

KPK-Schülerinnen und -Schüler Energie und Entropie nicht unterscheiden.⁴⁹ Offen sind auch Fragen nach Kenntnissen über die Entropieerzeugung und dem Zusammenhang zwischen Irreversibilität und Entropieerzeugung.

■ Unterrichtsmaterialien

► http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk_material.html

Die Unterrichtsmaterialien zum Karlsruher Physikkurs stehen online unter einer Creative-Commons-Lizenz zur Verfügung. Sie umfassen Schulbücher für die Sekundarstufen I und II, Unterrichtshilfen sowie Hochschulskripte. Es gibt druckbare Versionen und Versionen für Tablet-Computer. Wir weisen auf folgende Materialien besonders hin:

6

Falk, G. und Herrmann, F. (1981). *Neue Physik – Das Energiebuch*. Hannover: Schroedel.

Es handelt sich um das Schülerbuch für den physikalischen Anfangsunterricht und stellt eines der Konzepte dar, die auf der Energie als eigenständiger Größe aufbauen. Dabei werden weder die Kraft noch die Prozessgrößen Wärme und Arbeit verwendet.

Herrmann, F. (Hrsg.) (2014). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I. Band 1 Energie – Impuls – Entropie*.

Herrmann, F. (Hrsg.) (2014). *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I: Unterrichtshilfen*.

Das Lehrbuch für den Physikunterricht in der Sekundarstufe I hat drei Bände, die das Themenspektrum der Schule abdecken. Die Unterrichtshilfen erläutern die physikalische Basis des Kurses, beschreiben die Experimente und geben praktische Hinweise für den Unterricht.

6.5 Energie vor Arbeit

In den traditionellen Ansätzen (► Abschn. 6.2) wird die Energie in der Mechanik über Kraft und Arbeit eingeführt. Mit den energetischen Betrachtungen in der Wärmelehre geht dann oft eine neue Konzeptualisierung der Energie einher, zum einen über Mischungsversuche als Wärmemenge – dies ist dann die Energie, die aufgrund eines Temperaturunterschieds vom Körper höherer zum Körper niedrigerer Temperatur übergeht – und zum anderen über die Reibungsarbeit, die mit einer Temperaturerhöhung verbunden ist und die innere Energie eines Körpers um die Energie $\Delta E = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta$ erhöht. Dass es sich bei der Wärme um eine Prozessgröße handeln soll, wird den Lernenden dabei in der Regel nicht klar. Energie- und Wärmelehre scheinen daher im traditionellen Unterricht nur unzureichend verbunden zu sein. Die an der Ludwig-Maximilians-Universität München

⁴⁹ Kesidou und Duit (1991) kommen zu einer ähnlichen Einschätzung.

entwickelte Unterrichtskonzeption von M. Bader und H. Wiesner zur Energie- und Wärmelehre durchbricht die klassische stoffdidaktische Anordnung Kraft–Arbeit–Energie an zwei Stellen. Zum einen werden anhand mechanischer Beispielvorgänge, die in kurzen Zeiträumen als reversibel angesehen werden können, die Energie als Erhaltungsgröße plausibel gemacht, die mechanische Energie eingeführt und der Energieerhaltungssatz der reversiblen Mechanik formuliert.⁵⁰ Die Arbeit wird in dieser Konzeption erst danach eingeführt: Arbeit wird an einem System verrichtet, um die mechanische Energie des Systems zu verändern. Zum anderen wird über die Betrachtung von mechanischen Phänomenen mit Reibung und der Energieerhaltung die Einführung der inneren Energie als Erweiterung der (äußeren) mechanischen Energie notwendig: Reibungsphänomene gehen mit Temperaturerhöhungen einher, die Änderung der inneren Energie ist bei festen Körpern unter Alltagsbedingungen dabei proportional zur Temperaturänderung. Die innere Energie kann also analog zur Arbeit durch die Wärme geändert werden, ohne dass Arbeit oder Wärme im Körper enthalten sind, vielmehr sind sie mit Prozessen der Energieänderung verbunden. Hierüber wird eine Beziehung zwischen Arbeit und Wärme hergestellt, die traditionelle Unterrichtsgänge systematisch nicht kennen. Dies ist die zweite stoffdidaktische Veränderung.

■ Verbindung zu traditionellen Konzeptionen

Die Münchner Unterrichtskonzeption stellt einen pragmatischen, entwicklungsorientierten Ansatz zur Erhöhung des Lernerfolgs dar: „Die Ergebnisse der Unterrichtspraxis zeigen immer wieder, dass die gewünschten Unterrichtsziele und Lernerfolge häufig nicht erreicht werden.“⁵¹ Der Ansatz hat den Vorteil, dass eine Verbindung zu traditionellen Konzepten bestehen bleibt; er soll also evolutiv-entwickelnd wirken und den Physikunterricht nicht ersetzend-disruptiv verändern. Die Konzeption hat sich z. B. im Bayerischen Gymnasiallehrplan für Physik in der Jahrgangsstufe 8⁵² und im dortigen Unterricht fest etabliert. Es deutet sich auch das Motiv an, auf Änderungen des gesellschaftshistorischen Kontexts reagieren zu wollen, hier die Ölkrise zu Beginn der 1970er-Jahre. Bader greift damit einen Ansatzpunkt von Backhaus und Schlichting auf und berücksichtigt den Begriff der Energieentwertung (► Abschn. 6.3).

Bader hat in einem weiteren Schritt Ergebnisse der physikdidaktischen Forschung bis etwa zur Mitte der 1990er-Jahre in seine Konzeption integriert. In der Tradition der Münchner Physikdidaktik (► Abschn. 1.4) werden insbesondere die Schülervorstellungen beim Unterrichtsgang berücksichtigt und thematisiert, z. B. die Vorstellung vom „kalten“ Metall, auf die an mehreren Stellen im Unterrichtsskriptum eingegangen wird. Zudem wird die Diskrepanz zwischen

50 Die Grundidee der Konzeption wurde bereits in der Frankfurter Arbeitsgruppe um Jung und Wiesner entwickelt (z. B. Jung, Weber und Wiesner 1977).

51 Bader (2001, S. 7).

52 ISB (o. J.) in der Fassung von 2009.

dem Arbeitsbegriff des Alltags und dem physikalischen Arbeitsbegriff⁵³ thematisiert, um den Erfahrungen der physischen Anstrengungen entgegenzuwirken, die mit dem Begriff Arbeit verbunden sind (Muckenfuß geht einen entgegengesetzten Weg, ► Abschn. 6.6). Bader benutzt Feynmans Bauklötzchenanalogie zur Verdeutlichung der Energieerhaltung: Ein Kind, bei Feynman „Dennis the Menace“, spielt mit seinen genau 28 Bauklötzchen. Wenn sich die Zahl ändert, ist die Mutter sicher, dass die Bauklötzchen irgendwo geblieben sind (weniger als 28) oder dass einige der Bauklötzchen einem anderen Kind gehören (mehr als 28).⁵⁴ Das Treibstoffkonzept der Energie wird nicht verwendet, da bei den Schülerinnen und Schülern eine nicht zielführende Gleichsetzung von Energie mit konkreten Brennstoffen als wahrscheinlich angesehen wurde. In der Wärmelehre werden als zusätzliche Elemente der 0. Hauptsatz sowie der 2. Hauptsatz der Thermodynamik berücksichtigt und es wird die Frage nach Reversibilität und Irreversibilität diskutiert.

■ Unterrichtsgang

Der Unterrichtsgang hat zwei Teile: 1) die mechanische Energie mit Energieerhaltung und Arbeit und 2) die Wärmelehre. Die ■ Tab. 6.2 zeigt vergleichend den inhaltlichen Aufbau der Konzeption in einer Übersicht gegenüber dem traditionellen Unterricht.

■ Mechanische Energie und Energieerhaltung

Bei der mechanischen Energie werden zuerst mechanische Phänomene mit Reibung betrachtet. Im Kontrast dazu stehen dann idealisierte reversible oder konservative idealisierte mechanische Systeme im Fokus (z. B. hüpfender Gummiball, Fadenpendel, Feder). Der Erhaltungsgedanke wird mit einer abstrakten Überlegung eingeführt: Da sich die Bewegung des hüpfenden Gummiballs identisch wiederholen lässt, gibt es in dem abgeschlossenen System Erde–Gummiball eine Größe, die während der Bewegung konstant bleibt: die Gesamtenergie. Nach dieser Einführung der Energieerhaltung werden die Experimente noch genauer betrachtet. Hieraus ergeben sich die Energiearten kinetische Energie, Höhenenergie und Spannenergie und es folgt die qualitative Diskussion von Energieumwandlungen. Erst danach werden die entsprechenden Gleichungen für verschiedene Energiearten hergeleitet. Dazu wird die potenzielle Energie als $E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$ als plausibel vorgestellt und festgelegt. Die Gleichungen für die kinetische Energie und die Spannenergie ergeben sich aus Experimenten zur Energieerhaltung. Es folgt eine vertiefte Betrachtung der Energieerhaltung anhand von Beispielen.

Bei abgeschlossenen mechanischen Systemen ändert sich die (mechanische) Energie nicht, bei nicht abgeschlossenen schon. Die physikalische Größe Arbeit wird zur Beschreibung dieser Energieänderung eingeführt. Es wird erklärt, dass man dazu auch sagt, es werde Arbeit verrichtet. Erst jetzt werden Beispiele und verschiedene Formen von Arbeit betrachtet. Im Zusammenhang damit werden insbesondere das Hochheben und Tragen eines Koffers diskutiert und die Verrichtung

⁵³ Bader (2001, S. 17).

⁵⁴ Feynman, Leighton und Sands (2016, ► Kap. 4).

■ **Tab. 6.2** Gegenüberstellung des traditionellen Unterrichtskonzepts und der Münchner Unterrichtskonzeption zur mechanischen Energie- und Wärmelehre (nach Bader 2001, S. 44 f.)

	konventionelles Unterrichtskonzept	Münchener Unterrichtskonzept
	Mechanik	
Reibung	bei beiden gleich behandelt	
Energie und Arbeit	Betrachtung mechanischer Maschinen (Fortführung aus der 8. Klasse) $\Rightarrow F \cdot s = \textit{konstant}$ \Downarrow $\textit{Arbeit} := F \cdot s$ \Downarrow $\textit{Energie} := \textit{gespeicherte Arbeit}$ Energiearten, Energieumwandlungen, dann Energieerhaltungssatz	Energieerhaltungssatz \Rightarrow Energiearten \Downarrow Motivation mit nicht abgeschlossenen Systemen $\textit{Arbeit} := \Delta E$ und $\textit{Arbeit} := F \cdot s$ \Downarrow mechanische Maschinen betrachtet unter dem Blickwinkel des Energieerhaltungssatzes
Wirkungsgrad, Leistung	bei beiden gleich behandelt	
	Wärmelehre	
innere Energie	zu einem späteren Zeitpunkt	Der Energieerhaltungssatz erfordert eine neue Energieform, die innere Energie
Temperatur	Temperaturmessung	Temperaturmessung, 0. Hauptsatz der Thermodynamik
ideales Gas	Volumenausdehnung verschiedener Körper \Downarrow Gesetz des idealen Gases	zu einem späteren Zeitpunkt
innere Energie, Wärme	Reibungsarbeit bewirkt Änderung der inneren Energie $\Delta E_i = W_R = cm\Delta\vartheta$ (Energieerhaltungssatz) \Downarrow $\textit{Wärme } Q := \Delta E_i$ (bei Temperaturänderung)	Bei der Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie ergibt sich mithilfe des Energieerhaltungssatzes: $\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$ \Downarrow 1. Hauptsatz der Thermodynamik
reversible und irreversible Prozesse	zu einem späteren Zeitpunkt	2. Hauptsatz der Thermodynamik
Aggregatzustand	bei beiden gleich behandelt	
ideales Gas	bereits früher behandelt	Voruntersuchung zur technischen Nutzung der inneren Energie \Rightarrow Gesetz des idealen Gases
Wärmekraftmaschinen mit reversiblen und irreversiblen Vorgängen	Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie \Rightarrow reversible und irreversible Prozesse; Energieentwertung	Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie \Rightarrow andere Betrachtung des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre; Energieentwertung

der (physikalischen) Arbeit. Im Anschluss daran werden der Hebel, der Flaschenzug und die schiefe Ebene in Hinsicht auf Energieerhaltung und die verrichtete Arbeit diskutiert sowie die (mechanische) Leistung und der Wirkungsgrad. Schließlich folgt die Betrachtung von Kraftwandlern mit als bekannt vorausgesetzten Formeln (Hebelgesetz, Flaschenzug, schiefe Ebene). Mithilfe des Energieerhaltungssatzes werden diese deduktiv hergeleitet und anschließend experimentell bestätigt.

Die Inhalte zur mechanischen Energie werden demnach in umgekehrter Reihenfolge zur sonst üblichen Praxis unterrichtet. Der traditionelle Unterricht betrachtet zuerst mechanische Maschinen und findet die Goldene Regel der Mechanik ($F \cdot s = \text{konstant}$), die zur Größe Arbeit $W = F \cdot s$ führt. Die Münchner Unterrichtskonzeption beginnt wie oben geschildert mit dem Energieerhaltungssatz, um Vertrauen in die Existenz dieser Erhaltungsgröße zu schaffen. Erst danach wird die Arbeit als Energiedifferenz, d. h. als die Änderung der Gesamtenergie eines nicht abgeschlossenen Systems oder als Energieübertrag zwischen Teilsystemen eingeführt. Erst am Ende des Unterrichtsgangs werden mechanische Maschinen und die Goldene Regel thematisiert.

6

■ Wärmelehre

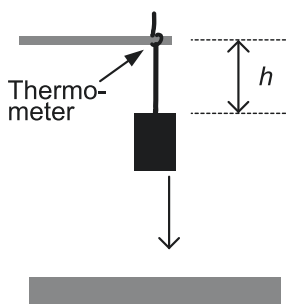
Im ersten Schritt zur Wärmelehre betritt die Reibung bei mechanischen Phänomenen wieder die didaktische Bühne. Bei Reibung ist eine Erwärmung der am Prozess beteiligten Körper zu beobachten; deren Temperatur nimmt zu. Da der Energieerhaltungssatz allgemein gilt, wird argumentiert, dass die mechanische Energie erweitert werden muss. Neben der (äußeren) mechanischen Energie hat der Körper selbst Energie: diese heißt innere Energie. Die Temperaturänderung – es werden hier Erhöhungen betrachtet – ist ein Maß für die Änderung der inneren Energie.⁵⁵ Die Gesamtenergie besteht aus (äußerer) mechanischer und innerer Energie.

Die eigentliche Wärmelehre beginnt mit dem 0. Hauptsatz der Thermodynamik, der über das thermische Gleichgewicht zweier Körper formuliert wird. Dann werden unterschiedliche Thermometer in ihrer Funktion vorgestellt. Dem schließt sich eine kurze mikroskopische Betrachtung der inneren Energie an. Über die Brown'sche Bewegung („ungeordnete Teilchenbewegung“) wird plausibel gemacht, dass sich die innere Energie aus der Summe der kinetischen Energien aller z. B. Wassermoleküle und der Summe ihrer potenziellen Energie zusammensetzt. Diese Mikroebene ist notwendig, da im Münchner Konzept die Kelvinskala für die Temperatur verwendet wird: Die Temperatur von 0 K ist die Temperatur, bei der den Teilchen eines Körpers keine Energie mehr entzogen werden kann. Im Weiteren spielt die mikroskopische Betrachtung der inneren Energie eine untergeordnete Rolle.

Es erfolgt die „Änderung der inneren Energie auf thermische Art“⁵⁶. Die Formel $\Delta E_i = cm\Delta T$ soll entwickelt werden. Hierfür wurde in der Münchner Konzeption ein zentraler neuer Versuch entwickelt (■ Abb. 6.6): Eine Schnur mit einem 1 kg-Massenstück soll sich langsam nach unten bewegen. Die Schnur wird

55 „Unter der inneren Energie versteht man diejenige Energie, die übrig bleibt, wenn man von der Gesamtenergie des Systems die äußere, rein mechanische Energie (kinetische oder potentielle) Energie abzieht.“ (Bader 2001, S. 73).

56 Bader (2001, S. 42).



■ **Abb. 6.6** Umwandlung von Höhenenergie in innere Energie (Skizze nach Bader 2001, S. 45; Versuchsaufbau nach Wiesner und Waltner (2009); die Schnur, an der das 1-kg-Massestück hängt, ist um einen Temperaturfühler gewickelt (s. Ausschnittvergrößerung))

um ein Thermometer gewickelt (Thermoelement). Damit die Reibung lokalisiert bleibt, muss die Schnur samt dem Thermometer zwischen zwei Styroporteile eingeklemmt werden; Thermometer, Schnur und Styropor erwärmen sich. Anhand des Versuchs wird gezeigt, dass die Strecke h , um die das Massestück nach unten sinkt, proportional zur Temperaturerhöhung ist: $h \propto \Delta T$. Die Proportionalität der Änderung der inneren Energie zur Masse des Thermometers (bei gleicher Temperaturänderung) wird mit einem Gedankenversuch hergeleitet; die Materialabhängigkeit wird mitgeteilt.

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik lautet im Münchner Konzept: „Die innere Energie E_i eines Körpers kann durch Arbeit W und Wärme Q verändert werden, $E_i = W + Q$ (...) Ein Körper hat Energie; er hat weder Arbeit noch Wärme. Unter Arbeit und Wärme versteht man die übertragene Energiemenge.“⁵⁷

Wie in der traditionellen Wärmelehre sind die Wärmeleitung, die Konvektion und die Wärmestrahlung Themen des Unterrichts. Neu hinzu kommen der 2. Hauptsatz der Thermodynamik und Irreversibilitätsbetrachtungen. Der 2. Hauptsatz wird phänomenologisch begründet und über die Wärme formuliert: Wärme kann von selbst nur von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur übergehen.

Der Unterrichtsgang endet mit der Physik des idealen Gases und der technischen Nutzung der inneren Energie. Innere Energie lässt sich über die Expansion eines Gases in mechanische Energie umwandeln. Gasturbine, Benzinmotor und Wärmekraftmaschinen werden erklärt sowie die Energieentwertung als immer auftretender Energieverlust bei technischer Nutzung eingeführt, ohne allerdings den Terminus Energieentwertung explizit zu benutzen. Es handelt sich eher um einen dissipativen Ansatz und eine genaue Analyse der Energiebilanz.

⁵⁷ Bader (2001, S. 7).

■ Empirische Ergebnisse

Bader (2001) hat seinen Unterrichtsgang in Klassenstufe 9 an mathematisch-naturwissenschaftlichen Gymnasien in Bayern in einer quasi-experimentellen Versuchs-Kontroll-Gruppe-Studie mit einer ad-hoc-Stichprobe als Nachtest evaluiert. Die Versuchsgruppe umfasste 92 Schülerinnen und Schüler in fünf Klassen mit vier Lehrpersonen. Die Kontrollgruppe umfasste 119 Schülerinnen und Schüler in sechs Klassen mit ebenfalls vier Lehrpersonen. Intelligenz und Vorwissen der Schülerinnen und Schüler wurden kontrolliert. Die Stichproben waren hinsichtlich dieser Variablen vergleichbar.

Die Schülerinnen und Schüler, die nach der Münchner Konzeption unterrichtet wurden, haben in einem Test mit physikalischen Fragen zur mechanischen Energie (14 erreichbare Punkte) und zur Wärmelehre (13 erreichbare Punkte) doppelt so viele Fragen richtig beantwortet wie die traditionell unterrichteten Schülerinnen und Schüler. In Mechanik war der Unterschied etwas kleiner als in der Wärmelehre. In der Mechanik lösten die Schülerinnen und Schüler der Versuchsgruppe nicht nur bei der Anwendung von $W = \Delta E$ doppelt so viele Aufgaben richtig wie die in der Kontrollgruppe, sondern sogar mehr Aufgaben bei der Anwendung von $W = F \cdot s$, was eigentlich im traditionellen Unterricht stärker betont wird. Bei der traditionell unterrichteten Kontrollgruppe zeigte sich ein signifikanter Jungenvorteil beim Lernstand; bei der Münchner Konzeption hatten die Mädchen einen numerischen Vorteil.

Die Evaluation spricht für einen stoffdidaktischen Effekt – oder eben einen Sachstruktureffekt: Der Beginn mit der mechanischen Energie und die nachfolgende explizite Verknüpfung von Wärme und Arbeit führen offenbar zu einer besseren physikalischen Begriffsbildung als das traditionelle Vorgehen über Kraft und Arbeit. Hierfür spricht auch ein Nebebefund von Bader: Im Vorwissenstest verfügten die Schülerinnen und Schüler beider Gruppen nicht über ein tragfähiges Kraftkonzept. Beim Münchner Konzept ist dies auch nicht prominent notwendig, während es in der traditionellen Vorgehensweise vorausgesetzt wird. Insgesamt zeigt sich, dass Arbeit und Wärme schwierig zu erlernende physikalische Konzepte sind.

In der Münchner Arbeitsgruppe um Wiesner wurde die Konzeption weiterentwickelt und um einige Experimente ergänzt.⁵⁸ Im Zuge der weiter entwickelten Konzeption wurde eine weitere Vergleichsuntersuchung durchgeführt. Ebenso wie in der Studie von Bader zeigte sich auch hier, dass mit dem Münchner Konzept der Lernerfolg mit großen Effektstärken gesteigert werden kann.⁵⁹

■ Unterrichtsmaterialien

Bader, M. (2001). *Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie- und Wärmelehre“* (Diss.). München: Ludwig-Maximilians-Universität, Fakultät für Physik (► [Materialien zum Buch](#)). In der Dissertation von Bader (2001) finden sich insbesondere der Schüler- und der Lehrertext. Die Tests und Testergebnisse sind ausführlich dokumentiert.

⁵⁸ Wiesner und Waltner (2009).

⁵⁹ Wiesner und Waltner (2009).

Bader, M. und Wiesner, H. (1999). Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre. Das „Münchener Unterrichtskonzept“. *Physik in der Schule* (6), 363–367.

Der Zeitschriftenaufsatz gibt einen Überblick über das Münchener Konzept, vergleicht ihn mit dem traditionellen Unterrichtsgang und stellt insbesondere den genannten neuen zentralen Versuch zur Umwandlung von mechanischer in innere Energie vor. In Wiesner und Waltner (2009) findet sich eine Weiterentwicklung der Konzeption.

Deger, H., Gleixner, Chr., Pippig, R. und Worg, R.: *Galileo. Das anschauliche Physikbuch, Ausgabe für Gymnasien in Bayern 8. Jahrgangsstufe*. München: Oldenbourg 2006.

Wie in der Mechanik Energie und Arbeit unterrichtet wird, kann man beispielsweise an den bayerischen Schulbüchern sehen. Das angegebene Buch ist ein gutes Beispiel dafür.

6.6 Energie in sinnstiftenden Kontexten

■ Physikdidaktische Grundlagen

In der von Muckenfuß entwickelten Konzeption sollen die Lernenden erworbene physikalische Kenntnisse und Fähigkeiten als hilfreich und wertvoll für die Bewältigung und Deutung ihrer gegenwärtigen und künftigen Lebenssituation wahrnehmen und damit eine „Sinnstiftung“ erfahren.⁶⁰ Die physikdidaktische Grundfrage lautet, ob und wann im Lebensweltkontext der physikalische Energiebegriff notwendig ist. Zwei Extremfälle sollen vermieden werden: auf der einen Seite ein physikalischer Energiebegriff, der Lernende nicht erreicht, da er nicht an ihr Wissen anknüpfen kann oder will; auf der anderen Seite die Trivialisierung des physikalischen Energiebegriffs als Sprache über einen ökonomischen Mangel oder über konkrete oder abstraktere „Treibstoffe“, die der physikalisch-wissenschaftlichen Bedeutung der Energie nicht gerecht werden kann. Muckenfuß schlägt in seinem didaktischen Ansatz einen Weg vor, der Fach- und Schülerorientierung auszubalancieren sucht. In seiner Konzeption können die Schülerinnen und Schüler die Energieumsätze als eigene körperliche – oder physiologische – „Leistung“ erfahren (im doppelten Sinne als alltägliches und als physikalisches Verständnis von „Leistung“). Sie entwickeln anhand von Tätigkeiten und körperlichen Bewegungen eine Vorstellung davon, „wie viel Watt“ sie umsetzen können. Damit können sie auch die Leistung von elektrischen Geräten vorhersagen.

⁶⁰ In seinem didaktischen Grundlagenwerk begründet Muckenfuß (1995) die fachdidaktische Basis seiner Arbeiten theoretisch. Muckenfuß folgt hier den Prinzipien der Curriculumentwicklung von Robinsohn (1972), die in Deutschland die rein fachlich orientierten Ansätze erweitert haben.