interpretation der Streubilder.	KU sSA DE	Zur Steigerung der Schüleraktivität sollen alle SuS nach vorne kommen und der Versuch von SuS durchgeführt werden. So wird ausgeschlossen, dass die SuS denken, der L. würde durch geschickte Streutechnik die verschiedenen Bilder erzeugen.
5	Lösungsvorschlag des Problems	L. legt eine Folie mit den Quarkkombinationen der Nukleonen auf, charakterisiert das <i>u</i> -und <i>d</i> -Quark mit ihren jeweiligen Antiteilchen. Verweis: Zusammenbau nur mit dem Ergebnis einer ganzzahligen Ladung.	KU LB OHP	Sehr frontal, eigenständige Entwicklung meines Erachtens nicht möglich. Die Beschäftigung mit diesem Themengebiet (Aufbau der Materie) ist bei den SuS aber meistens von vornherein sehr motivierend. Es ist nicht ratsam die SuS auf das Problem der drittelzahligen Ladung zu sensibilisieren, da dadurch die neuen Erkenntnisse recht schnell abgelehnt werden und die weitere Motivation für die Unterrichtsreihe sinken.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

8/9. Stunde: Nicht elementar - Der Aufbau der Teilchen und ihr Zusammenhalt.

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Fakten über Fakten	Der L. stellt weitere Quarks in einem historischen Rahmen vor. Dabei wird auf verschiedene Multipletts eingegangen (Spezieller Verweis auf die Postulierung und Fund des Ω^-). Einführung der Bezeichnungen Leptonen, Mesonen und Baryonen. Schema über den Aufbau der Nukleonen; Zusammenhalt über Gluonen. Auffälligkeit: Wechselwirkung zw. Gluonen	KU LB OHP	Aufgrund der Komplexität des Themas und der Einführung vieler Sachaspekte und Fachbegriffe ist dieser Unterrichtsschritt sehr lehrerzentriert. Vor der schematischen Darstellung der Nukleonen wird die bekannte Paarerzeugung und Paarvernichtung wiederholt. Rückschluss auf die Existenz der Seequarks kann nur über die große Anzahl an Ereignissen erklärt werden. Wichtig: Verweis auf die Virtualität $\Rightarrow$ keine Schwankung der Nukleonenmasse.
2	Neue Quantenzahl	Der L. stellt die neue Quantenzahl (Ladungsart) Farbe vor. Variante 1: Kurzer LV; Variante 2: Historische Problematisierung über das Pauliprinzip mit entwickelndem Plenumsgespräch. Grafik: Emission und Absorption von Gluonen im Proton (Verdeutlichung des Austauschprozesses.)	KU LB / entG OHP	Je nach Zeit wird V1, der darstellende LV gewählt, oder V2 der motivierendere historische Rahmen (exakter mit Hinführung). In beiden Fällen wird die Farbe auch als Ladung dargestellt und mit anderen Ladungsarten verglichen. Die Grafik symbolisiert gut den Austausch der Gluonen als Wechselwirkung. $\Rightarrow$ Stärkung des neuen Wechselwirkungskonzeptes.
3	Schaffung eines Problembewusstseins	L. legt Folie über den Quarkeinschluss auf. In der Diskussion wird erarbeitet, wie man sich die Nichtexistenz allein auftretender Quarks erklärt. Eingang auf relative Stärke.	KU entG OHP	Die Analogie zu einem Gummiband kann von den SuS selbst eingebracht werden.
4	Lösung des Problems des Kernzusammenhalts	Mit dem bisher erworbenen Wissen, kann der Kernzusammenhalt über die Restwechselwirkung der Gluonen erklärt werden. Graphische Darstellung eines Heliumkerns	KU LB OHP	Der Kreis schließt sich. Das zu Beginn der Reihe thematisierte Problem des nichtverstandenen Kernzusammenhalts wurde endlich gelöst. Motivation durch Lösung.
5	Forschung	Die SuS bekommen als HA die el. Ladungen von 4er- bzw. 5er-Quarkverbindungen zu untersuchen. Ergebnis: 4er Verbindung sind immer 2 Mesonen 5er Verbindung immer 1 Meson, 1 Baryon.	HA	Motivierend durch „eigene Forschung“. Eine berechnete Frage wird eigenständig untersucht. Könnte auch vom L. kurz dargestellt werden, aber so können die SuS selbständig eine Problemstellung lösen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

10/11. Stunde: Die schwache Kraft – Eine Erklärung des $\beta^\pm$ - Zerfalls mittels des Austauschteilchenkonzeptes.

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Anknüpfen an bisher Gelerntes	Wiederholung der letzten Stunde. Bei Nennung der Teilchenumwandlung gibt L. Impuls weitere Phänomene mit Teilchenumwandlung zu nennen. <i>Ziel: Radioaktiver Zerfall</i>	KU oUG	In den letzten beiden Stunden wurden sehr viele Fakten behandelt, die nur über Wiederholung gut in das Langzeitgedächtnis eingegliedert werden können. Die Anknüpfung wird kein Problem darstellen.
3	Reorganisation von schon Gelerntem	Wiederholung des radioaktiven Zerfalls mit den zugrundeliegenden Kernumwandlungen mithilfe einer Mindmap an der Tafel.	KU Mindmap Tafel	<i>Methode: Mindmap</i> Um die Wiederholung etwas aufzulockern sollen die SuS assoziierte Begriffe selber an die Tafel schreiben (auch körperliche Aktivierung). Der Unterschied kann von den SuS erkannt werden, sollte nur vom L. nochmals klar gemacht werden. Wichtig für den nächsten Schritt.
4	Schaffung eines Problembewusstseins	Vergleich der Prozesse: Starke WW und radioaktiver Zerfall. Einmal finden der Zusammenhalt statt, ein anderes Mal ein Elementwechsel. Über Ausschlussprinzip ist der ra. Zerfall nicht erklärbar über: starke, em- oder grav.- Wechselwirkung. Folglich: Eine neue Wechselwirkung	KU entG Tafel	Ausschluss der starken WW schwer für die SuS zu leisten. Aber die em- und grav. WW kann argumentativ von den SuS kommen.
5	Systematische Untersuchung	Die SuS informieren sich im Internet über die schwache Wechselwirkung. Dabei sollen Informationen über die Prozesse, die relative Stärke, die Austauschteilchen, die Reichweite etc. zusammengestellt werden.	PA sSA PC / Internet	Da die letzte Stunde schon sehr lehrerzentriert war, sollen die SuS motivational bedingt selbst die nötigen Informationen beschaffen. Da die starke und die em-WW ausführlich behandelt wurden, sollten die SuS reflektiert nach wichtigen Infos suchen können.
6	Sicherung	Im Plenum werden die wichtigsten Informationen zusammengetragen: Ra. Prozess im Teilchen- und Quarkbild, α_{weak} , Reichweite, Austauschteilchen mit ihren Massen.	KU SB Tafel / OHP	Jede Gruppe nennt eine Information, so wird jede S-Arbeit gewürdigt. Eine Sicherung / Zusammenfassung ist wichtig, damit jede Gruppe ihre Informationen komplettieren kann.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

12. Stunde: Das Standardmodell – Wiederholung der Reihe mithilfe der Einführung des Standardmodells

Nr.	Unterrichtsschritte	Sachaspekte	Sozialform Handlungsmuster Medien	Didaktisch-Methodischer Kommentar
1	Begrüßung	Begrüßung der SuS	KU LB	
2	Reorganisation von schon Gelerntem mit Anknüpfung an Neues	Der L. legt ein Bild des Standardmodells auf (Teilchenfamilien auf Treppenstufen). SuS kommentieren und L. erklärt die weiteren Familien mit den neuen Quarks und Leptonen.	KU LB OHP	Der Sachverhalt ist für die meisten von grundlegendem Interesse, da hier die Grundbausteine der Materie dargestellt werden.
3	Die Stufen	Diskussion und Erklärung über die unterschiedlichen Stufen. Was bedeutet es für die Teilchen auf dieser Stufe bzw. für Teilchen über/unter dieser Stufe zu stehen. Alles wird mit den zugehörigen Austauschteilchen verbunden.	KU entG OHP	Mit den bisher gewonnenen Erkenntnissen sind die SuS fachwissenschaftlich und kognitiv zu Interpretationen in der Lage.
4	Strukturieren und üben des bisher Gelerntem Sicherung I	Die SuS bekommen ein AB. Hier sollen die SuS Alltagsphänomene den wirkenden Grundkräften zuordnen. Besprechung der Übung.	EA / PA sSA AB	Mithilfe dieser Übung wird das Wissen verknüpft. Die SuS können direkt mögliche Kräfte wählen (Mit Handy telefonieren $\Leftrightarrow$ em-WW) oder müssen den Umweg über beteiligte Teilchen gehen und schauen an welchen WW's diese überhaupt teilnehmen.
5	Sicherung II	Die SuS bekommen ein Blatt auf dem alle elementaren Wechselwirkungen dargestellt werden. Oder: Gemeinsame Erarbeitung an der Tafel.	KU entG AB / Tafel	Je nach Zeit kann die Wiederholung auch gemeinsam an der Tafel erarbeitet werden.
6	Ausblick	- Einbettung der Gravitation in das Konzept. - Bedeutung des Higgs-Teilchens. - Teilchenphysik und Astronomie.	KU LB	Ein Ausblick kann motivierend für die SuS sein sich weiter bzw. tiefer mit der Materie auseinanderzusetzen.

Begriffserklärung: KU (Klassenunterricht), LB (Lehrerbeitrag), SB (Schülerbeitrag), AB(Arbeitsblatt), EA (Einzelarbeit), PA (Partnerarbeit), GA (Gruppenarbeit), sSA (selbständige Schülerarbeit), sEXP (Schülerexperiment), DE (Demonstrationsexperiment), oUG (offenes Unterrichtsgespräch), entG (fragend-entwickelndes Gespräch)

D. Literaturverzeichnis

- [AUS81] AUSUBEL, D.P. / NOVAK, J.D. / HANESIAN, H.: *Psychologische und pädagogische Grenzen des entdeckenden Lernens*. In: Neber, H. (Hrsg.). *Entdeckendes Lernen* Weinheim : Beltz, 1981 S.30-44
- [BAC79] BACKHAUS, Udo / SCHLICHTING, Hans Joachim: *Didaktische Überlegungen zur Einführung von Kraft und Masse*. In: *Der Physikunterricht* 13. Jg. 1979, Heft 1
- [BAR64] BARNES, V.E. et al.: *Phys. Rev. Lett.* **12**, 204 (1964)
- [BAR13] BARTH, Michael: *Felder im Physikunterricht*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 24. Jg. 2013, Heft 6
- [BEH08] BEHRENDT, Stephanie: *Einführung des 1. Newtonschen Axioms über den Impuls - Erprobung und Evaluation anhand einer schülerorientierten Unterrichtssequenz*. Erste Staatsarbeit. Universität Gießen, 2008
- [BER85] BERKELEY, George: *Schriften über die Grundlagen der Mathematik und Physik*. Aufl. 1. Frankfurt am Main: Suhrkamp, 1985
- [BET91] BETHGE, Klaus / SCHRÖDER, Ulrich E.: *Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen*. Aufl. 2. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1991
- [BEY09] BEYVERS, Gottfried / KRUSCH, Elvira: *Kleines 1*1 der Relativitätstheorie*. Aufl. 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [BLE10] BLECK-NEUHAUS, Jörn: *Elementare Teilchen - Moderne Physik von den Atomen bis zum Standardmodell*. Aufl. 1. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [BLE91] BLEICHROTH, Wolfgang et al.: *Fachdidaktik Physik*. Köln: Aulis-Verlag Deubner, 1991
- [BOR83] BORN, Max: *Physik im Wandel meiner Zeit*. Braunschweig: Vieweg, 1983
- [BRA11] BRANDT, Siegmund: *Geschichte der modernen Physik*. München: Verlag C.H. Beck oHG, 2011
- [BRE13] BRESSER, Klaus / RODE, Michael: *Die Struktur elektrischer Felder erkunden*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 24. Jg. 2013, Heft 6

- [BRO06] BRONSTEIN, Ilja N., et al.: *Taschenbuch der Mathematik*. Aufl. 6. Frankfurt am Main: Harri Deutsch GmbH, 2006
- [CAP35] CAPELLE, Wilhelm: *Die Vorsokratiker*. Stuttgart: Kröner, 1935
- [CRO77] CROMBIE, Alistair Cameron: *Von Augustinus bis Galilei: die Emanzipation der Naturwissenschaften*. München: Deutscher Taschenbuch-Verlag, 1977
- [DEM06a] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 1, Mechanik und Wärme*. Bd. 1. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006
- [DEM06b] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik*. Bd. 2. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006
- [DEM10] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 4, Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. Bd. 4. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2010
- [DES06] DESCARTES, René: *Die Prinzipien der Philosophie, übersetzt von Artur Buchenau*. II. Hamburg: 1906
- [DUD96] SCHOLZE-STUBENRECHT, Werner, et al.: *Duden, Rechtschreibung der deutschen Sprache*. Aufl. 21. Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich: Dudenverlag, 1996
- [DUD11] HOCHÉ, Detlef, et al.: *Duden - Lehrbuch Physik, Gymnasiale Oberstufe*. Aufl. 2. Berlin: Duden Paetec, 2011
- [EIN16] EINSTEIN, Albert: *Annalen der Physik - Die Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie*. Band. 49 1916, S. 769 bis 782
- [EIN69] EINSTEIN, Albert: *Grundzüge der Relativitätstheorie - Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*. Aufl. 5 Braunschweig: Vieweg, 1969
- [FARAD] FARADAY, Michael: *Experimentaluntersuchungen über Elektrizität*. II. Reihe, §231
- [FLI04] FLIESBACH, Torsten: *Allgemeine Relativitätstheorie*. Aufl. 5 Berlin , Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2006
- [FLI09] FLIESBACH, Torsten: *Mechanik - Lehrbuch zur Theoretischen Physik I*. Aufl. 6 Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2009
- [FLI08] FLIESBACH, Torsten: *Elektrodynamik - Lehrbuch zur Theoretischen Physik II*. Aufl. 5 Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2008
- [GEM06] GEMOLL, Wilhelm: *Griechisch-Deutsches Schul- und Handwörterbuch*. München, Wien: Oldenbourg, 2006

- [GIR13a] GIRWIDZ, Raimund / STORCK, Tim: *Felder - Fachinformationen und didaktische Orientierung zum Feldbegriff*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 24. Jg. 2013, Heft 6
- [GIR13b] GIRWIDZ, Raimund: *E-Feld: Verschiedene Darstellungsmöglichkeiten nutzen*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 24. Jg. 2013, Heft 6
- [GOE96] HUBERT, Goenner: *Einführung in die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie*. Aufl. 1 Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag, 1996
- [GRA88] GRAEWE, Herbert: *Atom- und Kernphysik - Grundlagen-Elementarteilchen-Atomhülle-Atomkern*. Aufl. 4. München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1988
- [GRE86] GREINER, Josef: *Dialektik des Kraftbegriffs in der Physik*. Aufl. 1. Wien: VWGÖ, 1986
- [GRO03] GROSCHKE, G. et al. (Hrsg.): *Teubner - Taschenbuch der Mathematik - Teil 2*. Aufl. 8. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2003
- [GRU07] GRUPEN, Claus: *Quantenchromodynamik* In: *ASTRONOMIE + RAUMFAHRT* 44. Jg. 2007, Heft 5
- [HAE76] HÄUSSLER, P. / LAUTERBACH, R.: *Ziele naturwissenschaftlichen Unterrichts*. Weinheim: Beltz, 1976
- [HAE95] HÄUSSLER, P. / HOFFMANN, L.: *Physikunterricht - an den Interessen von Mädchen und Jungen orientiert*. In: *Unterrichtswissenschaft*. 23. Jg. 1995, 107-126
- [HEL70] HELLER, Bruno: *Grundbegriffe der Physik im Wandel der Zeit*. Aufl. 1. Braunschweig: Vieweg + Sohn GmbH, 1970
- [HER87] HERMANN, Armin: *Lexikon Geschichte der Physik A-Z*. Aufl. 3. Köln: Aulis-Verlag Deubner, 1987
- [HER10] HERMANN, Friedrich: *Der Karlsruher Physikkurs, ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe II. Mechanik*. Aufl. 2. : Aulis-Verlag, 2010
- [HOE11] HOETTECKE, Dietmar / BARTH, Michael: *Geschichte im Physikunterricht*. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 22. Jg. 2011, Heft 6
- [ALT] HERRMANN, Friedrich: *Altlasten der Physik*. vgl. www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/altlast/index.html
- [HER95] HERRMANN, Friedrich: *Der Karlsruher Physikkurs*. In: *Praxis der Naturwissenschaft - Physik in der Schule* 44. Jg. 1995, Heft 5

- [HER14] HERRMANN, Friedrich: *Der Karlsruher Physikkurs - Unterrichtshilfen zu Band 1: Energie - Impuls - Entropie*. Karlsruhe: 2014
- [HER14] HERRMANN, Friedrich: *Der Karlsruher Physikkurs - Ein Lehrbuch für den Unterricht in der Sekundarstufe II - Elektrodynamik*. Karlsruhe: 2014
- [HIL96] HILSCHER, Helmut: *Elementare Teilchenphysik*. Aufl. 1. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1996
- [HOF88] HOFFMANN, Banesh: *Einsteins Ideen* Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 1988
- [HOE84] HÖFLING, Oskar, et al.: *Die Welt der kleinsten Teilchen* Hamburg: Rowohlt Verlag, 1984
- [HOL84] HOLTON, Gerald: *Themata - Zur Ideengeschichte der Physik* Braunschweig: Vieweg Verlag, 1984
- [HUN72] HUND, Friedrich: *Geschichte der physikalischen Begriffe* Mannheim, Wien, Zürich: BI Wissenschaftsverlag, 1972
- [IMP07] BREDTHAUER, Wilhelm, et al.: *Impulse Physik*. Aufl. 1. Stuttgart, Leipzig: Ernst Klett Verlag, 2007
- [ISH77] ISHIWARA, J.: *Einstein Koen-Roku*. Tokyo : Tokyo-Tosho, 1977
- [KER13] Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes NRW (Hrsg.): *Kernlehrplan für die SEK II GymGe in NRW*. Aufl. 1. Düsseldorf: 2013
- [KIR09] KIRCHER, Ernst / GIRWIDZ, Raimund / HÄUSSLER, Peter (Hrsg.): *Physikdidaktik*. Aufl. 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009
- [KLA62] KLAFKI, Wolfgang: *Didaktische Analyse als Kern der Unterrichtsvorbereitung* IN: ROTH, Heinrich / BLUMENTHAL, Alfred (Hrsg.): *AUSWAHL, Grundlegende Aufsätze aus der Zeitschrift - DIE DEUTSCHE SCHULE* - Berlin, Darmstadt, Dortmund, Hannover: Hermann Schroedel Verlag KG, 1964
- [KMK04] KMK: *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss*. München: Luchterhand, 16.12.2004
- [KMK15] KMK: *Förderstrategie für leistungsstarke Schülerinnen und Schüler*. 11.06.2015
- [KRA06] KRANZINGER, Franz: *Relativitätstheorie im Unterricht*. Stuttgart: Landesinstitut für Schulentwicklung, 2006
- [KOY88] KOYRE, A.: *Galilei, Die Anfänge der neuzeitlichen Wissenschaft*. Berlin: 1988

- [KRA05] KRAUS, Martin Ernst: *Alltagsvorstellungen bestimmen den Dynamikunterricht*. In: *Praxis der Naturwissenschaft - Physik in der Schule* 54. Jg. 2005, Heft 5
- [KRA12] KRAUSE, Eduard: *Dissertation zu „Das Erhaltungsprinzip in der Physik und seine Anwendung im Physikunterricht“*. Siegen: 2012
- [KUH06] KUHN, Wilfried (Hrsg.): *Handbuch der experimentellen Physik Sek.2 - Mechanik*. Bd. 1. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2006
- [KUH01a] KUHN, Wilfried (Hrsg.): *Handbuch der experimentellen Physik Sek.2 - Kerne und Teilchen II*. Bd. 10. Köln: Aulis Verlag Deubner, 2001
- [KUH01b] KUHN, Wilfried: *Ideengeschichte der Physik*. Aufl. 1. Wiesbaden: Vieweg, 2001
- [KUH16] KUHN, Wilfried: *Ideengeschichte der Physik - Eine Analyse der Entwicklung der Physik im historischen Kontext (Vorwort von Prof. Dr. O. Schwarz)*. Aufl. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2016
- [JOR13] JORDA, Stefan: *Kontroverse um Karlsruher Physikkurs*. In: *Physik Journal* 12. Jg. 2013, Heft 5
- [JUN83] JUNG, Walter: *Anstösse - Ein Essay über die Didaktik der Physik und ihre Probleme*. Frankfurt am Main, Berlin, München: Diesterweg, 1983
- [KUH00] KUHN, Wilfried (Hrsg.): *Kuhn Physik 2*. Bd. 1 und 2. Braunschweig: Westermann Verlag, 2000
- [KUZ70] KUZNECOV, B.G.: *Von Galilei bis Einstein*. Berlin: Akademie-Verlag GmbH, 1970
- [LAD02] LADE, Eckhard / FÖCKEL Hans-Jürgen: *Fertig ausgearbeitete Unterrichtsbausteine für das Fach Physik*. Kissing: WEKA MEDIA GmbH und Co. KG , 2002
- [LEH13] LEHN, Rudolf: *Eine entscheidende Klarstellung*. In: *Physik Journal* 12. Jg. 2013, Heft 5
- [LEM91] LEMMERICH, Jost: *Michael Faraday: 1791-1867 - Erforscher der Elektrizität*. München: Verlag C.H. Beck , 1991
- [LIC15] LICHTENEGGER, Klaus: *Schlüsselkonzepte zur Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag , 2015
- [MAX83] MAXWELL, James Clerk: *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus*. Bd. 1 Berlin: 1883
- [MAX95] MAXWELL, James Clerk: *Über Faradays Kraftlinien*. Leipzig: Verlag von Wilhelm Engelmann, 1895

- [MAY10] MAYRING, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse - Grundlagen und Techniken*. Aufl. 11 Weinheim, Basel: 2010
- [MET98] GREHN, Joachim (Hrsg.), et al.: *Metzler Physik*. Aufl. 3 Braunschweig: Bildungshaus Schulbuchverlag, 1998
- [MET07] GREHN, Joachim (Hrsg.), et al.: *Metzler Physik*. Aufl. 4 Braunschweig: Bildungshaus Schulbuchverlag, 2007
- [MEY73] MÜLLER, Hans-Heinrich: *Meyers Physik-Lexikon*. Mannheim: Meyers Lexikonverlag, 1973
- [MEY07] MEYER, Hilbert / MEYER, Meinert A.: *Wolfgang Klafki - Eine Didaktik für das 21. Jahrhundert?*. Weinheim, Basel: Beltz Verlag, 2007
- [MIN58] MINKOWSKI, Hermann: *Raum und Zeit*. In: Das Relativitätsprinzip, WBG Darmstadt, 1958
- [KLP08] MINISTERIUM FÜR SCHULE, JUGEND UND KINDER DES LANDES NRW: *Kernlehrplan für Gymnasium - Sekundarstufe I - in NRW, Physik*. Aufl. 1 Frechen: Ritterbachverlag, 2008
- [MIL81] MILLER, Arthur I.: *Albert Einstein's Special Theory of Relativity: Emergence: Discovery (1905) and Early Interpretation (1905-12)*. Boston: Addison Wesley Longman Publishing Co, 1981
- [MUE07] MÜLLER, Rainer / WODZINSKI, Rita / HOPF, Martin (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*. Aufl. 2 Köln: Aulis Verlag Deubner, 2007
- [NAC90] NACHTIGALL, Dieter / ZEYER, Günter: *Neues Physiklernen: Das Feldkonzept*. Bd. 2. Frankfurt am Main, Bern, New York, Paris: Peter Lang GmbH, 1990
- [NOL06a] NOLTING, Wolfgang: *Grundkurs Theoretische Physik 1 - Klassische Mechanik*. Aufl. 8. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006
- [NOL06b] NOLTING, Wolfgang: *Grundkurs Theoretische Physik 2 - Analytische Mechanik*. Aufl. 7. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2006
- [NOL07] NOLTING, Wolfgang: *Grundkurs Theoretische Physik 3 - Elektrodynamik*. Aufl. 8. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2007
- [OLO99] OLOFF, Rainer: *Geometrie der Raumzeit*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1999
- [PAI86] PAIS, Abraham: „*Raffiniert ist der Herrgott...*“ *Albert Einstein - Eine wissenschaftliche Biographie*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1986
- [PDG10] NAKAMURA, K. et al.: *Particle Physics Booklet*. Berkley, 2010

- [PHY08] DIEHL, Bardo et al.: *Physik Oberstufe Gesamtband mit Begleit-CD*. Aufl. 1 Berlin: Cornelsen Verlag, 2008
- [POC07] POCOVİ, M.C.: *The effects of a history-based instructional material on the students' understanding of field lines*. In: *Journal of Research in Science Teaching* 44. Jg. 2007, Heft 1, Seite 107-132
- [POP71] POPPER, Karl R.: *Logik der Forschung*. Tübingen: Mohr, 1971
- [POP64] POPPER, Karl: *Die Zielsetzung der Erfahrungswissenschaft*. In: *Hans Albert (Hrsg.): Theorie und Realität. Ausgewählte Aufsätze zur Wissenschaftslehre der Sozialwissenschaften*. J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), Tübingen 1964. S. 84.
- [POV04] POVH, Bogdan et al.: *Teilchen und Kerne - Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. Aufl. 6 Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 2004
- [RAB11] ESCHMANN, Matthias / WITTNEBEL, Anna-Greta (Hrsg.): *RAAbits Physik* Stuttgart: Dr. Josef Raabe Verlags-GmbH, 2011
- [SCH85] SCHECKER, Horst: *Dissertation zu „Das Schülervorverständnis zur Mechanik“*. Bremen: 1985
- [SCH30] SCHIMANK, Hans: *Geschichte des Energiebegriffs*. In: *Beiträge zur Geschichte der Technik und Industrie* Berlin, 1930, Bd. 20
- [SCH91] SCHIRRA, Norbert: *Die Entwicklung des Energiebegriffs und seines Erhaltungskonzeptes*. Aufl. 1. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 1991
- [SCH95] SCHMÜSER, Peter: *Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker*. Aufl. 2. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995
- [SCH95] SCHOTTENLOHER, Martin: *Geometrie und Symmetrie in der Physik*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1995
- [SCH02] SCHRÖTER, Uwe: *Allgemeine Relativitätstheorie mit Mitteln der Schulmathematik*. In: *DPG - Wege in der Physikdidaktik* Band 5 (Naturphänomene und Astronomie), Erlangen und Jena: Verlag Palm und Enke, 2002
- [SCH07] SCHWARZ, Oliver: *Das Wechselwirkungsprinzip in der Schule*. In: *ASTRONOMIE + RAUMFAHRT* 44. Jg. 2007, Heft 5
- [SEX79] SEXL, Roman / SCHMIDT, Herbert K.: *Raum-Zeit-Relativität*. Braunschweig: Friedr. Vieweg und Sohn, 1979
- [STA09] LEWANDOWSKY, Richard (Hrsg.): *STARK Physik - Unterrichtsmaterialien* Freising: Stark Verlag, 2009

- [STO94] STOWASSER, Josef-Maria: *STOWASSER*. Wien, München: Hölder-Pichler-Tempsky, 1994
- [STU79] STÜCKELBERGER, Alfred: *Antike Atomphysik*. München: Heimeran Verlag, 1979
- [TAU03] TAUSENDFREUND, Waldemar / REMUS, Rhea-Silvia / BERGEMANN, Carl Christoph: *Faszination Physik*. Norderstedt: Books on Demand GmbH, 2003
- [TUC82] TUCKER, R. Hrsg.: *Mathematical Papers*. London: 1882
- [WAG53] WAGENSCHN, Martin: *Gegen das Spezialistentum*. In: *Die Pädagogische Provinz* Jg. 1953, Heft 3
- [WAG10] WAGENSCHN, Martin: *Verstehen lehren*. Aufl. 5 Basel, Weinheim: Beltz Verlag, 2012
- [WAL89] WALOSCHEK, Pedro: *Schlüssel zur Physik*. Düsseldorf, Wien, New York: ECON Verlag, 1989
- [WAL89a] WALOSCHEK, Pedro: *Neuere Teilchenphysik - Einfach dargestellt*. Köln: Aulis Verlag, 1989
- [WAR79] WARREN, J.W.: *Verständnisprobleme beim Kraftbegriff*. Brunel University, London, 1979
Aus dem Englischen übersetzt von Udo Backhaus und Thorsten Schneider, 1998
- [WEB53] WEBER, H. Hrsg.: *Gesammelte Mathematische Werke*. Aufl. 2 New York: Dover Publications, 1953
- [WHE68] WHEELER, John Archibald: *Einsteins Vision*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1968
- [WHI53] WHITTAKER, Edmund T.: *A history of the theory of aether and electricity*. Vol. 2 London: Longmans, Green, and Co, 1953
- [WIL05] WILHELM, Thomas: *Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung*. In: *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Band 46, Berlin : Logos-Verlag, 2005
- [WIN07] WINNENBURG, Wolfram: *Gravitation - die Urkraft des Universums*. In: *ASTRONOMIE + RAUMFAHRT* 44. Jg. 2007, Heft 5

Internetquellen

- [RYF82] <https://de.wikipedia.org/wiki/Impetustheorie#/media/File:Buridan-impetus.jpg> [Abruf: 06.05.2016]
- [DPG13] www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen_gutachter/index.html [Abruf: 22.02.2014]
- [EIN14] <http://www.einstein-online.info/vertiefung/Aequivalenzprinzip> [Abruf: 01.10.2014]
- [EIS10] http://www.steiner-verlag.de/uploads/tx_crondavtitel/datei/9783515090728_p.pdf [Abruf: 20.08.2014]
- [HAI06] https://www.imst.ac.at/imst-wiki/images/7/78/299_Langfassung_Haider.pdf [Abruf: 20.08.2016]
- [KUH03] https://www.ph-freiburg.de/fileadmin/dateien/fakultaet3/physik/didakt_Potenzial_physikgeschichte.pdf [Abruf 14.05.2015]
- [SOL07] <http://www.solstice.de/teilchenphysik/> [Abruf: 13.05.2014]
- [TEI14] <http://www.teilchenphysik.de/> [Abruf: 13.05.2014]
- [TEM05] <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/projekt/node1.html> [Abruf: 24.04.2014]
- [TEM05] <http://www.tempolimit-lichtgeschwindigkeit.de/reiseziel/rei-seziel1.html> [Abruf: 24.04.2014]
- [FLA14] <http://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild-Metrikmedia-viewer/File:LorentzianWormhole.jpg> [Abruf: 10.11.2014]
- [UR15] http://www.uni-regensburg.de/physik/didaktik-physik/medien/VeranstMat/ExpSemgemMat/Mechanik/physikalischer_kraftbegriff_von_aristoteles_bis_new-ton_info-jr.pdf [Abruf: 15.08.2015]
- [NET15] https://tu-dresden.de/Members/michael.kobel/dateien/teilchenwelt_schulmaterialien_version1.pdf [Abruf: 11.08.2016]

Andere Quellen

- [NET13] NETZWERK TEILCHENPHYSIK: *Materialsammlung für Lehrkräfte*

E. Abbildungsverzeichnis

3.1. Zweidimensionale wissenschaftstheoretische Dependenz-Ebene. Die x- und y-Komponenten haben hierbei keinen absoluten Charakter, sie versinnbildlichen nur die theoretische Anschauung.	35
3.2. Wurf nach Avicenna.	42
3.3. Flugbahn Impetus-Theorie	42
3.4. Auflagedruck einer Kugel	50
3.5. Coulomb-Gesetz	64
3.6. Visualisierung des Gradienten	66
3.7. Visualisierung der Divergenz	66
3.8. Visualisierung der Rotation	67
3.9. Potentialanordnung Wassermolekül	72
3.10. Theatersitzplan [HAI06, 9, 39]	73
3.11. Raumzeit-Krümmung nach Einstein [WIN07, 17]	83
3.12. Raumzeit um einem Schwarzen Loch	92
3.13. Austauschteilchen in der QED	94
3.14. Mechanische Gravitationstheorie	97
3.15. Dekuplett von Baryonen	102
4.1. Kraft im KPK	116
4.2. Impulsstromrichtung [JOR13, 7]	116
4.3. Descartes Ätherwirbel [KUH16, 129]	120
6.1. Ablaufmodell skalierender Strukturierung [MAY10, 93]	144
6.2. Kraftkonzept in Qualitäten	181
6.3. Kraftkonzept in Qualität und Teilgebieten	181
6.4. Feldkonzept in Qualitäten	183
6.5. Feldkonzept in Qualität und Teilgebieten	183
6.6. Geometrisierungskonzept in Qualitäten	185
6.7. Geometrisierungskonzept in Qualität und Teilgebiete	185
6.8. Austauschteilchenkonzept in Qualitäten	187
6.9. Austauschteilchenkonzept in Qualitäten und Teilgebieten	187
6.10. Konzeptvergleich mit ihren Qualitäten	189
7.1. Trägheit bei aufgehängener Kugel	202
7.2. Experiment zu Newton II	203
7.3. Beschleunigung mit unterschiedlichen Antriebskräften	204
7.4. Drittes Newtonsche Axiom	205

7.5. Wechselwirkungs- vs. Kompensationskraft	207
7.6. Wechselwirkung nach Newton III mittels magnetischem Feld	208
7.7. Raumänderung um el. Körper	213
7.8. Watteflocken im E-Feld	214
7.9. Grieskörner im E-Feld	215
7.10. Ebene Schnitte von Feldlinienbildern [MET98, 183]	216
7.11. Messung el. Kraft	220
7.12. Coulomb-Gesetz	220
7.13. Eine positive Punktladung	225
7.14. Eine negative Punktladung	225
7.15. Zwei positive Punktladungen	225
7.16. Zwei negative Punktladungen	226
7.17. Eine positive und eine negative Punktladung	226
7.18. Feld im Kondensator	226
7.19. Elektrisches Potential und Feld einer Hohlkugel	228
7.20. Links: Vakuumglocke Rechts: Drahthaube	228
7.21. Utensilien	234
7.22. Grundlagen zum Krümmungsexperiment	234
7.23. Verkürzung durch Raumkrümmung	235
7.24. Krümmungsexperiment	236
7.25. Minkowski x-t-Diagramm	237
7.26. Zweidimensionales Minkowski-Diagramm	237
7.27. Zweidimensionaler Minkowski-Kegel	239
7.28. Invarianz der Länge in unterschiedlichen Bezugssystemen	241
7.29. Länge einer Weltlinie zwischen zwei Ereignissen	243
7.30. Darstellung des Parallelenaxioms nach Euklid.	245
7.31. Nicht-euklidische Erdoberfläche	245
7.32. Gedankenexperiment zu fallenden Körpern	248
7.33. Gedankenexperiment zur Schwerelosigkeit	248
7.34. Fallende Flasche	249
7.35. Gedankenexperiment zur Rotverschiebung	249
7.36. Gedankenexperiment zur Lichtablenkung	249
7.37. Raumzeit nach Einstein [WIN07, 17]	252
7.38. Schematischer Gravitationstrichter	253
7.39. Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne	255
7.40. Abstand im kartesischen Koordinatensystem	257
7.41. Zweidimensional gekrümmter Raum der Kugeloberfläche	258
7.42. Zur Berechnung des Flammschen Paraboloids	262
7.43. Graphen der $w(r)$ -Funktion für $R_S = \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; 3; 5$	263
7.44. Rotation der Einbettungsfunktion [FLA14]	263
7.45. Schematische Darstellung eines Atoms.	268
7.46. Kovalente Atombindung	268
7.47. Yukawa-Teilchen	269

7.48. Austauschteilchen in der QED	272
7.49. Tropfenversuch	273
7.50. Feynman-Graph	276
7.51. Fokussierung mittels Quadrupolmagnet	279
7.52. Erklärung Elektronenvolt	281
7.53. Zeitstrahl der entdeckte Teilchen bis 1962	282
7.54. Analogie-Streuexperiment	283
7.55. Baryonen-Multipletts	285
7.56. Darstellung des Aufbaus eines Protons	287
7.57. Farblose Quarkkombination	288
7.58. Emission und Absorption von Gluonen im Proton	289
7.59. Quarkeinschluss	290
7.60. Heliumkern	291
7.61. Der β^- -Zerfall	294
7.62. Das Standartmodell	296
7.63. em-Wechselwirkung im H-Atom	297
7.64. Darstellung elementarer Wechselwirkungen	298
7.65. Aufbau des Universums	299
7.66. Baum als Lebensraum	302
7.67. Baum als Stoffwechsler	302
7.68. Baum als Transportmittel	303
7.69. Baum als Stabilisator	303
9.1. Antworten auf die 6. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	322
9.2. Antwort auf die 7. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	324
9.3. Antwort auf die 6. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	331
9.4. Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (vorher)	341
9.5. Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (nachher)	349

F. Tabellenverzeichnis

3.1. Behandlung des Kraftkonzeptes aus fachdidaktischer Sicht in Büchern	53
3.2. Statische Maxwellgleichungen im cgs-System	67
3.3. Dynamische Maxwellgleichungen im cgs-System	68
3.4. Behandlung des Feldkonzeptes aus fachdidaktischer Sicht in Schulbü- chern	70
3.5. Alltagsbegebenheiten gegenüber gestellt mit den Eigenschaften/Begriffen des Feldes	73
3.6. Tabelle der Metriken im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie	87
3.7. Liste der Wechselwirkungen mit ihren jeweiligen Austauschteilchen und Eigenschaften (Werte aus [PDG10, 8 ff.])	105
4.1. Zuordnung physikalischer Größen im Rahmen des KPK [HER14, 18]	115
5.1. Status von Klafkis Fragen	138
6.1. WW-Konzepte in Kuhn Physik 2	179
6.2. WW-Konzepte in Impulse Physik	179
6.3. WW-Konzepte in Metzler Physik	179
6.4. WW-Konzepte in Duden Physik	180
6.5. WW-Konzepte in Cornelsen Gesamtband Oberstufe	180
7.1. Teilchenklassifizierung und deren Benennung	286
9.1. Antworten auf die 1. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	318
9.2. Antworten auf die 2. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	318
9.3. Antworten auf die 3. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	319
9.4. Antworten auf die 4. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	320
9.5. Antworten auf die 5. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	320
9.6. Antwort auf die 7. Frage zum Kraftbegriff (vorher)	324
9.7. Antworten auf die 1. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	328
9.8. Antworten auf die 2. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	328
9.9. Antworten auf die 3. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	329
9.10. Antworten auf die 4. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	329
9.11. Antworten auf die 5. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	330
9.12. Antworten auf die 7. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	332
9.13. Antworten auf die 8. Frage zum Kraftbegriff (nachher)	332
9.14. Antworten auf die 1. Frage zum Feldbegriff (vorher) (Mehrfachnen- nung möglich)	337

9.15. Antworten auf die 2. Frage zum Feldbegriff (vorher) (Mehrfachnennung möglich)	337
9.16. Antworten auf die 3. Frage zum Feldbegriff (vorher) (Mehrfachnennung möglich)	338
9.17. Antworten auf die 4. Frage zum Feldbegriff (vorher)	339
9.18. Antworten auf die 5. Frage zum Feldbegriff (vorher)	339
9.19. Antworten auf die 6. Frage zum Feldbegriff (vorher)	340
9.20. Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (vorher)	342
9.21. Antworten auf die 1. Frage zum Feldbegriff (nachher)	345
9.22. Antworten auf die 2. Frage zum Feldbegriff (nachher)	346
9.23. Antworten auf die 3. Frage zum Feldbegriff (nachher)	346
9.24. Antworten auf die 4. Frage zum Feldbegriff (nachher)	347
9.25. Antworten auf die 5. Frage zum Feldbegriff (nachher)	347
9.26. Antworten auf die 6a. Frage zum Feldbegriff (nachher)	348
9.27. Antworten auf die 6b. Frage zum Feldbegriff (nachher)	348
9.28. Antworten auf die 7. Frage zum Feldbegriff (nachher)	349