Beiträge zum Physikunterricht

Anwendung der Mathematik im Physikunterricht

Beiträge zum Physikunterricht

Anwendung der Mathematik im Physikunterricht

Klaus Liebers

Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1983

Autor: Dr. sc. Klaus Liebers

1. Auflage
Ausgabe 1983
Lizenz-Nr. 203/1000/82 (E 022166-1)
LSV 0645
Redaktion: Bettina Rosenkranz
Zeichnungen: Heinz Grothmann
Einband: Werner Fahr
Typografische Gestaltung: Atelier vwv
Printed in the German Democratic Republic
Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer", 5820 Bad Langensalza
Schrift: 9/10 Extended Monotype
Redaktionsschluß: 26. 2. 1982
Bestell-Nr. 707 74 35
DDR 8,80

Inhalt

Vorwort

„In meiner langjährigen Lehrtätigkeit ist mir immer die Erfahrung entgegengetreten, daß die Schwierigkeiten, mit denen der Studierende beim ersten Betreten des Gebiets der theoretischen Physik zu kämpfen hat, häufig weniger die mathematische Form, als vielmehr den physikalischen Inhalt der ihm dargebotenen Gedankengänge betreffen. Nicht das Rechnen mit den Gleichungen, sondern das Aufstellen und namentlich auch das Interpretieren derselben ist es, was ihm am meisten zu schaffen macht.“

(M. Planck [1; S. III])

Diese von Max Planck vor einem halben Jahrhundert ausgesprochene Erfahrung ist heute noch genauso aktuell wie damals. Sie gilt nicht nur für Studenten, sondern ebenso für Schüler im Unterricht. Mit dem vorliegenden Buch bemühen wir uns, einen Beitrag zur Überwindung dieser Probleme im Physikunterricht zu leisten.

In der Physikmethodik und in den Lehrbüchern kann man beim Herangehen an die Anwendung der Mathematik im Physikunterricht zwei unterschiedliche Standpunkte feststellen. Diese kann man als mathematisch motivierte bzw. als physikalisch motivierte Anwendung der Mathematik bezeichnen. Bei der mathematisch motivierten Anwendung der Mathematik im Physikunterricht wird mathematisch argumentiert. So erfolgt zum Beispiel die Einführung einer physikalischen Größe durch Namensgebung für einen konstanten Quotienten, für einen Proportionalitätsfaktor oder für ein häufig wiederkehrendes Produkt. Bei der physikalisch motivierten Anwendung der Mathematik im Physikunterricht wird hingegen physikalisch argumentiert, man sucht nach einer Definitionsgleichung, mit der eine zuvor erkannte physikalische Eigenschaft zahlenmäßig angegeben werden kann. Die Erfahrungen aus der Schule zeigen, daß bei einer mathematisch motivierten Anwendung der Mathematik zwar die überwiegende Mehrheit der Schüler die Definitionsgleichung physikalischer Größen angeben kann, die Frage nach der physikalischen Bedeutung dieser so definierten Größe können dann aber meistens nur noch sehr wenige Schüler zufriedenstellend beantworten. Dagegen zeigen die Erfahrungen auch, daß in der allgemeinbildenden Schule bei einer physikalisch motivierten Anwendung der Mathematik ein größeres Interesse und auch ein tieferes Verständnis für die Physik entwickelt werden können. Dies ergibt sich vor allem daraus, daß bei dem physikalisch motivierten Herangehen an die Anwendung der Mathematik in der Physik viel bessere Möglichkeiten für ein Anknüpfen des Unterrichts an die Erfahrungswelt der Schüler, an historische Problemstellungen aus der Physik und an das logische Denken der Schüler bestehen.

Daher legen wir diesem Buch für den Unterricht in der Oberschule eine physikalisch motivierte Anwendung der Mathematik zugrunde. Im Unterricht der Abiturstufe kann es zur Vorbereitung der Schüler auf eine physikalische oder eine technische Studienrichtung nützlich sein, ihnen an ausgewählten Beispielen am gleichen Unterrichtsstoff im Anschluß an die physikalisch motivierte Anwendung der Mathematik auch noch das Vorgehen bei der mathematisch motivierten Anwendung der Mathematik im Physikunterricht zu zeigen.

Ausgangspunkt für unsere methodischen Vorschläge sind eine Untersuchung des Erkenntnisprozesses bei der Anwendung der Mathematik in der Physik als Wissenschaft und die didaktischen Prinzipien des Unterrichts. Hierauf aufbauend werden zunächst Vorschläge abgeleitet, wie bei den verschiedenen typischen Anwendungen der Mathematik im Physikunterricht vorgegangen werden kann. Diese Vorschläge sind als ein Leitfaden für den Lehrer gedacht. Sie stellen keine starren Regeln dar. Innerhalb der einzelnen Schritte sind in Abhängigkeit von der physikalischen Spezifik des jeweiligen Unterrichtsstoffes, in Abhängigkeit von der Klassenstufe und in Abhängigkeit von den konkreten Zielen des Lehrplans bei der Behandlung der einzelnen physikalischen Größen und Gesetze sowie in Abhängigkeit von den Besonderheiten der einzelnen Klassen bestimmte Variationen und Akzentverschiebungen möglich und notwendig. Das gilt insbesondere auch für den Zeitaufwand, den der Lehrer für die einzelnen Schritte plant.

Um den Nutzen des Buches für den Lehrer zu erhöhen, werden die dargelegten Empfehlungen an zahlreichen Beispielen illustriert. Diese Beispiele sind so ausgearbeitet, daß sie vom Lehrer unmittelbar für die Vorbereitung und Durchführung des Unterrichts genutzt werden können.

1. Zur Rolle der Mathematik im Physikunterricht

1.1. Die Mathematik als Voraussetzung zur Erkenntnis und exakten Formulierung von Gesetzen in der Physik

„Die Alten hielten ... die Mechanik für sehr wichtig bei der Erforschung der Natur, und die Neuern haben, nachdem sie die Lehre von den substantiellen Formen und den verborgenen Eigenschaften aufgegeben, angefangen, die Erscheinungen der Natur auf mathematische Gesetze zurückzuführen."

(I. Newton [2; S. 1])

Die Physik als Wissenschaft entstand und entwickelte sich als untrennbare Einheit von experimenteller Forschung und theoretischer Durchdringung der experimentellen Tatsachen. Daher gibt es strenggenommen keine Trennung der Physik in Experimentalphysik und theoretische Physik, sondern nur eine Arbeitsteilung zwischen Experimentalphysikern und theoretischen Physikern.
In der *Experimentalphysik* werden aus der exakten Beobachtung und aus dem planvollen, unter kontrollierten und vereinfachten Bedingungen durchgeführten Versuch, dem Experiment, Kenntnisse über qualitative und quantitative Zusammenhänge der untersuchten physikalischen Erscheinungen gewonnen. Diese Ergebnisse werden zu Erfahrungssätzen verallgemeinert, die innerhalb bestimmter Vereinfachungen eine ganze Klasse von Erscheinungen beschreiben. Im Zusammenhang mit einer mathematischen Formulierung von Erfahrungssätzen werden in der Experimentalphysik solche Größen definiert, deren Messung die empirischen Tatsachen einer mathematischen Analyse zugänglich machen. Die quantitativen Zusammenhänge werden in Diagrammen dargestellt oder durch eine numerische Auswertung der Meßergebnisse als Gleichungen formuliert, die von den Werten physikalischer Größen näherungsweise erfüllt werden.
In der *theoretischen Physik* werden die von der Experimentalphysik aufgefundenen Erfahrungssätze als gegeben vorangestellt. Der theoretische Physiker ist bemüht, die Ergebnisse der Experimentalphysik zu Prinzipien und Grundgesetzen zusammenzufassen. Aus diesen Prinzipien und Grundgesetzen können durch mathematische Deduktionen genaue Aussagen über bereits bekannte bzw. bisher unbekannte Zusammenhänge abgeleitet werden, die experimentell überprüft werden. Dies führt zu einer Bestätigung oder Widerlegung der Theorie.

So war und bleibt die Entwicklung der Physik untrennbar mit der Anwendung und Vervollkommnung sowohl des Experiments als auch der Mathematik verbunden. Besondere Impulse für den Fortschritt der Physik gingen und gehen dabei insbesondere von der Verfeinerung der Meßmethoden, von der Bereitstellung neuer mathematischer Theorien sowie von der Vervollkommnung der Rechentechnik aus. Die Entwicklung der Physik beruht jedoch nicht allein auf dem Experiment und auf der Anwendung der Mathematik. Die entscheidenden Fortschritte in der Entwicklung der Physik waren stets mit neuen physikalischen Fragestellungen, Denkweisen und Prinzipien verbunden. Diese stützen sich zwar auf die Ergebnisse von Experimenten, sie können aber aus diesen nicht logisch abgeleitet werden. Sie gehen als hypothetische Elemente in die Theoriebildung ein. Dies soll an einigen Beispielen, die auch im Unterricht Bedeutung haben, belegt werden.

Aristoteles hatte durch eine auf Intuition beruhende Überlegung den Satz aufgestellt: Ein in Bewegung befindlicher Körper kommt zum Stillstand, sobald die Kraft, die ihn vorantreibt, nicht mehr in der für den Antrieb erforderlichen Weise wirken kann. Auf Grund des großen Ansehens von Aristoteles blieb man fast zweitausend Jahre bei diesen Vorstellungen. Erst Galilei entdeckte den Fehler und formulierte sein Beharrungsprinzip, mit dem er dicht an das klassische Trägheitsgesetz herankam. Hieran anschließend erkannte Newton, daß bei Bewegungsvorgängen nicht nach der Ursache der Geschwindigkeit eines Körpers gefragt werden muß, sondern daß es auf die Geschwindigkeitsänderung und die Kräfte ankommt, die solche Änderungen verursachen.

Die Erfolge der Newtonschen Mechanik führten in allen Gebieten der Physik zur Entwicklung von Fernwirkungstheorien. Entgegen diesen Fernwirkungstheorien vertrat Faraday die Auffassung, daß eine Kraft nur an dem Ort wirken kann, an dem sie entsteht. Wenn also bei elektrischen und magnetischen Kräften eine räumliche Entfernung zwischen dem Ort, an dem die Kraft entsteht, und dem Ort, an dem sie wirkt, vorhanden zu sein scheint, muß eine Täuschung vorliegen. Für die Übertragung der Kraft vom Ort der Entstehung zum Ort der Wirkung muß ein Medium vorhanden sein, das „elektrisches Feld" genannt wurde. Maxwell setzte diese Ideen dann in die Sprache der Mathematik um.

Bereits diese wenigen Beispiele zeigen, wie die Entwicklung der Physik durch die Entwicklung von physikalischen Denkweisen und Prinzipien gefördert wurde. Dabei erforderte die mathematische Darstellung dieser physikalischen Denkweisen und Prinzipien häufig die Benutzung neuer mathematischer Theorien.

Das grundlegende Prinzip der klassischen Physik lautet: „Die Natur macht keine Sprünge." Dieses Prinzip erforderte mathematische Funktionen, die die Eigenschaft haben, daß bei kleinen Änderungen der Größen und beim Übergang zu unendlich kleinen Änderungen keine sprunghaften Änderungen auftreten. Dies führte zur Entwicklung der Infinitesimalrechnung durch Newton und zu der dominierenden Stellung von Differentialgleichungen in der klassischen Physik. Die von Planck erkannte Quantennatur der Strahlung führte zu den Hypothesen von Bohr über die Quantensprünge der Elektronen in der Atomhülle. Diese ließen sich aber nicht mehr mit den mathematischen Mitteln der klassischen Physik beschreiben, da sich die Energie der Elektronen sprunghaft verändern kann. Für die mathematische Darstellung der

neuen Annahmen mußten Elemente der Algebra und der Zahlentheorie benutzt werden.
Die grundlegende Idee von Boltzmann war die Hypothese der elementaren Unordnung. Die mathematische Darstellung dieser Idee erforderte die Nutzung der mathematischen Wahrscheinlichkeitstheorie.
Obwohl mathematische Methoden seit ihrer Einführung durch Galilei und Kepler und ihrer historisch bedeutsamen Vervollkommnung in Newtons „Mathematischen Prinzipien der Naturlehre" in der Physik eine große Rolle spielen, ist die Mathematik dennoch nur ein „Mittel". Das wird von allen bedeutenden Physikern immer wieder betont. Die entscheidenden Fortschritte der Physik sind — wir wiederholen es noch einmal — mit neuen physikalischen Ideen verbunden.
Das naturwissenschaftlich und philosophisch wesentlichste Ergebnis der Einführung mathematischer Methoden in die Erforschung der Natur war die Möglichkeit der Erkenntnis und der exakten Formulierung von Gesetzen in der Natur und damit die Möglichkeit der Vorausberechnung von Naturvorgängen. Hierdurch unterscheidet sich die Physik seit Newton von der qualitativen Naturbeschreibung und der Aufstellung von empirischen Rechenregeln in der antiken Naturforschung. Hieraus folgt auch die Rolle der Mathematik im Physikunterricht: Die Anwendung der Mathematik im Physikunterricht ist eine Voraussetzung für das Erkennen und für das exakte Formulieren von physikalischen Gesetzen.

1.2. Ziele der Anwendung der Mathematik im Erkenntnisprozeß der Schüler im Physikunterricht

„Die Schule sollte es sich immer zum Ziel setzen, den jungen Menschen als harmonische Persönlichkeit und nicht als Spezialist zu entlassen."

(A. Einstein [3; S. 41])

Aus der Rolle der Mathematik in der Physik und aus dem Prinzip der Wissenschaftlichkeit des Unterrichts folgt: Die Mathematik ist im Physikunterricht von dessen Beginn an anzuwenden.
Damit die Anwendung der Mathematik im Physikunterricht der Erkenntnis der Natur, der Entwicklung geistiger Fähigkeiten und der Entwicklung der wissenschaftlichen Weltanschauung der Schüler dient, ist die Mathematik im Erkenntnisprozeß der Schüler im Physikunterricht mit einer Zielstellung anzuwenden, die der in der Physik als Wissenschaft weitgehend nahekommt. Unterschiede zwischen der Anwendung der Mathematik in der Physik als Wissenschaft und im Physikunterricht folgen aus deren verschiedenen Aufgaben. Während es eines der wesentlichsten Ziele der Physik ist, die gewonnenen Erkenntnisse zu theoretischen Systemen zu vereinen, besteht die Aufgabe des Physikunterrichts in der Oberschule darin, die Schüler im Rahmen der Allgemeinbildung in die Grundlagen der Physik einzuführen. Daher betrachten wir jene Ziele der Anwendung der Mathematik in der Physik als Wissenschaft, die der Bildung von Theoriesystemen dienen, nicht als Ziele der Anwendung der Mathematik im Erkenntnisprozeß der Schüler. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, daß dem Wissenschaftler bei der Bildung der

Theoriesysteme die Gesetze schon bekannt sind, der Schüler mit diesen aber erstmals bekannt gemacht wird.
Unter Berücksichtigung dieses Unterschiedes in den Aufgaben des Physikunterrichts und der Physik als Wissenschaft können die Ziele der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht bestimmt werden.

Ziele der Anwendung der Mathematik im Erkenntnisprozeß der Schüler im Physikunterricht sind:

— das Definieren physikalischer Größen,
— das Erfassen von Meßwerten physikalischer Größen in Tabellen und deren graphische oder numerische Auswertung,
— das exakte Formulieren experimentell ermittelter physikalischer Gesetze in Diagrammen und in Gleichungen,
— das exakte Formulieren physikalischer und geometrischer Annahmen, Voraussetzungen und Bedingungen durch Gleichungen oder Ungleichungen,
— das theoretische Herleiten von physikalischen Gesetzen und weiteren Beziehungen zwischen physikalischen Größen,
— das Erklären experimentell ermittelter Tatsachen und weiterer Tatsachen aus dem Erfahrungsbereich der Schüler durch Interpretieren von Größengleichungen oder Diagrammen und durch Berechnen von Größenwerten,
— das Vorausbestimmen des Verlaufs physikalischer Prozesse in Natur, Technik und Produktion durch Interpretieren von Größengleichungen oder Diagrammen und durch das Vorausberechnen einzelner Größenwerte, die den Verlauf dieser Prozesse kennzeichnen.

Mit der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht wird — wie die folgenden Darlegungen noch zeigen werden — zugleich ein bedeutsamer Beitrag zur geistigen, polytechnischen, weltanschaulichen und charakterlichen Bildung und Erziehung der Schüler geleistet.

1.3. Die Rolle der Theorie im Physikunterricht und die Anwendung der Mathematik

„Was ist die Theorie? Dem Laien fällt daran zunächst auf, daß sie schwer verständlich, mit einem Wust von Formeln umgeben ist, die für den Uneingeweihten keine Sprache haben. Allein diese sind nicht ihr Wesen, der wahre Theoretiker spart damit, soviel er kann ... Ich bin der Meinung, daß die Aufgabe der Theorie in der Konstruktion eines ... Abbildes der Außenwelt besteht, das in allen unseren Gedanken und Experimenten als Leitstern zu dienen hat ..."

(L. Boltzmann [4; S. 10])

Die Verstärkung der Rolle der Theorie ist sowohl für die Wissenschaft als auch für die Schule ein objektiver Prozeß, der natürlich in der Physik als Wissenschaft anders verläuft als in der Physik als Unterrichtsfach. Aber auch für die Physik als Unterrichtsfach gilt, daß in der Theorie die gewonnenen experimentellen Ergebnisse unter einheitlichem Gesichtspunkt zusammengefaßt, übersichtlich geordnet und möglichst einfach beschrieben wer-

den, wodurch die Erfassung derselben in ihrer ganzen Mannigfaltigkeit erleichtert, ja eigentlich erst ermöglicht wird [4; S. 116]. Daher verstößt die Behandlung pädagogisch aufbereiteter Teile von physikalischen Theorien nicht gegen das Prinzip der Faßlichkeit des Unterrichts, sondern trägt im Gegenteil zur Faßlichkeit des Unterrichts bei.
Eine Behandlung von Theorien im Unterricht ist aber nicht gleichbedeutend mit einer „Vermathematisierung" des Physiklehrganges. Bei dem im Physiklehrgang gegenwärtig erreichten Umfang der Anwendung der Mathematik gehen wir davon aus, daß die Behandlung von physikalischen Theorien nicht zwangsläufig eine Erhöhung der Anzahl der zu behandelnden Gleichungen und auch keine Aufnahme komplizierterer mathematischer Ableitungen erfordert. Die pädagogisch erfolgreiche Behandlung einer physikalischen Theorie erfordert vor allem eine Überprüfung der Auswahl und der didaktischen Vereinfachung der im Unterricht zu behandelnden Begriffe und Gesetze sowie eine solche Behandlung dieser Begriffe und Gesetze, daß diese tatsächlich der erklärenden und voraussagenden Funktion der Theorie gerecht werden.
Die physikalischen Theorien sind auf die Beherrschung der Natur, auf deren Erklärung und praktische Umgestaltung auf der Grundlage wissenschaftlicher Voraussagen gerichtet. Daher muß die Behandlung einer Theorie im Physikunterricht stets neben einer genaueren Erklärung der Natur zugleich auch auf Fragestellungen aus der Praxis gerichtet sein. Das heißt: Die Anwendung der Mathematik im Physikunterricht muß so erfolgen, daß die Schüler erkennen und erleben, wie die mathematisch erfaßten Gesetze zur praktischen Beherrschung von physikalischen Vorgängen in Natur, Technik und Produktion genutzt werden.
Dies setzt voraus, daß die Physik im Unterricht in ihrem Ursprung aus den praktischen Bedürfnissen der menschlichen Gesellschaft und in ihrer Anwendung auf die Praxis behandelt wird. Im Ergebnis eines solchen Unterrichts muß den Schülern die Haltung anerzogen werden, bei den behandelten physikalischen Gesetzen danach zu fragen, wozu und wie diese Gesetze in der Technik und Produktion angewendet werden können. Zusammenfassend kann formuliert werden:
Für die Behandlung von pädagogisch aufbereiteten Teilen aus physikalischen Theorien im Physikunterricht ist nicht die Anzahl der behandelten Gleichungen und Diagramme das Wesentliche. Entscheidend hierfür ist, wie die Schülertätigkeiten bei der Anwendung der Mathematik die Entwicklung der grundlegenden physikalischen Vorstellungen und Ideen, die Herausbildung der wissenschaftlichen Weltanschauung und der schöpferischen Fähigkeiten der Schüler fördern. Hierin besteht einer der „bleibenden" Werte des Physikunterrichts — auch dann noch, wenn die Schüler die Schule längst verlassen und vielleicht viele von ihnen die meisten der im Unterricht gelernten Formeln inzwischen vergessen haben.

2. Die Gestaltung des Unterrichtsprozesses bei der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht

2.1. Überblick über die vorgeschlagenen Erkenntnisschritte bei der Anwendung der Mathematik

„Von der lebendigen Anschauung zum abstrakten Denken und von diesem zur Praxis — das ist der dialektische Weg der Erkenntnis der Wahrheit, der Erkenntnis der objektiven Realität.“

(W. I. Lenin [5; S. 160])

Innerhalb des Erkenntnisprozesses der Schüler im Physikunterricht sind bei der Anwendung der Mathematik verschiedene Schritte zu durchlaufen, denen jeweils spezifische Funktionen zukommen. Einige dieser Schritte sind vorwiegend durch die Gesetze des Erkenntnisprozesses bei der Anwendung der Mathematik in der Physik als Wissenschaft bestimmt, andere Schritte folgen vor allem aus verschiedenen didaktischen Prinzipien für die Gestaltung des Unterrichts. Im folgenden geben wir zunächst einen Überblick über die Erkenntnisschritte, wie wir sie für die Anwendung der Mathematik im Physikunterricht empfehlen. Eine genauere Darstellung jedes einzelnen Schrittes erfolgt dann in den nachfolgenden Abschnitten. Die Bezeichnung der einzelnen Schritte wählen wir so, wie diese auch den Schülern gegenüber motiviert werden können.

Erkenntnisschritte bei der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht:

(1) Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik.
(2) Wir vereinfachen/idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.
(3) Wir untersuchen die Erscheinungen und Vorgänge mit Hilfe der Mathematik genauer.
(Dieser Schritt wird im folgenden je nach der Spezifik des Erkenntnisprozesses noch differenzierter formuliert.)
(4) Wir fassen zusammen.
(5) Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung (bzw. des Diagramms) an einigen einfachen Beispielen.
(6) Wir können erklären, voraussagen und neue Gesetze erkennen.

Als ein weiterer Schritt kommt hinzu: „Wir wiederholen und üben“. Diesen Schritt könnte man als „nullten“ Schritt bezeichnen, er kann aber auch an einer anderen Stelle erforderlich sein.

Aus den dargestellten Schritten könnte angenommen werden, daß die „eigentliche“ Anwendung der Mathematik im Erkenntnisprozeß der Schüler nur die Schritte (3) und (5) umfassen würde. Ein durch diese Auffassung geprägtes Vorgehen ist im Unterricht auch noch häufig zu beobachten. Im Ergebnis einer solchen Einengung der Erkenntnisschritte bei der Anwendung der Mathematik wird sie im Erkenntnisprozeß der Schüler vielfach früher eingesetzt und auch früher beendet, als dies dem gesamten komplexen Erkenntnisprozeß nach, den die Schüler zu durchlaufen haben, zu rechtfertigen ist. Demgegenüber folgt aus den hier dargestellten Erkenntnisschritten unmittelbar eine methodische Grundposition, die das gesamte weitere Buch durchzieht:

Die Anwendung der Mathematik muß im Physikunterricht von der Praxis und insbesondere vom Experiment ausgehen und zur Anwendung der Gesetze in der Praxis beziehungsweise zur Durchführung von Experimenten hinführen.

Hierbei ist nicht entscheidend, daß diese Experimente beziehungsweise die praktischen Anwendungen in bestimmten Fällen infolge objektiver Umstände im Unterricht nicht ausgeführt bzw. demonstriert werden können, sondern daß den Schülern Ziel, Prinzip und Anlage der Experimente bzw. Anwendungen nur über das Wort des Lehrers oder mit Hilfe verschiedener Unterrichtsmittel nahegebracht werden können.
Durch die erkenntnistheoretisch einwandfreie Gestaltung des Prozesses der Anwendung der Mathematik im Sinne der dargelegten Schritte kann den Schülern die Rolle der Praxis als Ausgangspunkt, Triebkraft, Wahrheitskriterium und Ziel der Erkenntnis sowie der Weg und der Sinn der Erkenntnisgewinnung in der Physik bewußtgemacht werden. Hierin besteht ein wesentlicher Beitrag der Anwendung der Mathematik zur Herausbildung einer wissenschaftlichen Weltanschauung.

2.2. Die anschauliche und faßliche Gestaltung der einzelnen Schritte bei der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht

„Also ist das wichtigste Motiv für die Arbeit in der Schule und im Leben die Freude an der Arbeit, die Freude an ihrem Ergebnis und die Erkenntnis ihres Wertes für die Gemeinschaft.“

(A. Einstein [3; S. 39])

Damit die Ziele der Anwendung der Mathematik im Erkenntnisprozeß der Schüler erreicht werden können, muß ihnen der Wert der Anwendung der Mathematik für die Erkenntnis der Natur und für die Beherrschung der Technik bewußt werden. Dazu müssen die Schüler die Anwendung der Mathematik verstehen, und dazu müssen in ihnen das Interesse und die Freude an der Anwendung der Mathematik entwickelt werden. Eine Voraussetzung hierfür ist die anschauliche und faßliche Gestaltung des Unterrichts bei der Anwendung der Mathematik. Wie können die Anschaulichkeit und die Faßlichkeit des Unterrichts bei der Anwendung der Mathematik erreicht werden? Die nachfolgenden Bedingungen für die Anschaulichkeit und für die Faßlichkeit des Unterrichts bei der Anwendung der Mathematik werden zunächst unabhängig davon entwickelt, ob eine Definitionsgleichung oder ein Gesetz erarbeitet wird. Es wird auch noch nicht unterschieden, ob das Gesetz empirisch oder theoretisch gefunden wird und ob es als Gleichung oder als Diagramm dargestellt wird. Die hierbei insgesamt notwendigen Differenzierungen erfolgen erst im Kapitel 3.

2.2.1. Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik

Motivieren der Untersuchung eines physikalischen Zusammenhanges. Den Schülern wird in einer problemhaften Erörterung gezeigt, warum die genaue Kenntnis des betreffenden Zusammenhanges zur Erkenntnis der Natur und zur praktischen Beherrschung der Natur und der Technik erforderlich ist. Diese Erörterung erfolgt noch weitgehend in der Umgangssprache, die im folgenden einzuführenden physikalischen Fachbegriffe werden noch nicht benutzt.

Als Motivierung für die Einführung der physikalischen Größe Geschwindigkeit eignet sich zum Beispiel eine bereits für Schüler der Klasse 6 aktuelle, interessante und faßliche Erörterung des prinzipiellen Verlaufes der Versorgung der Raumstation Salut mit Hilfe eines Raumtransportschiffes Progress. Hieran wird deutlich, daß zur Beherrschung solcher Bewegungsvorgänge die Bahn der Raumstation, der Ort der Station auf dieser Bahn zu einem bestimmten Zeitpunkt und eine Angabe darüber, wie schnell sich die Station auf ihrer Bahn von einem Ort zu einem anderen weiterbewegt, bekannt sein müssen. Als Motivierung eignen sich auch entsprechende Erörterungen zur Aufstellung des Zeitplanes für eine Etappe der Friedensfahrt oder für eine Radwanderung der Klasse.

In der Abiturstufe sollte die Motivierung für die Untersuchung eines physikalischen Zusammenhanges möglichst oft aus theoretischen Erörterungen entwickelt werden. Ausgangspunkt hierfür können zum Beispiel Analogiebetrachtungen, Erörterungen zur Umkehrbarkeit physikalischer Vorgänge oder zur Arbeitsweise der Physik sein.

Zur Motivierung für die Untersuchung der Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld kann man davon ausgehen, daß elektrische Ladungen elektrische Felder erzeugen, die ihrerseits Kräfte auf weitere elektrische Ladungen ausüben. Da sich gezeigt hat, daß elektrische Ströme magnetische Felder erzeugen, kann man vermuten, daß umgekehrt magnetische Felder auch Kräfte auf elektrische Ströme ausüben:
Es gilt:
Elektrische Ladungen → elektrische Felder → Kräfte auf elektrische Ladungen.
Gilt auch:
Elektrische Ströme → magnetische Felder → Kräfte auf elektrische Stöme?

Zur Motivierung für die Erarbeitung des Induktionsgesetzes dient die Entwicklung folgender Problemstellung. Nachdem Oerstedt entdeckt hatte, daß ein elektrischer Strom immer mit einem magnetischen Feld verknüpft ist, begann Faraday in Umkehrung dieses Zusammenhanges die Frage zu stellen:
Kann ein magnetisches Feld einen elektrischen Strom erzeugen?
Bei der Erarbeitung des Grundgesetzes der Dynamik für die Rotation kann man in Analogie zum Grundgesetz der Dynamik für die Translation die Frage entwickeln:

Wird die mit einem Drehmoment erreichte Winkelbeschleunigung eines Körpers ebenso wie die mit einer Kraft erreichte Beschleunigung eines Körpers von einer Eigenschaft des beschleunigten Körpers abhängen?
Bei der Erarbeitung der Linsengleichung kann man die Motivierung daraus entwickeln, daß in der Physik physikalische Gesetze in Form von Gleichungen formuliert werden, im Unterricht der Klasse 6 aber nur eine tabellarische Zusammenstellung verschiedener halbquantitativer Angaben erfolgte.

Isolierung von realen physikalischen Objekten aus deren vielfältigen Zusammenhängen. Die Physik strebt nach quantitativen Gesetzen. Deshalb sind für den Physiker nicht irgendwelche beliebigen Eigenschaften eines physikalischen Objektes interessant, sondern in erster Linie solche, die sich durch Messungen exakt bestimmen und mathematisch beschreiben lassen. Zur Durchführung der Messungen und Beobachtungen werden die realen physikalischen Objekte zunächst aus ihren vielfältigen Zusammenhängen mit anderen Objekten der Wirklichkeit isoliert.
Für die Gestaltung dieses Schrittes ist die Erkenntnis der Didaktik bedeutsam, daß eine wichtige Voraussetzung für die Beherrschung von Begriffen der Reichtum an konkreten Erfahrungen über die physikalischen Objekte in ihren vielfältigen Zusammenhängen ist. Ohne diese Erfahrungen bleibt die Aneignung der Begriffe formal, ist die Abstraktion blaß und trocken, wird die Widerspiegelung der Wirklichkeit inhaltsarm und verzerrt. Daraus folgt:
Die Isolierung der realen physikalischen Objekte sollte möglichst oft an Beispielen erfolgen, die der alltäglichen Erfahrung entnommen und den Schülern demonstriert werden können. Hierbei werden die Schüler auf einige der vielfältigen Zusammenhänge aufmerksam gemacht, die zwischen dem im folgenden allein interessierenden realen Objekt und anderen Objekten bestehen, aus denen das interessierende Objekt herausgelöst wird. Beispiele hierfür sind: das Ersetzen eines Leitungsdrahtes aus einer Freileitung, aus einer Unterputzleitung bzw. aus einem elektrischen Gerät durch einen Draht auf dem Experimentiertisch oder das Ersetzen eines Fahrzeuges innerhalb eines Verkehrsstromes auf der Straße durch einen Experimentierwagen oder durch ein Spielzeugauto auf dem Experimentiertisch.

Durchführen erster Beobachtungen und Messungen mit isolierten Objekten. Aus der bereits dargelegten Erkenntnis der Didaktik folgt hierfür:

Die ersten Beobachtungen und die ersten Messungen sind an verschiedenen physikalischen Objekten durchzuführen.

Dies ist notwendig, damit die Schüler die zu untersuchende physikalische Eigenschaft oder das zu erkennende physikalische Gesetz nicht allein mit einem einzigen physikalischen Objekt in Verbindung bringen. Je breiter der Erfahrungsbereich in diesem Erkenntnisschritt gewählt wird, desto leichter werden die Schüler das Allgemeine im Einzelnen erkennen und die zu erarbeitende Gleichung später auf verschiedene physikalische Sachverhalte anwenden können. Besonders wertvoll ist es, wenn der Lehrer hierfür auch jene Kenntnisse und Erfahrungen nutzt, die sich die Schüler in der produktiven Arbeit und außerhalb des Unterrichts aus Fernsehsendungen, beim Lesen von Tageszeitungen, aus der Kinder- und Jugendliteratur sowie durch den

Umgang mit technischem Spielzeug und durch eigene Erfahrungen mit den kleinen Dingen des Alltags angeeignet haben. Im Unterricht werden solche Beispiele vielfach noch allein der Phase der Anwendung der neu eingeführten physikalischen Größe oder des neu erarbeiteten physikalischen Gesetzes zugeordnet. Darunter leiden aber die Motivation, die Zielorientierung und die empirische Basis des Unterrichts bei der Einführung der Größen beziehungsweise bei der Erarbeitung der Gesetze.

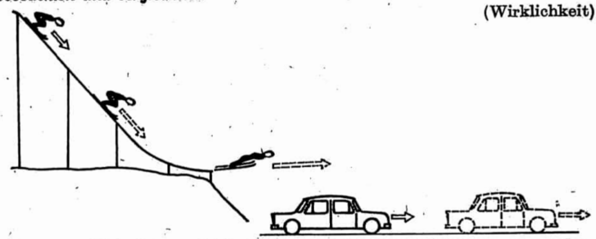
Parallel zur Demonstration von physikalischen Objekten sowie parallel zur Durchführung von Beobachtungen und Experimenten sollten bildliche Veranschaulichungen benutzt werden.

Neben der Demonstration eines physikalischen Objektes im Original beziehungsweise in einer Nachbildung und der Untersuchung eines physikalischen Vorganges im Experiment kommt in diesem und auch in den nachfolgenden Erkenntnisschritten den verschiedenartigen bildlichen Veranschaulichungen eine eigenständige Funktion zu. Das gilt besonders für Zeichnungen, die parallel zum Experiment entstehen. Diese dienen dazu, die wesentlichen Seiten eines physikalischen Objektes hervorzuheben und das Objekt aus dessen vielfältigen Zusammenhängen in der Wirklichkeit zu isolieren und bei den Schülern den Übergang vom anschaulich-handelnden (oder anschaulich-praktischen) Denken zum anschaulich-bildhaften (oder konkret-bildhaften) Denken zu fördern. Diese Funktion erfüllen vor allem einfache Zeichnungen und Skizzen, die der Lehrer im Verlaufe des Unterrichtsgesprächs ausführt (vgl. die Teile (1a) in den Tafeln 2.2./1 bis 8). Das parallel dazu geführte Unterrichtsgespräch fördert die „Vergegenständlichung" der einzelnen Linien der Zeichnung. Bereits vor der Unterrichtsstunde vom Lehrer angefertigte Zeichnungen können diese Funktion nur teilweise erfüllen, deshalb sollten nur komplizierte Darstellungen als fertige Tafel- oder Projektionsfolienbilder vorbereitet werden. Bei den bildlichen Veranschaulichungen sind — sobald das möglich ist — standardisierte Zeichen (zum Beispiel Schaltzeichen) oder schematische Elemente (wie bei Blockschaltplänen) zu benutzen. Diese Veranschaulichungen sollten von den Schülern im allgemeinen nicht in ihr Heft übernommen werden. Wenn sich entsprechende Veranschaulichungen im Lehrbuch befinden bzw. als Folie vorhanden sind, kann an die Stelle dieser Veranschaulichungen im Tafelbild auch das Anschreiben von entsprechenden Stichworten treten. Das gilt auch, wenn für den Lehrer die zeichnerische Darstellung von figürlichen Bildern zu kompliziert wird.
Diese bildlichen Veranschaulichungen stellen den ersten Teil von *Abstraktionsreihen* dar, die von der physikalischen Realität zu physikalischen Idealisierungen und Modellen und schließlich zur Darstellung der physikalischen Zusammenhänge in Größengleichungen oder Diagrammen führen. Diese Abstraktionsreihen stellen wesentliche Etappen des Erkenntnisprozesses im Unterricht dar, sie sind in ihrer Vollständigkeit nicht als Tafelbild gedacht. Für eine Übernahme von Elementen dieser Abstraktionsreihen in die Schüleraufzeichnungen kann man sich an den Teilen (4) „Wir fassen zusammen" orientieren. Im Kapitel 3 ist eine Vielzahl solcher Abstraktionsreihen dargestellt, so daß wir uns an dieser Stelle auf einige für die verschiedenen Anwendungen der Mathematik jeweils typischen Abstraktionsreihen beschränken:

Tafel 2.2./1: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Beschleunigung“

Wir beobachten und vergleichen. (Wirklichkeit)

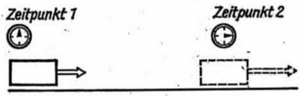
(1a)



(1b) Fahrzeuge, Menschen und Tiere können schneller und langsamer werden.

Wir vereinfachen. (Idealisierung)

(2a)



(2b) Die Beschleunigung eines Körpers gibt an, wie schnell sich dessen Geschwindigkeit ändert.

Wir suchen eine Definitionsgleichung. (Gleichung)

(3a) Einführen der Formelzeichen:

(3b) Ansatz:
Für jeden Körper ist bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung die Geschwindigkeitsänderung proportional zur Zeitdauer der Beschleunigung. Daher kann die Beschleunigung eines Körpers durch die Geschwindigkeitsänderung je 1 s angegeben werden.

Beispiele:

Körper	Geschwindigkeitsänderung	Zeitdauer	Beschleunigung (Geschwindigkeitsänderung je 1 s)
PKW	$20\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$	5 s	$4\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ je 1 s oder $\frac{4\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{1\,\text{s}}$
LKW	$10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$	10 s	$1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ je 1 s oder $\frac{1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{1\,\text{s}}$
Lok	$6\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$	60 s	$0{,}1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$ je 1 s oder $\frac{0{,}1\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{1\,\text{s}}$

(3c) Als Gleichung geschrieben:

$$\text{Beschleunigung eines Körpers} = \frac{\text{Geschwindigkeitsänderung}}{\text{Zeitdauer der Beschleunigung}}$$

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

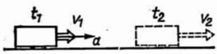
$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

(3d) Einheit: $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Wir fassen zusammen.

(4)

Die Beschleunigung eines Körpers gibt an, wie schnell sich dessen Geschwindigkeit ändert.



Definitionsgleichung:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

(Gültigkeitsbedingung: geradlinig gleichmäßig beschleunigte Bewegung)

Darin bedeuten:

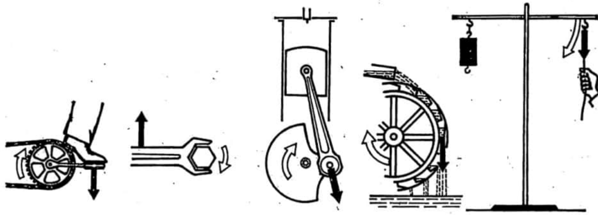
a die Beschleunigung (in $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$),
v_2 die Endgeschwindigkeit (in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
v_1 die Anfangsgeschwindigkeit (in $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
Δt die Zeitdauer für die Beschleunigung (in s)

— eine Abstraktionsreihe zur Erarbeitung der Definition einer abgeleiteten physikalischen Größe (deren Definitionsgleichung Quotientenform besitzt) am Beispiel Beschleunigung (Tafel 2.2./1),
— eine Abstraktionsreihe zur Erarbeitung der Definition einer abgeleiteten physikalischen Größe (deren Definitionsgleichung Produktform besitzt) am Beispiel Drehmoment (Tafel 2.2./2),
— eine Abstraktionsreihe zur Erarbeitung einer physikalischen Basisgröße am Beispiel elektrische Stromstärke (Tafel 2.2./3),
— eine Abstraktionsreihe zur empirischen Erarbeitung eines Gesetzes in Form einer Gleichung am Beispiel Reflexionsgesetz (Tafel 2.2./4),
— eine Abstraktionsreihe zur empirischen Erarbeitung eines Gesetzes in Form eines Diagramms am Beispiel der Proportionalität $I \sim U$ (Tafel 2.2./5),
— eine Abstraktionsreihe zur theoretischen Herleitung eines Gesetzes mit Hilfe der Mathematik am Beispiel Linsengleichung (Tafel 2.2./6),
— eine Abstraktionsreihe zur theoretischen Herleitung eines Gesetzes aus einem Modell am Beispiel Stromverzweigungsgesetz (Tafel 2.2./7) und
— eine Abstraktionsreihe zur Behandlung einer fertig gegebenen Gleichung am Beispiel Radialkraft (Tafel 2.2./8).

Tafel 2.2./2: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Drehmoment“

Wir beobachten und vergleichen.

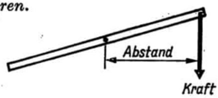
(1a) (Wirklichkeit)



(1b) Kräfte, die an drehbaren Körpern angreifen, rufen eine Drehwirkung des Körpers hervor.

Wir idealisieren.

(2a) (Idealisierung)

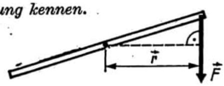


(Annahme: Der drehbare Körper ist ein starrer Hebel.)

(2b) Das Drehmoment einer Kraft ist ein Maß für die Drehwirkung der Kraft auf einen drehbaren Körper.

Wir lernen die Definitionsgleichung kennen.

(3a) Einführen der Formelzeichen: (Gleichung)



(3b) Ansatz:
Das Drehmoment einer Kraft ist um so größer, je größer die Kraft ist und je größer der senkrechte Abstand der Wirkungslinie der Kraft vom Drehpunkt ist.

(3c) Aus theoretischen Untersuchungen wurde als Definitionsgleichung festgelegt:
$M_D = F \cdot r$

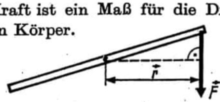
(3d) Einheit: $N \cdot m$

Wir fassen zusammen.

(4)

Das Drehmoment einer Kraft ist ein Maß für die Drehwirkung dieser Kraft auf einen drehbaren Körper.

Definitionsgleichung:



$M_D = F \cdot r$ (Gültigkeitsbedingung: starrer Hebel)

Darin bedeuten:
M_D das Drehmoment der Kraft (in $N \cdot m$),
F den Betrag der Kraft (in N),
r den Abstand des Drehpunktes von der Angriffslinie der Kraft (in m).

In diesen Abstraktionsreihen sind die Erkenntnisebenen, auf denen die Erkenntnisse jeweils formuliert werden, durch die Begriffe Wirklichkeit, Idealisierung und Größengleichung (bzw. Diagramm) gekennzeichnet. Die Bezeichnung der Teilschritte (1) bis (3) ist in den Tafeln sprachlich verkürzt angegeben. Zusätzlich wird die Bezeichnung des Teilschrittes (3) der Spezifik des jeweiligen Erkenntnisprozesses entsprechend variiert.
In der Erkenntnisebene *Wirklichkeit* wird die Erkenntnis noch an real existierenden Objekten gewonnen. Diese realen Objekte sind aber bereits aus ihren vielfältigen Zusammenhängen in der Natur isoliert, sie stellen isolierte reale Objekte dar. Das sollte den Schülern auch bewußt werden, indem ihnen gesagt wird: „Wir sehen davon ab, daß ... und zeichnen nur die Dinge, die uns jetzt interessieren." (Natürlich spricht der Lehrer den Schülern gegenüber nicht von „isolierten realen Objekten".) So wird in Tafel 2.2./4 jeweils davon abgesehen, daß ein Teil des Lichtes auch in den Körper eindringt. Entsprechendes gilt in allen Abstraktionsreihen für die Darstellungen in der Ebene Wirklichkeit. In diesen Darstellungen sollten auch die physikalischen Objekte und die nebensächlichen Elemente variiert werden. In Tafel 2.2./4 betrifft das zum Beispiel die Reflexion des Lichtes an einer Fensterscheibe, an einer Wasserfläche und an einem Spiegel, beziehungsweise die Art der Lichtquelle und die Richtung des auf die Körper auftreffenden Lichtes.

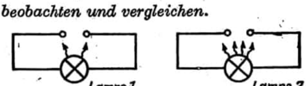
Aus den Beobachtungen und Messungen sollten mit den Schülern bereits erste Erkenntnisse formuliert werden.

Für diese Formulierung werden zwar die schon vorher eingeführten physikalischen Begriffe benutzt, insgesamt ist aber darauf zu achten, daß man im wesentlichen noch in der Umgangssprache bleibt (vgl. die Teile (1b) in den Tafeln 2.2./1 bis 8). Die jeweils neu einzuführenden Begriffe wie ebener Spiegel, Einfallslot, Einfallswinkel usw. gehören zur nachfolgenden Erkenntnisebene.

Tafel 2.2./3: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Elektrische Stromstärke"

Wir beobachten und vergleichen.

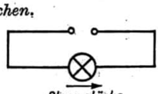
(1a) (Wirklichkeit)



(1b) Der Strom kann in elektrischen Geräten unterschiedlich groß sein.

Wir vereinfachen.

(2a) (Idealisierung)



(2b) Der elektrische Strom ist ein Transport von elektrischen Ladungen.
Die Stromstärke gibt an, wieviel elektrische Ladung in 1 Sekunde durch den Querschnitt des Leiters fließt.

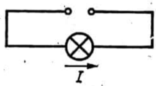
Wir deuten das im Modell.

(2c) (physikalisches Modell)

(2d) Je größer die Stromstärke ist, desto mehr Elektronen fließen in 1 Sekunde durch den Querschnitt des Leiters.

Wir messen.

(3a) Einführen des Formelzeichens:

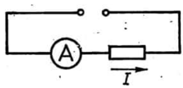
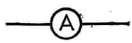


(3b) Ansatz:
Zum Messen der Stromstärke benutzt man Strommesser. In diesen wird die magnetische Wirkung des Stromes auf drehbare Spulen ausgenutzt.

(3d) Festlegung einer Einheit: Ampere (A)

Wir fassen zusammen.

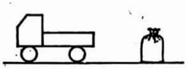
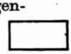
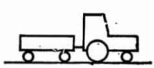
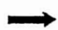
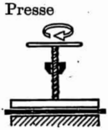
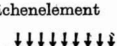
(4)

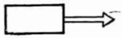
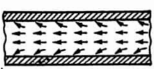
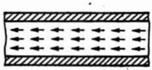
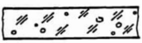
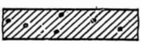
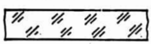
> Die Stromstärke gibt an, wieviel elektrische Ladung in 1 Sekunde durch den Querschnitt des Leiters fließt.
> Je größer die Stromstärke ist, desto mehr Elektronen fließen in 1 Sekunde durch den Querschnitt des Leiters.
> Formelzeichen: I
>
> Meßgerät: Strommesser
>
> 
>
>
> Schaltzeichen:
>
> 
>
>
> Einheit: Ampere (A)
> 1 A = 1000 mA

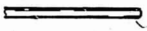
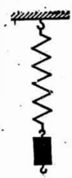
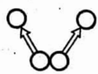
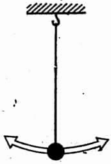
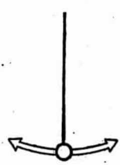
2.2.2. Wir vereinfachen/idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik

Einführung physikalischer Idealisierungen. Um von den so erhaltenen empirischen Kenntnissen zu theoretischen Kenntnissen zu gelangen, werden in der Physik die realen Objekte durch gedanklich *idealisierte Objekte* ersetzt. Das ist das Typische für die physikalische Betrachtungsweise. Hierbei besteht „die wichtigste, zugleich aber auch die schwierigste Aufgabe darin, gerade diejenigen vereinfachenden Annahmen einzuführen, welche für die den Physiker interessierenden Eigenschaften des untersuchten physikalischen Vorgangs von charakteristischer Bedeutung sind, und alle Einflüsse von kleinerer Größenordnung zu vernachlässigen, welche an dem Hauptresultat nichts Wesentliches ändern und nur als mathematischer Ballast in die Betrachtungen eingehen“ [6; S. 2]. Deshalb unterscheiden sich die idealisierten Objekte von den realen Objekten nicht nur dadurch, daß manches Unwesentliche weggelassen wird, sondern auch dadurch, daß sie mit Eigenschaften ausgestattet werden, welche die realen Objekte nicht oder nur angenähert besitzen. So wird bei der Idealisierung Massenpunkt nicht nur von bestimmten Eigenschaften der Körper, wie deren Form, Volumen, stoffliche Beschaffenheit u. a., abgesehen, sondern es wird auch die für tatsächlich existierende Körper nicht realisierbare Eigenschaft angenommen, daß die gesamte Masse des Körpers in einem Punkt vereinigt werden könnte (vgl. Übersicht 2.2./1). Bei der Bewegung eines Massenpunktes wird nicht nur von der Art des Antriebes und von der Art des Mediums abgesehen, in dem sich reale Körper bewegen, sondern es wird auch die für reale Körper auf der Erde nicht realisierbare Eigenschaft einer reibungsfreien Bewegung angenommen. In physikalischen Darstellungen wimmelt es zu Beginn von stillschweigend angenommenen oder nebenbei formulierten Idealisierungen, die dem Nichtphysiker und den Schülern nicht immer als solche bewußt werden. So sollen zum Beispiel Körper homogen aufgebaut oder gleichtemperiert sein, die mechanischen Eigenschaften sollen in allen Richtungen des Körpers gleich sein.

Übersicht 2.2./1: Physikalische Idealisierungen bei der Behandlung der Mechanik

Reales physikalisches Objekt	physikalische Idealisierung (deren Annahmen und symbolisch-schematische Darstellung)	Gültigkeitsgrenzen
Auto, Sandsack 	**beliebiger Körper** (Form, Volumen und Stoff des Objektes haben keinen Einfluß auf dessen physikalische Eigenschaften.) 	Bewegung erfolgt nicht zu schnell, Reibungskräfte klein gegenüber einwirkender Kraft
Traktor 	**konstante Kraft** (Betrag und Richtung der Kraft bleiben im betrachteten Zeitintervall gleich.) 	nicht zu lange Zeiten, keine zu großen Schwankungen bei der Kraft
Presse 	**gleichmäßige Druckkraft** (Betrag und Richtung der Druckkraft sind für jedes Flächenelement gleich.) 	Kraft wirkt auf gesamte Fläche, Flächenelemente sind gegenüber der gesamten Fläche nicht zu klein

Reales physikalisches Objekt	physikalische Idealisierung (deren Annahmen und symbolisch-schematische Darstellung)	Gültigkeitsgrenzen
Radfahrer 	**reibungsfreie Bewegung** (Bei der Bewegung des Körpers tritt keinerlei Reibung auf.) 	keine zu großen Wege, Reibungskraft gegenüber der äußeren Kraft klein
fallender Stein 	**freier Fall** (Der Körper fällt im luftleeren Raum.)	Luftwiderstand klein gegenüber der Schwerkraft, keine zu langen Fallwege (< 400 m)
Fahrzeug Flüssigkeitsströmung  	**wirbelfreie Bewegung** (Form, Oberflächenmaterial und Relativbewegung zwischen Körper und Medium sind solcher Art, daß keine Wirbelbildung entsteht.)  	Strömungsgeschwindigkeit nicht zu groß, Stirnfläche des Körpers gegenüber seiner Länge nicht zu groß, nicht zu großer Rohrquerschnitt, nicht zu starke Reibungswiderstände im Rohr
Glasplatte  Stahlträger 	**homogener Körper**  (Die makroskopischen Eigenschaften wie Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Brechungsindex usw., sind an den kleinsten sichtbaren Stellen des Körpers gleich.) 	keine zu großen Hohlräume, Volumenelement gegenüber gesamtem Volumen nicht zu klein, keine zu großen Fremdstoffe

Reales physikalisches Objekt	physikalische Idealisierung (deren Annahmen und symbolisch-schematische Darstellung)	Gültigkeitsgrenzen
Flugzeug 	**Massenpunkt** (Die gesamte Masse des Körpers ist in einem Punkt vereinigt.)	Abmessungen des Körpers sind klein gegenüber der Bahnlänge
Stange 	**starrer Körper** (Während der Bewegung bleibt der Abstand zweier beliebiger Punkte des starren Körpers konstant.)	nicht zu große Kraft, nicht zu lange und nicht zu schnelle Krafteinwirkung
Billardkugel  Feder 	**vollkommen elastischer Körper**  (Die Verformung geht nach Verschwinden der Ursache auf den Nullzustand zurück.) 	keine zu schnelle, zu lange und zu starke Einwirkung
Fadenpendel 	**mathematisches Pendel** (Ein Massenpunkt hängt an einem masselosen und undehnbaren Faden.) 	nicht zu kleine Masse an einem Faden, Fadenmasse klein gegenüber Pendelmasse, nicht zu große Amplitude

Im Unterricht kann der Übergang von den realen Objekten in der Wirklichkeit zu den idealisierten Objekten in der physikalischen Idealisierung als zweiter Schritt in der Abstraktionsreihe vollzogen werden. Das heißt:

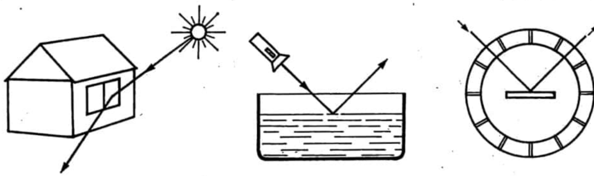
Der Übergang von den realen Objekten zu den idealisierten Objekten wird den Schülern an Hand einer symbolhaft-schematischen Darstellung der Idealisierung bewußtgemacht.

Wir sagen den Schülern: „Wir vereinfachen (idealisieren) jetzt die uns interessierenden Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik. Wir wollen annehmen, daß . . .“ Im Ergebnis dieser Betrachtung entsteht in den Abstraktionsreihen die symbolhaft-schematische Darstellung der Idealisierungen (vgl. die Teile (2a) in den Tafeln 2.2./1 bis 8). So wird den Schülern bei der Erarbeitung der Definition der physikalischen Größe Beschleunigung nach Tafel 2.2./1 mitgeteilt, daß in der Physik die Überlegungen zur zahlenmäßigen Angabe der Änderung der Geschwindigkeit nicht speziell für Autos, Flugzeuge, Schiffe, Steine usw. durchgeführt werden, sondern daß ganz allgemein die Änderung der Geschwindigkeit von Körpern untersucht wird. Bei diesem Übergang von den realen Objekten zu der Idealisierung Körper werden die Schüler aufgefordert, Eigenschaften der realen Körper zu nennen, die physikalisch ohne Bedeutung sind und in der Idealisierung Körper nicht berücksichtigt werden müssen. Zeichnerisch drückt sich dieser Übergang dadurch aus, daß dieser allgemeine Körper nur noch schematisch dargestellt wird (vgl. Teil (2a) in Tafel 2.2./1). Die Schüler sollten dazu aufgefordert werden, selbst Möglichkeiten für die Gestaltung einer solchen schematischen Darstellung vorzuschlagen, aus denen dann eine Möglichkeit für den Unterricht verabredet wird.
Diese symbolhaft-schematischen Darstellungen sollten von den Schülern im allgemeinen in ihre Aufzeichnungen übernommen werden. Um dabei Zeit zu sparen und dennoch ordentliche Zeichnungen anzufertigen, werden die Schüler angehalten, hierfür die im Handel angebotenen Zeichenschablonen zu nutzen. Der Wert dieser symbolhaft-schematischen Zeichnungen wird durch eine sinnvolle Benutzung von Farben an der Tafel und in den Heften erhöht.
Wichtig ist es, die Schüler bereits an dieser Stelle darauf aufmerksam zu machen, daß die Vereinfachungen meistens solche Idealisierungen darstellen, die in der Wirklichkeit nicht oder nur innerhalb bestimmter Grenzen erreicht werden können. Es ist wünschenswert, den Schülern gegenüber — etwa ab Klasse 9 — von Idealisierungen anstelle von Vereinfachungen zu sprechen, da sich für die Schüler hinter dem Wort Vereinfachung gewöhnlich nur das Weglassen unwichtiger Eigenschaften verbirgt, nicht aber auch das viel wesentlichere Hinzufügen neuer Eigenschaften.
In den oberen Klassen ist es sinnvoll, diese Annahmen auch stichpunktartig in die Darstellung der Teile (2a) in den Abstraktionsreihen einzutragen (vgl. Tafel 2.2./2).

Einführung physikalischer Fachbegriffe. Die Einführung der physikalischen Idealisierungen ist begleitet von der Einführung einer Vielzahl von physikalischen Fachbegriffen, mit denen diese Idealisierungen und ihre Eigenschaften bezeichnet werden. (Wenn für diese Eigenschaft in der Physik kein neues Wort geschaffen wurde, wird den Schülern bereits an dieser Stelle die

Wir beobachten und vergleichen.

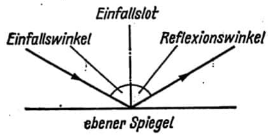
(1a) (Wirklichkeit)



(1b) Trifft Licht auf Körper, so wird ein Teil des Lichtes in eine neue Richtung gelenkt.

Wir vereinfachen.

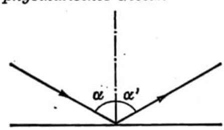
(2a) (Idealisierung)



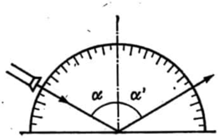
(2b) Treffen Lichtstrahlen auf einen ebenen Spiegel, so werden diese reflektiert.

Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz.

(3a) Einführen der Formelzeichen: (Gleichung)



(3b) Meßanordnung und Meßtabelle:



Einfallswinkel	Reflexionswinkel
20°	21°
39°	39°
58°	57°
76°	76°

Aus den Messungen erkennen wir: Einfallswinkel und Reflexionswinkel sind gleich groß.

(3c) Als Gleichung geschrieben:

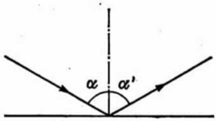
Einfallswinkel = Reflexionswinkel

$$\alpha = \alpha'$$

Wir fassen zusammen.

(4)

Bei der Reflexion von Lichtstrahlen am ebenen Spiegel sind der Einfallswinkel α und der Reflexionswinkel α' gleich groß.



Es gilt: $\alpha = \alpha'$

Abgrenzung des Inhalts des physikalischen Begriffes vom Inhalt desselben Wortes in der Alltagssprache deutlich gemacht.)

Im Unterricht sollte die Einführung der physikalischen Fachbegriffe nach Möglichkeit an Hand der symbolhaft-schematischen Darstellung in der Abstraktionsreihe erfolgen.

Die so eingeführten Begriffe werden dann ein erstes Mal am Beispiel der bildlichen Darstellungen (1a) in den Abstraktionsreihen angewendet. In Tafel 2.2./4 würde man so von den Schülern für jede der drei vorangegangenen bildlichen Veranschaulichungen auf der Ebene Wirklichkeit die Begriffe Einfallslot, Einfallswinkel, Reflexionswinkel und ebener Spiegel erläutern lassen. Entsprechendes gilt für die Begriffe verzweigter Stromkreis, Stromverzweigungspunkt, Gesamtstrom und Teilstrom in Tafel 2.2./7.

Zur Sicherung des richtigen Gebrauchs der in der Erkenntnisebene Idealisierung eingeführten Begriffe eignen sich auch „Übersetzungsübungen", in denen die Schüler Formulierungen von physikalischen Sachverhalten aus der Umgangssprache in die Fachsprache übersetzen.

So empfiehlt sich bei der Einführung der physikalischen Größe *Wärme* die folgende Aufgabe:

- Heute herrscht eine Wärme!
- Draußen ist eine Kälte!
- Der Ofen strahlt eine Hitze ab.
- Ist das heute eine Hitze!
- Erwärme dir die Milch!
- Ich muß mich erst einmal aufwärmen.
- Vom Mittelmeer gelangt zu uns eine Hitzewelle.
- Von Skandinavien gelangt zu uns eine Kältewelle.

Formuliere den Inhalt dieser Sätze physikalisch korrekt! Verwende dazu die Begriffe „Temperatur" und „Wärme"!

Identifizierung der physikalischen Zusammenhänge bei realen Objekten mit den physikalischen Zusammenhängen bei idealisierten Objekten. Im Ergebnis der Einführung solcher Idealisierungen werden die Eigenschaften der realen Objekte mit den Eigenschaften der idealisierten Objekte als identisch angesehen. In entsprechender Weise werden die Zusammenhänge zwischen

den Eigenschaften der realen Objekte mit den Zusammenhängen zwischen den Eigenschaften der idealisierten Objekte identifiziert. So wird zum Beispiel der Zusammenhang zwischen der Startbeschleunigung eines realen Flugzeuges und den Schubkräften seiner Düsenaggregate als identisch angenommen mit dem Zusammenhang zwischen der Beschleunigung eines Massenpunktes und einer auf diesen wirkenden Kraft. Die Reflexion des Lichtes an einem Spiegel wird als identisch angesehen mit der Reflexion von Lichtstrahlen.
Für den Unterricht folgt hieraus:

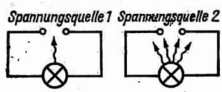
Durch einen Vergleich der symbolhaft-schematischen Darstellungen mit den vorangegangenen bildlichen Veranschaulichungen wird herausgearbeitet, in welcher Weise die wesentlichen Eigenschaften der realen Objekte in den idealisierten Eigenschaften der idealisierten Objekte verallgemeinert sind.

Im Ergebnis dieser Vergleiche wird die auf der Erkenntnisebene Wirklichkeit formulierte Erkenntnis (vgl. die Teile (1b) in den Tafeln 2.2./1 bis 8) in die Fachsprache der Physik übersetzt, es entstehen die Teile (2b) in den Abstraktionsreihen.
Wenn für das idealisierte Objekt im Unterricht ein Modell behandelt wird, so werden die Eigenschaften und Zusammenhänge anschließend oder sofort im Modell gedeutet (vgl. die Teile (2c) und (2d) in den Tafeln 2.2./3 und 2.2./7).

Tafel 2.2./5: Abstraktionsreihe zum Ohmschen Gesetz (in der Form $I \sim U$)

Wir beobachten und vergleichen.

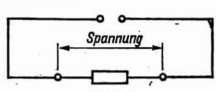
(1a) (Wirklichkeit)



(1b) Wenn in einem Stromkreis die Spannungsquelle ausgewechselt wird, so kann sich die Helligkeit der Lampe im Stromkreis ändern.

Wir vereinfachen.

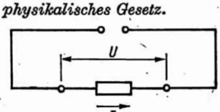
(2a) (Idealisierung)



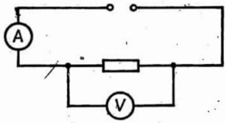
(2b) Wenn an einem Bauteil die Spannung geändert wird, dann ändert sich auch die Stromstärke.

Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz.

(3a) Einführen der Formelzeichen: (Diagramm)



(3b) Meßanordnung und Meßtabelle:



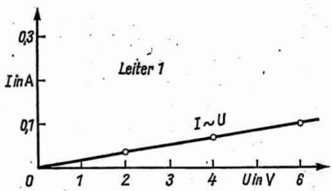
Leiter 1:

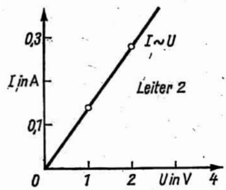
U in V	I in A
2,0	0,039
4,0	0,076
6,0	0,11

Leiter 2:

U in V	I in A
1,0	0,15
2,0	0,31
3,0	0,46

(3c) Graphische Darstellung und Auswertung:

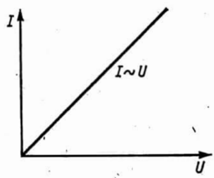




Wir fassen zusammen.

(4)

Für einen metallischen Leiter gilt:
Die Stromstärke I ist der Spannung U proportional ($I \sim U$).



(Gültigkeitsbedingung: konstante Temperatur)

(Das heißt:
Wird die Spannung verdoppelt, so wird auch die Stromstärke doppelt so groß.
Wird die Spannung verdreifacht, so wird auch die Stromstärke dreimal so groß.)

2.2.3. Wir untersuchen die Erscheinungen und Vorgänge mit Hilfe der Mathematik genauer

Die physikalischen Zusammenhänge der idealisierten Objekte werden nunmehr auf mathematische Zusammenhänge in Form von Diagrammen und Gleichungen abgebildet. Die Erkenntnisebene sind jetzt Gleichungen und Diagramme. Entsprechend der im Kapitel 3 ausführlich dargestellten Spezifik der jeweiligen Anwendungen der Mathematik im Physikunterricht wird dieser Schritt (3) in den Abstraktionsreihen unterschiedlich formuliert.

Einführen der Formelzeichen. In der Abstraktionsreihe beginnt der Übergang von den physikalischen Idealisierungen zu den Größengleichungen und zu den Diagrammen mit dem Übergang von den Bezeichnungen der physikalischen Größen zu deren Formelzeichen in der symbolhaft-schematischen Zeichnung.

Es entstehen die Teile (3a) in den Tafeln 2.2./1 bis 8. Um für die Schüler die Verbindung dieser mathematisch-abstrakten Darstellung zur Wirklichkeit nicht abreißen zu lassen, läßt man von den Schülern für jede der im Teil „Wirklichkeit“ dargestellten bildlichen Veranschaulichungen erläutern, wie dort die jeweiligen physikalischen Größen und deren Formelzeichen eingetragen werden müßten.

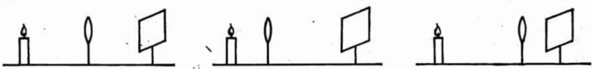
Sind bei den Formelzeichen *Indizes* erforderlich, so sollten diese selbst Träger der notwendigen Information sein. Dazu sind häufig die entsprechenden Stichwörter oder deren Anfangsbuchstaben besser geeignet als die Ziffern „1“ und „2“, da diese Ziffern vielfach weitere Kommentare erfordern, um verständlich zu sein.

So empfehlen wir zur Bezeichnung der Kräfte an kraftumformenden Einrichtungen die Formelzeichen F_{Hub} und F_{Zug} und nicht die inhaltsarmen Angaben F_1 und F_2. Beim Hebelgesetz hingegen sind die Formelzeichen F_1 und F_2 inhaltlich ausreichend, eine genauere Kennzeichnung durch F_{links} oder ähnliche Indizes würde keinen Informationsgewinn darstellen.

Tafel 2.2./6: Abstraktionsreihe zur theoretischen Erarbeitung der Linsengleichung (in der Newtonschen Formulierung) mit Hilfe einer mathematischen Deduktion

Wir beobachten und vergleichen.

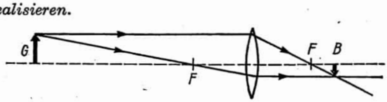
(1a) (Wirklichkeit)



(1b) Wenn sich der Gegenstand auf die Linse zubewegt, dann entfernt sich das Bild von ihr. Wenn sich der Gegenstand von der Linse wegbewegt, dann bewegt sich das Bild auf sie zu.

Wir idealisieren. (Idealisierung/Modell: Lichtstrahl)

(2a)

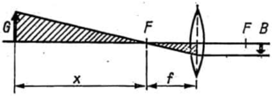


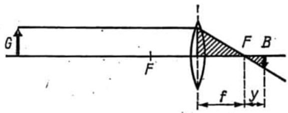
Bedingungen: achsennahe Strahlen, dünne Linsen

(2b) Der Abstand des Bildes von der Linse hängt vom Abstand des Gegenstandes von der Linse und von der Brennweite der Linse ab.

Wir leiten ein physikalisches Gesetz her.

(3a) Einführen der Formelzeichen: (Gleichung)





(3 b) Ansatz: Ähnlichkeit zweier Dreiecke

(3c) Als Gleichung geschrieben:

Ansatz 1: $G:B = x:f$

Ansatz 2: $G:B = f:y$

(3d) Umformungen:

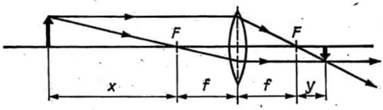
$x:f = f:y$

$x \cdot y = f^2$

fassen zusammen.

(4)

Linsengleichung (in der Newtonschen Formulierung)



Der Abstand des Gegenstandes und der Abstand des Bildes von den Brennpunkten der Linse sind indirekt proportional zueinander.
Es gilt die Linsengleichung:

$x \cdot y = f^2$

(Gültigkeitsbedingungen: dünne Linse, achsennahe Strahlen)

Darin bedeuten:

x den Abstand des Gegenstandes vom gegenstandseitigen Brennpunkt (in mm),

y den Abstand des Bildes vom bildseitigen Brennpunkt (in mm),

f die Brennweite der Linse (in mm).

Finden eines Ansatzes zur Abbildung der physikalischen Zusammenhänge auf mathematische Zusammenhänge. Bei der Abbildung physikalischer Eigenschaften und Zusammenhänge auf mathematische Zusammenhänge werden die physikalischen Eigenschaften und Zusammenhänge auf mathematische Terme und auf mathematische Beziehungen zwischen diesen abgebildet. Solche mathematischen Terme sind zum Beispiel Quotienten, Produkte, Summen, Differenzen, Potenzen, Differenzenquotienten, Differentialquotienten oder bestimmte Integrale aus physikalischen Größen. Zwischen diesen Termen besteht eine der mathematischen Beziehungen größer, gleich, kleiner oder ungleich. Dieser Schritt, der Übergang zur Gleichung, bereitet den Schülern erfahrungsgemäß große Schwierigkeiten. Zugleich ist das Verständnis dieses Schrittes von großer Bedeutung für die Herausbildung der wissenschaftlichen Weltanschauung, denn durch die Anwendung der Mathematik lernen die Schüler die Darstellung der physikalischen Zusammenhänge und Gesetze in der für die Physik typischen Form von Gleichungen kennen. Für eine erfolgreiche Einführung der Schüler in die Anwendung der Mathematik in der Physik ist es deshalb unerläßlich, daß die Schüler erkennen können, wie und aus welchem Ansatz die Gleichungen entstehen. Das heißt:

a) Wird ein Gesetz empirisch erarbeitet, so muß den Schülern so oft wie möglich Gelegenheit gegeben werden, die Meßanordnung und die Meßtabelle selbst vorzubereiten und die Messungen im Schülerexperiment durchführen zu können. Die Auswertung der Meßwerte sollte in den Anfangsklassen zunächst zu einer Wortgleichung führen.
b) Wird ein Gesetz theoretisch erarbeitet, so wird der Übergang vom physikalischen Zusammenhang zur Größengleichung durch die wörtliche Formulierung des Ansatzes in Form einer Wortgleichung vorbereitet.
c) Wird die Definitionsgleichung einer physikalischen Größe erarbeitet, so muß den Schülern der Zusammenhang bewußt werden, auf dessen Grundlage die Festlegung der Definitionsgleichung erfolgt. Diese Festlegung sollte ebenfalls zunächst als Wortgleichung formuliert werden.

In den Abstraktionsreihen entstehen die Teile (3b).

Unter Benutzung der eingeführten Formelzeichen wird die Wortgleichung in eine Größengleichung übersetzt.

Diesen Übergang zur Größengleichung kann man den Schülern in den Abstraktionsreihen durch den Zusatz „als Gleichung geschrieben" bewußtmachen (vgl. die Teile (3c) in den Tafeln 2.2./1, 2.2./4, 2.2./6 und 2.2./7!). Wenn es sich bei der Erarbeitung einer Gleichung um die theoretische Erarbeitung eines physikalischen Gesetzes mit Hilfe der Mathematik handelt, schließen sich hieran Umformungen der Gleichungen an (vgl. Teil (3d) in Tafel 2.2./6).

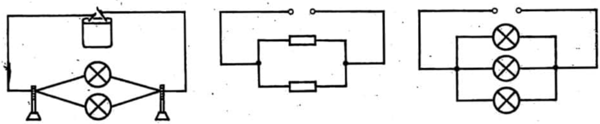
Physikalische Zusammenhänge können auf verschiedene Gleichungen abgebildet werden. Die Vielfalt der möglichen Gleichungen für ein und denselben physikalischen Zusammenhang ist durch folgende Umstände bedingt:

— Die physikalischen Objekte können auf verschiedene Idealisierungen (Modelle) abgebildet werden.
  So lautet das Ohmsche Gesetz
  im Kontinuumsmodell: $I = \frac{U}{R}$ und
  im Teilchenmodell: $I = N \cdot A \cdot u \cdot e$.
— Die Wahl des Beobachtungssystems ist weitgehend beliebig. Deshalb ist die mathematische Formulierung eines physikalischen Gesetzes vom Bezugssystem und von der Betrachtungsweise eines Vorganges abhängig.
  So lautet die Linsengleichung je nach dem Bezugspunkt für die Messung der Gegenstands- bzw. Bildweite
  in der Newtonschen Formulierung: $x \cdot y = f^2$ und
  in der üblichen Formulierung: $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$.

Tafel 2.2./7: Abstraktionsreihe zur theoretischen Erarbeitung des Gesetzes für die Stromverzweigung aus dem Modell

Wir beobachten und vergleichen.

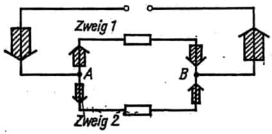
(1a) (Wirklichkeit)



(1b) Bei der Parallelschaltung von elektrischen Geräten verzweigt sich der elektrische Strom.

Wir deuten das im Modell.

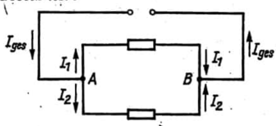
(2a) (Modell)



(2b) Im Verzweigungspunkt A teilt sich der Elektronenfluß in zwei Teilströme, die sich im Punkt B wieder zu dem ursprünglichen Gesamtstrom vereinigen.

Wir leiten ein physikalisches Gesetz her.

(3a) Einführen der Formelzeichen: (Gleichung)



(3b) Ansatz:

Im Punkt A gilt:

Die Anzahl der dem Punkt A in einer Sekunde zufließenden Elektronen	=	der Anzahl der vom Punkt A über den Zweig 1 abfließenden Elektronen	+	der Anzahl der vom Punkt A über den Zweig 2 abfließenden Elektronen.

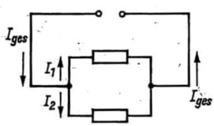
(3c) Als Gleichung geschrieben:

Im Punkt A gilt: $I_{ges} = I_1 + I_2$

Im Punkt B gilt: $I_1 + I_2 = I_{ges}$

Wir fassen zusammen.

(4) In einem verzweigten Stromkreis ist die Gesamtstromstärke gleich der Summe aus den Stromstärken der Teilströme.



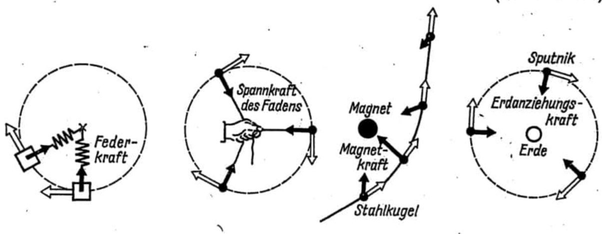
Es gilt:
$I_{ges} = I_1 + I_2$

— Physikalische Theorien können mit einem unterschiedlichen Grad der Verallgemeinerung formuliert werden.
So lautet die Definitionsgleichung für die mechanische Arbeit
bei konstanten Kräften: $W = F \cdot s$ und
bei beliebigen Kräften: $W = \int F \, ds$.
Die verschiedenen mathematischen Darstellungsweisen sind durch mathematische Operationen ineinander überführbar. Das ist der Ausdruck dafür, daß die physikalische Betrachtungsweise und die Modelle jederzeit gewechselt werden können.
Im Unterricht wird ein physikalischer Zusammenhang in einer Klassenstufe meistens nur auf eine Gleichung abgebildet, die im Lehrplan oder im Lehrbuch vorgegeben ist. Wird im Verlauf des Physikunterrichts ein physikalischer Zusammenhang auf zwei Gleichungen abgebildet, so ist den Schülern zu zeigen, wie diese Gleichungen durch einen Wechsel der physikalischen Betrachtungsweise ineinander überführt werden können.

Physikalische Interpretation der mathematischen Zusammenhänge für die idealisierten Objekte. Um aus den erhaltenen Gleichungen und Diagrammen Aussagen über die in der Natur existierenden physikalischen Zusammenhänge zu machen, müssen die mathematischen Zusammenhänge unter Berücksichtigung der beim Übergang zur mathematischen Darstellung eingeführten „Übersetzungsregeln" wieder „zurückübersetzt" werden. Diese Interpretation bezieht sich zunächst auf die idealisierten Objekte.
Im Unterricht ist hierbei häufig der Fehler anzutreffen, daß die sogenannte wörtliche Formulierung einer Definition oder eines Gesetzes nur die wörtliche Wiedergabe der in der Gleichung enthaltenen mathematischen Terme ist. Bei einem solchen Vorgehen kann sich für die Schüler ein ähnlicher Prozeß wiederholen, wie ihn Lenin für die Krise der Physik mit den bekannten Worten charakterisiert hat: „Die Materie verschwindet, es bleiben einzig und allein Gleichungen" [7; S. 310].
Demgegenüber kann aber gerade mit Hilfe der wörtlichen Formulierung einer Definition oder eines Gesetzes die Verbindung der Gleichung mit den physi-

Tafel 2.2./8: Abstraktionsreihe zu der gegebenen Gleichung für die Radialkraft

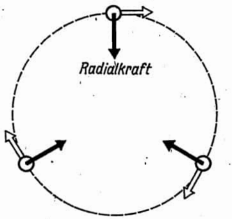
Wir beobachten und vergleichen.
(1a) (Wirklichkeit)



(1b) Wenn sich ein Körper auf einer Kreisbahn bewegen soll, dann muß auf diesen Körper eine auf den Kreismittelpunkt gerichtete Kraft wirken.
Ohne eine solche Kraft fliegt ein Körper tangential zur Kreisbahn weg.

Wir idealisieren.

(2a) (Idealisierung)



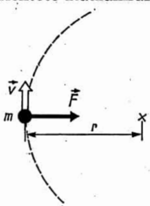
(2b) Jede auf einen Körper wirkende Kraft erteilt diesem eine Beschleunigung. Diese kann in einer Änderung des Betrages oder der Richtung der Geschwindigkeit bestehen. Die Bewegung eines Massenpunktes auf einer Kreisbahn ist eine beschleunigte Bewegung, denn es wird ständig die Richtung der Bewegung und damit auch die Richtung der Geschwindigkeit geändert.
Für diese Beschleunigung ist eine Kraft erforderlich. Diese wird Radialkraft genannt.
Die Radialkraft ist die Kraft, die die ständige Änderung der Richtung der Geschwindigkeit eines sich auf einer Kreisbahn bewegenden Massenpunktes bewirkt. Sie ist in allen Stellen auf den Mittelpunkt der Kreisbahn gerichtet.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

(3/4) Durch physikalische und mathematische Überlegungen wurde folgendes Gesetz hergeleitet: (Gleichung)

Für die Bewegung eines Massenpunktes auf einer Kreisbahn ist eine zum Kreismittelpunkt gerichtete Radialkraft F_R notwendig.
Es gilt:

$$F_R = \frac{m \cdot v^2}{r}$$



(Gültigkeitsbedingung: gleichförmige Kreisbewegung)

Darin bedeuten:

F_R den Betrag der Radialkraft (in N),
m die Masse des Körpers (in kg),
v den Betrag der Geschwindigkeit des Körpers (in $m \cdot s^{-1}$),
r den Radius der Kreisbahn (in m).

kalischen Objekten hergestellt und die Entwicklung physikalischer Vorstellungen und Denkweisen unterstützt werden. (Vgl. hierzu die Teile (4) in den Tafeln 2.2./1 bis 8 und ebenso in den nachfolgenden Tafeln!)
Für die wörtliche Formulierung der Definition einer physikalischen Größe erfordert dies:

In der wörtlichen Formulierung der Definition abgeleiteter physikalischer Größen müssen für die Schüler sowohl die quantitativen als auch die qualitativen Merkmale der Größe enthalten sein.

Für die wörtliche Formulierung eines physikalischen Gesetzes heißt das:

Bei der wörtlichen Formulierung eines Gesetzes muß der dialektische Charakter der durch das Gesetz erfaßten physikalischen Erscheinungen und Prozesse zum Ausdruck gebracht werden.

Dies ist besonders deshalb wichtig, weil aus der mathematischen Darstellung des Gesetzes nicht auf Ursache und Wirkung geschlossen werden kann (vgl. Abschnitt 3.3.1.).
Als weitere Forderung an die wörtliche Formulierung physikalischer Gesetze gilt:

Bei physikalischen Erscheinungen und Vorgängen mit großer technischer Bedeutung sollte die Formulierung der Gesetze so erfolgen, daß den Schülern die praktische Möglichkeit der Steuerung physikalischer Prozesse auf der Grundlage dieser Gesetze ersichtlich wird.

Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen. Die idealisierten Objekte enthalten — wie bereits dargestellt — Annahmen, die in der Natur nicht oder nur annähernd gegeben sind, und stellen damit nur Näherungen oder Ersatzobjekte der realen Objekte dar. Hieraus folgt, daß auch die Gleichungen für die idealisierten Objekte nur Näherungen für die realen Objekte darstellen können. Der Gültigkeitsbereich der (idealisierten) Gleichungen wird durch die Grenzen bestimmt, innerhalb derer die ihnen zugrunde liegenden physikalischen Idealisierungen als erfüllt angesehen werden dürfen (vgl. Übersicht 2.2./1). Oder mit anderen Worten: Nicht die Mathematik ist ungenau, sondern die idealisierten Objekte, auf die die Mathematik angewendet wird, sind ungenau. (Dies führt dazu, daß in der angewandten Physik vielfach die idealisierten Gleichungen mit Korrekturgliedern versehen werden müssen.)
Zum Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen für eine Gleichung gibt es im Unterricht verschiedene Möglichkeiten:
Die Gültigkeitsbedingungen können unmittelbar in die wörtliche Formulierung der Definitionen bzw. der Gesetze aufgenommen werden. Diese beginnen dann „Unter der Voraussetzung, daß ... konstant ist, gilt ...“ oder „Für ... gilt: ...“ (vgl. Teil (4) in Tafel 2.2./5).
Der Nachteil solcher Formulierungen besteht darin, daß diese zumindest für die Schüler in den Anfangsklassen für ein Einprägen ins Gedächtnis zu lang und zu kompliziert werden. Günstiger erscheint uns ein Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen in Zusammenfassungen (vgl. Teil (4) in den Tafeln 2.2./1, 2.2./2, 2.2./5 und 2.2./6) und in Systematisierungen (vgl. Abschnitte 2.2.8. und 3.1.3.).

2.2.4. Wir fassen zusammen

Das bisher erarbeitete Wissen wird jetzt in übersichtlicher Form zusammengefaßt. Diese Zusammenfassungen stellen den Abschluß der Abstraktionsreihen dar.
Die Zusammenfassungen zur Definition einer abgeleiteten physikalischen Größe enthalten (vgl. die Teile (4) in den Tafeln 2.2./1 und 2):

— die durch die Größe erfaßte physikalische Eigenschaft in der Formulierung „Die ... gibt an, wie ...“ oder in der Abiturstufe „Die ... ist ein Maß für ...“ (qualitatives Merkmal der Größe),
— in den Anfangsklassen eine halbquantitative Formulierung der Definition in der Form „Die ... ist um so größer, je ...“,
— eine symbolhaft-schematische Darstellung der Größen,
— das Formelzeichen,
— die Definitionsgleichung (quantitatives Merkmal der Größe),
— die physikalische Bedeutung der in der Definitionsgleichung enthaltenen Größen und deren Einheiten (besonders in den Anfangsklassen),
— die Umrechnung der Einheiten (wenn sinnvoll),
— die Gültigkeitsbedingungen für die Anwendbarkeit der Definitionsgleichung.

Bei den Zusammenfassungen zur Definition einer physikalischen Basisgröße tritt an die Stelle der Definitionsgleichung die Darstellung der Meßvorschrift und die Festlegung der Einheit der Größe (vgl. Teil (4) in Tafel 2.2./3).
Die Zusammenfassungen zu einem physikalischen Gesetz enthalten (vgl. die Teile (4) in den Tafeln 2.2./4 bis 8):

— die wörtliche Formulierung des Gesetzes,
— ggf. eine kurze Interpretation der im Gesetz erfaßten Proportionalität,
— eine symbolhaft-schematische Darstellung der Größen,
— die Größengleichung bzw. das Diagramm,
— die Gültigkeitsbedingungen für das Gesetz,
— die physikalische Bedeutung der in der Gleichung bzw. im Diagramm enthaltenen Größen und deren Einheiten (besonders in Anfangsklassen).

Zur Erarbeitung dieser Zusammenfassungen gehört es auch, daß die Schüler aufgefordert werden, wesentliche Aussagen zu einer neu erarbeiteten physikalischen Größe oder zu einem neu erarbeiteten physikalischen Gesetz in den „Tabellen und Formeln“ aufzusuchen.

Die hier vorgeschlagenen Zusammenfassungen übernehmen die Funktion einer Denkstütze oder einer Orientierungsgrundlage für die weiteren Lernhandlungen der Schüler.

Durch die nachfolgende Anwendung dieser Zusammenfassungen auf verschiedene praktische Sachverhalte erhält der Schüler die Möglichkeit, die allgemeinen, wesentlichen physikalischen Zusammenhänge zu erkennen und zur Lösung der Aufgaben anzuwenden. In diesem Sinne stellen die Zusammenfassungen gleichzeitig auch den Anfang von Konkretisierungsreihen dar. Das heißt:

Im nachfolgenden Erkenntnisprozeß wird stets von diesen Zusammenfassungen ausgegangen.

2.2.5. Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung (bzw. des Diagramms) an einigen einfachen Beispielen

Beim ersten Teil der physikalischen Interpretation wurden die in den Größengleichungen und Diagrammen enthaltenen physikalischen Aussagen für die idealisierten Objekte formuliert (vgl. Abschnitt 2.2.3.). Im zweiten Teil der physikalischen Interpretation der Größengleichungen und Diagramme muß man diese Aussagen schließlich in die „Muttersprache und die Sprache der Natur übersetzen — in Kupferwürfel und Glaskugeln, mit denen man experimentieren wird“ [8; S. 56], denn der Physiker darf natürlich nicht vergessen, „wo hinter dem Formelkram die lebendige Natur steckt“ [9; S. 106f.]. Bei dieser Interpretation müssen die Schüler die Gleichungen und Diagramme gewissermaßen physikalisch fühlen. Dies bereitet den Schülern aber ebenso wie der Übergang zur Gleichung große Schwierigkeiten. Für die Überwindung dieser Schwierigkeiten ist zu empfehlen, die Größengleichungen durch *Konkretisierungsreihen* zu interpretieren. Solche Konkretisierungsreihen stellen ein Aufsteigen von der Größengleichung über die mathematisch durchdrungene Idealisierung zur theoretisch durchdrungenen Wirklichkeit dar; sie sind somit kein einfaches „Rückkehren“ oder „Absteigen“ zu der empirischen Erkenntnisebene Wirklichkeit am Anfang der Abstraktionsreihe. Diese Konkretisierungsreihen können aus vier Teilen bestehen, die in den folgenden Bildern mit (5a) bis (5d) bezeichnet werden.

Erläutern des Inhalts der Gleichung bzw. des Diagramms. Ausgehend von den Zusammenfassungen, wird der Inhalt der Gleichung bzw. des Diagramms an Hand von bildlich-anschaulichen Darstellungen für verschiedene reale Objekte erläutert.

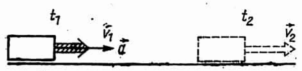
Dabei entstehen die Teile (5a) in den Konkretisierungsreihen. (Vgl. Tafeln 2.2./9 bis 12! In den Tafeln 2.2./10 und 2.2./11 sowie in den nachfolgenden Tafeln sind die Teile (5a) aus Platzgründen nicht gesondert dargestellt, sondern mit den Teilen (5b) vereint, so daß man sich in den Teilen (5a/5b)

Tafel 2.2./9: Konkretisierungsreihe zur physikalischen Größe „Beschleunigung“

Wir fassen zusammen.

(4)

Die Beschleunigung eines Körpers gibt an, wie schnell sich dessen Geschwindigkeit ändert.



(Gültigkeitsbedingung: gleichmäßig beschleunigte Bewegung)

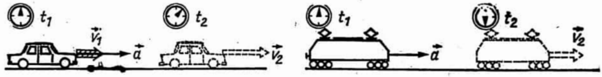
Definitionsgleichung:

$$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$$

Darin bedeuten:	a	die Beschleunigung (in $m \cdot s^{-2}$),
	v_2	die Endgeschwindigkeit (in $m \cdot s^{-1}$),
	v_1	die Anfangsgeschwindigkeit (in $m \cdot s^{-1}$),
	Δt	die Zeitdauer für die Beschleunigung (in s).

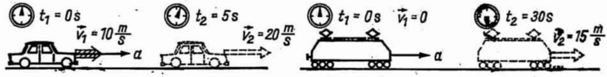
Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

(5a) Zeitpunkt 1: Zeitpunkt 2: Zeitpunkt 1: Zeitpunkt 2:



$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \qquad a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

(5b)



$$a = \frac{20\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{5\text{ s}} = \frac{10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{5\text{ s}} = 2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \qquad a = \frac{15\,\frac{\text{m}}{\text{s}} - 0\,\frac{\text{m}}{\text{s}}}{30\text{ s}} = 0{,}5\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

(5c) Ein Fahrzeug hat eine Beschleunigung von $2\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$.
Das bedeutet:

v	t
$0\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$	0 s
...	5 s
$20\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$	...
$30\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$	...

t	v
0 s	$10\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$
...	$12\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$
5 s	...
...	$30\,\frac{\text{m}}{\text{s}}$

(5d) Ein Fahrzeug erreicht aus dem Stand in 5 Sekunden eine Geschwindigkeit von $40\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$ und bewegt sich dann eine Zeitlang mit dieser Geschwindigkeit. Nach einer Zeit wird das Fahrzeug nochmals beschleunigt. Es erreicht dabei nach 10 Sekunden eine Geschwindigkeit von $80\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$.

a) Vergleiche jeweils die Geschwindigkeitsänderung und die dazu erforderliche Zeitdauer!

b) Vergleiche ohne Berechnung die jeweils auftretenden Beschleunigungen!

zunächst die konkreten Angaben von Werten für die Größen wegzudenken hat.)

In diese bildlichen Veranschaulichungen werden für die jeweiligen physikalischen Größen die entsprechenden Formelzeichen eingetragen. An Hand dieser Veranschaulichungen wird dann die Größengleichung durch die Schüler an der Tafel für jede Zeichnung interpretiert, wobei jeweils mit den Händen auf die symbolische Darstellung der einzelnen physikalischen Größen gezeigt wird, über die gerade gesprochen wird. Bei diesen Veranschaulichun-

gen wird man zunächst mit jenen Objekten beginnen, die bei der Einführung der Definitionen oder bei der Erarbeitung der Gesetze benutzt wurden. Anschließend sollte man zu weiteren Objekten übergehen, ansonsten besteht die Gefahr, daß die Schüler in ihrem Denken einen physikalischen Zusammenhang einzig und allein mit dem einen im Unterricht besprochenen Beispiel oder nur mit dem einen im Experiment benutzten Gerät verbinden. Die Variierung der Objekte und insbesondere auch die Variierung der nebensächlichen Elemente ist für die Interpretation und für die spätere Anwendbarkeit der Gleichung durch die Schüler von großer Bedeutung.
Zu diesem Zweck ist es auch nützlich, den Schülern die Aufgabe zu stellen: „Nennt Beispiele aus dem täglichen Leben, bei denen ihr das Wirken des neu erarbeiteten Gesetzes schon beobachten konntet!"

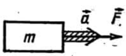
Tafel 2.2./10: Konkretisierungsreihe zum Newtonschen Grundgesetz

Wir fassen zusammen.

(4)

Jede auf einen frei beweglichen Körper einwirkende Kraft erteilt diesem eine Beschleunigung, deren Betrag der Kraft direkt und der Masse des Körpers umgekehrt proportional ist. Die Richtung der Beschleunigung stimmt mit der Richtung der Kraft überein.

$$a = \frac{F}{m}$$



Bedingung: F = konstant

Darin bedeuten:

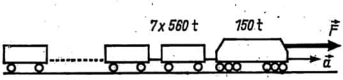
a den Betrag der Beschleunigung $\left(\text{in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$,

F den Betrag der Kraft (in N), $\quad 1\,\text{N} = 1\,\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$

m die Masse (in kg).

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

(5a/b) Industrielok EL 1 für Erztagebau



$F = 450\,\text{kN}$

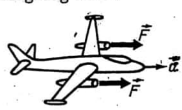
$m_{ges} = 4\,070\,000\,\text{kg}$

$a = \frac{F}{m_{ges}}$

$a = \frac{450\,000\,\text{N}}{4\,070\,000\,\text{kg}}$

$a = 0{,}11\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Flugzeug IL-62



$F_{ges} = 4 \cdot 105\,000\,\text{N}$

$m = 160\,\text{t}$

$a = \frac{F_{ges}}{m}$

$a = \frac{420\,000\,\text{N}}{160\,000\,\text{kg}}$

$a = 2{,}6\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

(5c) Vervollständigen Sie die folgende Tabelle!

	F	m	a
Körper 1	...	1000 kg	$2{,}5\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$
Körper 2	1000 N	...	$4{,}0\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$
Körper 3	200 N	100 kg	...

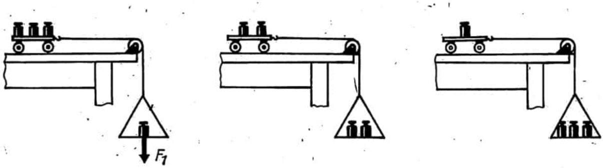
Beantworten Sie folgende Fragen!
Auf welchen Körper wirkt die größte bzw. die kleinste Kraft?
Welcher Körper hat die größte bzw. die kleinste Masse?
Welcher Körper erhält die größte bzw. die kleinste Beschleunigung?
Welche Verkehrsmittel (einschließlich Fahrer) könnten die einzelnen Körper sein?

(5d) 1. Vervollständigen Sie die folgenden Tabellen!

F	m	a
$1\,F$	$1\,m$	$1\,a$
$2\,F$	$1\,m$	...
$6\,F$	$1\,m$	...
$1\,F$	$2\,m$	...
$1\,F$	$4\,m$	...

F	m	a
$6\,F$	$3\,m$	...
$8\,F$	$2\,m$	...
$2\,F$	$4\,m$	...
...	$2\,m$	$2\,a$
$3\,F$	...	$1\,a$

2. Beantworten Sie zu den drei Bildern folgende Fragen:



a) Welche Kraft beschleunigt den Wagen im Bild 1?
b) Woraus setzt sich die Masse zusammen, die in dem im Bild 1 dargestellten Vorgang beschleunigt wird?
c) Welche der drei Größen a, F oder m ist in den in den Bildern dargestellten Vorgängen konstant?
d) Die Beschleunigung im Bild 1 nennen wir a_1, die Kraft F_1. Vergleichen Sie in den Bildern 2 und 3 die Kräfte F_2 und F_3 mit F_1 und die Beschleunigungen a_2 und a_3 mit a_1!

Ausgehend von den Zusammenfassungen und von den Veranschaulichungen, werden die in den Größengleichungen bzw. in den Diagrammen enthaltenen physikalischen Größen an verschiedenen realen Objekten erläutert. Hierbei kommt es darauf an, die physikalischen Größen in den erarbeiteten Größengleichungen bzw. Diagrammen in einen untrennbaren Zusammenhang mit den realen Objekten zu bringen. Dieser Zusammenhang sollte für alle Schüler möglichst immer anschaulich hergestellt werden. So kann man bei der Masse sowohl auf das Formelzeichen an der Tafel als auch auf den jeweiligen Körper auf dem Demonstrationstisch zeigen, entsprechende Möglichkeiten gibt es für die meisten physikalischen Größen. Erst hierdurch entsteht für manche Schüler die Verbindung zwischen der Gleichung und den realen Vorgängen.

Tafel 2.2./11: Konkretisierungsreihe für die Gleichung zur Berechnung der Wärme

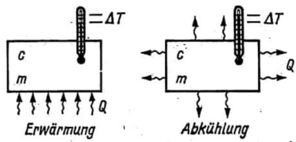
Wir fassen zusammen.

(4)

Die zur Temperaturerhöhung eines Körpers erforderliche Wärme Q ist von der spezifischen Wärmekapazität c des Stoffes, aus dem der Körper besteht, von der Masse m des Körpers und von der zu erreichenden Temperaturerhöhung ΔT abhängig. Bei der Abkühlung des Körpers wird diese Wärme wieder frei.

Es gilt:

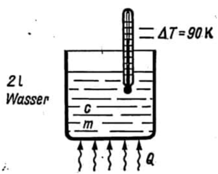
$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$



Größe	Q	c	m	ΔT
Einheit	kJ	$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	kg	K

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

(5a/b) Erhitzen (von 2 l Wasser)



$c = 4{,}2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

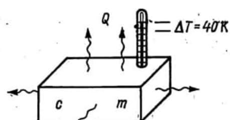
$m = 2\,\text{kg}$

$\Delta T = 80\,\text{K}$

$Q = 4{,}2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2\,\text{kg} \cdot 80\,\text{K}$

$Q = 700\,\text{kJ}$

Abkühlen (eines Mauersteins)



$c = 0{,}8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

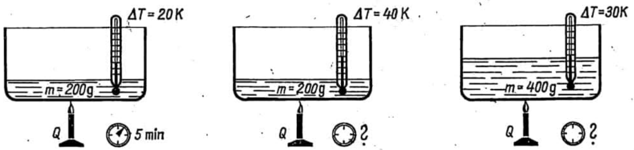
$m = 3{,}2\,\text{kg}$

$\Delta T = 40\,\text{K}$

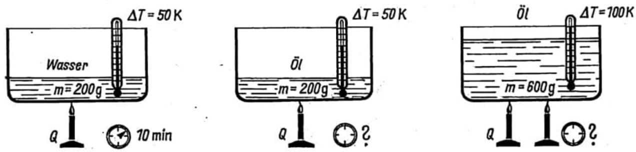
$Q = 0{,}8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 3{,}2\,\text{kg} \cdot 40\,\text{K}$

$Q = 100\,\text{kJ}$

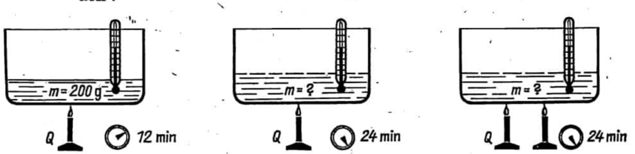
(5c/d) 1. Im Versuch a wird die Temperatur von 200 g Wasser um 20 K erhöht. Wie lange muß in den Versuchen b und c die Wärmezufuhr dauern?



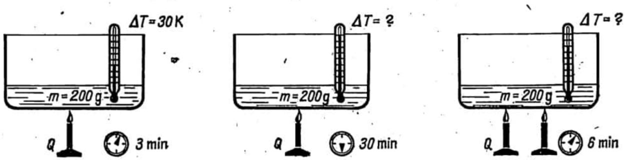
2. Im Versuch a wird die Temperatur von 200 g Wasser um 50 K erhöht. Wie lange muß in den Versuchen b und c die Wärmezufuhr dauern?



3. Im Versuch a wird die Temperatur von 200 g Wasser um 60 K erhöht. Wieviel Wasser kann in den Versuchen b und c um 60 K erwärmt werden?



4. Im Versuch a wird die Temperatur von 200 g Öl um 30 K erhöht. Welche Temperaturerhöhung wird in den Versuchen b und c erreicht?



Erstes Lösen von Aufgaben. Ziel dieser Aufgaben ist es, daß sich die Schüler im rechnerischen Umgang mit den Gleichungen und den Einheiten sowie im Bestimmen von Wertepaaren aus dem Diagramm üben, und daß bei den Schülern das physikalische Verständnis der Gleichungen und Diagramme vertieft wird. Dazu ist es erforderlich, auf ein ausgewogenes Verhältnis zwischen verschiedenen Aufgabentypen und zwischen verschiedenen Lösungsmethoden zu achten. Das kann durch folgendes Vorgehen erreicht werden:

Ausgehend von den Zusammenfassungen und von den bildlich-anschaulichen Darstellungen, werden einige einfache Aufgaben durch kalkülmäßiges Berechnen gelöst (vgl. hierzu Abschnitt 3.6.2.).

Durch das kalkülmäßige Berechnen, das am Anfang auch an relativ formalen Aufgaben erfolgen kann, üben sich die Schüler vor allem im rechnerischen Umgang mit den Gleichungen und den Einheiten bzw. im Ablesen von Wertepaaren aus den Diagrammen. Ein Umstellen der Gleichung in eine andere Form als die in der Zusammenfassung gegebene erfolgt hierbei nicht. In den Tafeln 2.2./9 bis 11 entstehen die Teile (5b).

In den Anfangsklassen entstehen bei Anwendungsaufgaben zur mechanischen Arbeit, zur mechanischen Leistung und zum Druck Zahlenwerte, die den Schülern auf Grund der großen Stellenzahl Schwierigkeiten bereiten. Deshalb sollte der Lehrer entscheiden, ob er den Schülern nach dem ersten Lösen von Aufgaben zeigt, wie man bei Beibehaltung der großen Einheiten für die Kraft (kN oder MN) bzw. für die mechanische Arbeit (kJ) rechnen kann. Eine solche Einheitenrechnung sollte allein einigen Anwendungsaufgaben zu diesen physikalischen Größen vorbehalten bleiben. Der Lehrer kann dazu die entsprechende Einheitenrechnung in die Zusammenfassung nachtragen lassen (vgl. Tafel 3.1./2, Tafel 3.1./3 und Tafel 3.1./5).

Ausgehend von den Zusammenfassungen und von den bildlich-anschaulichen Darstellungen werden einige einfache Aufgaben durch inhaltliches Berechnen gelöst (vgl. hierzu Abschnitt 3.6.2.).

Durch das inhaltliche Berechnen, das am Anfang ebenfalls an relativ formalen Aufgaben erfolgen kann, vertiefen die Schüler vor allem ihr Verständnis der physikalischen Zusammenhänge. Diese Aufgaben werden durch logisches Schließen gelöst, das sich auf einer inhaltlichen physikalischen und mathematischen Analyse der in der Gleichung erfaßten Zusammenhänge gründet. In den nachfolgenden Tafeln ist in den Teilen (5c) aus Platzgründen jeweils nur eine Aufgabe angegeben. (In einigen Tafeln entfällt dieser Teil (5c), da das Lösen solcher Aufgaben nur bei Gleichungen mit einfachen mathematischen Strukturen sinnvoll ist.) Die Zuordnung der Aufgabentypen zu den einzelnen Gleichungen ist relativ zufällig, sie können vom Lehrer weitgehend ausgetauscht werden. Es können auch zu jeder Gleichung mehrere dieser Aufgabentypen eingesetzt werden.
Das Lösen dieser Aufgaben würde das gestellte Ziel verfehlen, wenn es wie beim kalkülmäßigen Berechnen durch das Umstellen von Gleichungen und durch das Einsetzen von Größen in Gleichungen erfolgen würde.

Ausgehend von den Zusammenfassungen und von den bildlich-anschaulichen Darstellungen, werden einige Aufgaben durch eine Untersuchung der physikalischen Abhängigkeiten gelöst.

Beispiele hierfür sind in den Teilen (5d) der nachfolgenden Tafeln angeführt. Die jeweiligen Aufgabentypen sind wiederum austauschbar. Diesen Teilen sollten insgesamt Aufgaben vorausgehen wie „Nenne die physikalischen Größen, von denen die ... abhängig ist!“, „Nenne die Bedingungen, unter denen das Gesetz gilt!“ oder „Nenne physikalische Größen, von denen die ... nicht abhängig ist!“.
Für alle Aufgaben aus den Teilen (5b) bis (5d) gilt: Die Ergebnisse der Aufgaben sollten so oft wie möglich experimentell bestätigt werden. Eine solche

experimentelle Bestätigung fördert bei den Schülern das Vertrauen in die Mathematik, sichert die Verbindung der Gleichung mit realen Vorgängen und vertieft die Überzeugung von der Erkennbarkeit und der Beherrschbarkeit von Natur und Technik auf der Grundlage physikalischer Gesetze.

Festigen des Wissens über die Gültigkeitsbedingungen der Größengleichung. Mit Ausnahme der Abiturstufe eignen sich hierfür im Unterricht gewöhnlich keine abstrakten Erörterungen.
Im Unterricht wird den Schülern der Gültigkeitsbereich einer Gleichung oder eines Diagrammes an Hand der experimentellen Überprüfung der Lösung von Aufgaben bewußtgemacht, in denen der Gültigkeitsbereich überschritten wird.
Beispiele für solche Aufgaben sind im Abschnitt 3.6.1. angeführt. Der Widerspruch zwischen den berechneten Werten und den gemessenen Werten führt zu einer Problemsituation, bei deren Lösung die Schüler sehr eindrucksvoll auf die Beachtung der Gültigkeitsgrenzen hingewiesen werden.

Physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Gleichung bzw. der mathematischen Form der Kurve. Durch diese Analyse werden die inhaltlichen Zusammenhänge, die physikalischen Abhängigkeiten und die kausalen Beziehungen noch deutlicher als bisher schon herausgestellt. (Die Durchführung dieser Analyse wird in den Abschnitten 3.3.6., 3.3.7. und 3.4.5. beschrieben.)

2.2.6. Wir können erklären, voraussagen und neue Gesetze erkennen

Erklären und Voraussagen physikalischer Vorgänge. Physikalische Theorien sind auf die Beherrschung der Natur, auf deren Erklärung und praktische Umgestaltung gerichtet. Damit die Schüler das Ziel und den Sinn der Wissenschaft Physik im Leben der Menschen verstehen und achten lernen, müssen die Schüler in diesem letzten Schritt erkennen und erleben können, wie die mathematisch formulierten Gesetze zur praktischen Beherrschung von physikalischen Vorgängen in der Technik und in der Produktion genutzt werden (vgl. Tafeln 2.2./12 und 2.2./13). Dazu müssen die jetzt gestellten Aufgaben auf interessante und praktisch bedeutsame physikalische und technische Fragestellungen gerichtet sein, sie müssen eine echte Erkenntnisfunktion besitzen und dürfen keine formalen Aufgaben mehr sein. Beispiele für solche Aufgaben und für die Lösungswege werden in den Abschnitten 3.6.1. und 3.6.2. dargestellt.
Bevor jedoch mit dem Lösen solcher Aufgaben begonnen wird, sollten die Schüler bei jeder neuen Gleichung und bei jedem neuen Diagramm daran gewöhnt werden, von selbst die Frage zu stellen, wozu man die Gleichung oder das Diagramm benutzen kann. Die Schüler müssen unter Berücksichtigung ihres Wissens aus dem Physikunterricht und ihrer Erfahrungen aus der produktiven Arbeit zunehmend aufgefordert werden, bei der Behandlung einer Größengleichung selbst die Größen zu erkennen, an deren Berechnung in der Praxis ein Interesse bestehen könnte. Als eine Vostufe hierzu sind die Schüler zu befähigen, zu einer Größengleichung prinzipielle Aufgabenstel-

lungen zu formulieren, wie sie in der Praxis von Bedeutung sein könnten. Dabei geht es noch nicht um eine vollständige Formulierung mit konkreten Werten für alle in die Aufgabe eingehenden Größen.

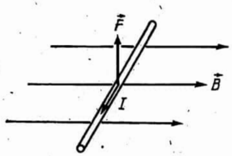
Die Erklärungen und Voraussagen physikalischer Vorgänge können qualitativer, funktionaler und quantitativer Art sein. Bei allen drei Erklärungen wird der betrachtete physikalische Vorgang auf ein physikalisches Gesetz zurückgeführt. So wird zum Beispiel die unterschiedliche Beschleunigung zweier Fahrzeuge auf das Newtonsche Grundgesetz zurückgeführt. Die qualitative Erklärung gibt Antwort auf die Frage „Warum ändert sich der Bewegungszustand der zwei Fahrzeuge?“. Die funktionale Erklärung gibt Antwort auf die Frage „Warum stehen die Beschleunigungen der zwei Fahrzeuge in dem ermittelten Verhältnis $a_1 : a_2$?“. Die quantitative Erklärung beantwortet die Frage „Warum beträgt die Beschleunigung der zwei Körper unter den gegebenen Bedingungen gerade a_1 bzw. a_2?“. Entsprechendes gilt für die Voraussage physikalischer Sachverhalte.

Beim Erklären und beim Voraussagen physikalischer Erscheinungen und Vorgänge sollte ebenfalls stets von den zuvor erarbeiteten Zusammenfassungen ausgegangen werden. Dabei ist es günstig, wenn in den Zusammen-

Tafel 2.2./12: Anwendung der Ablenkung von stromdurchflossenen Leitern im Magnetfeld

Wir fassen zusammen.

(4)



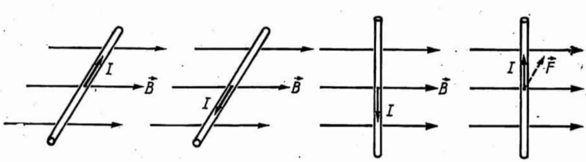
$F = B \cdot I \cdot l$

Die auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkende Kraft F ist sowohl zur magnetischen Flußdichte B als auch zur Stromstärke I im Leiter und zur Leiterlänge l im Magnetfeld proportional.

Stromrichtung, Feldrichtung und Kraftrichtung stehen senkrecht aufeinander.

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

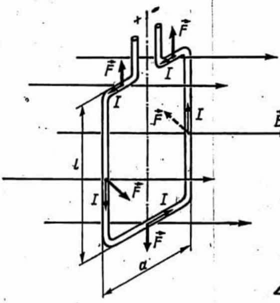
(5a) Zeichnen Sie jeweils die Richtung der Kraft F ein!

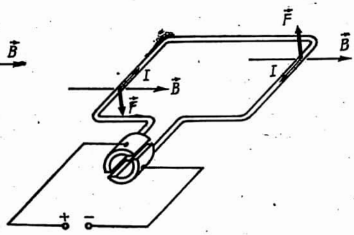


(5b/c/d) (kann entfallen)

Wir können erklären und voraussagen.

(6) **Drehspulamperemeter** | **Gleichstrommotor**





Auf die beiden Seiten *l* wirken entgegengesetzt parallel gerichtete Kräfte, die die Spule drehen. Die Drehung erfolgt gegen die Gegenkraft von Spiralfedern. Auf die beiden Seiten a wirken entgegengesetzt parallel gerichtete Kräfte, sie versuchen, die Spule zu strecken.	**Hätte der Strom immer die gleiche Richtung, so würde sich die Spule nicht weiterdrehen, sie würde eine Gleichgewichtslage einnehmen. Der Motor braucht eine Vorrichtung zum Umpolen der Stromrichtung nach jeweils einer halben Umdrehung (Kommutator).**
$F = B \cdot I \cdot l$	$F = B \cdot I \cdot l$
Es sollen kleine Kräfte wirken:	**Es sollen große Kräfte wirken:**
***B* kleine magnetische Flußdichte (Dauermagnet)**	***B* große magnetische Flußdichte (Elektromagnet)**
***I* kleine Stromstärke**	***I* große Stromstärke**
***l* kleine Spule (wenige Windungen)**	***l* große Spule (viele Windungen)**

Um eine konstante, vom Drehwinkel unabhängige Kraft zu erhalten, bebenutzt man

ein radiales Magnetfeld	**mehrere Spulen auf einem Anker.**

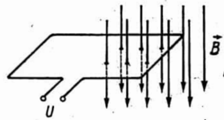
fassungen und bei den Erklärungen die symbolhaft-schematischen Zeichnungen so gestaltet werden, daß das physikalisch Wesentliche in gleicher Weise dargestellt wird. (Vgl. die Teile (4) und (6) in den Tafeln 2.2./12 und 13!)

Die Möglichkeit der Vorausberechnung physikalischer Vorgänge in der Natur und in der Technik war historisch das weltanschaulich wesentlichste Ergebnis der Einführung der quantitativen Naturforschung durch Kopernikus, Kepler, Galilei und Newton. Diese Möglichkeit ist auch im Unterricht zu nutzen:

Mit Hilfe von experimentell prüfbaren Voraussetzungen aus den physikalischen Gesetzen kann den Schülern im Physikunterricht sehr beweiskräftig die Gesetzmäßigkeit der physikalischen Erscheinungen gezeigt werden.

Wir fassen zusammen:

(4)

> Jede Änderung des magnetischen Flusses Φ durch eine von einer Leiterschleife begrenzte Fläche erzeugt in dieser eine Induktionsspannung U. Betrag und Richtung der Induktionsspannung hängen von der Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses und von der Richtung der Änderung ab.
>
> Für die Induktionsspannung gilt:
>
> $$U = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(B \cdot A)}{\Delta t}$$
>
> 
>

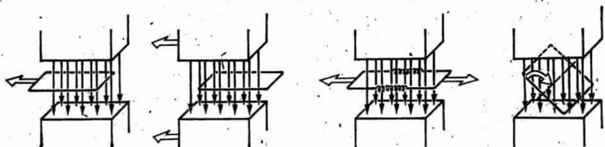
Wir können erklären und voraussagen.

(6) Eine Änderung des magnetischen Flusses Φ und damit eine Erzeugung einer Induktionsspannung U kann prinzipiell auf zwei verschiedene Weisen erfolgen:

1) Bei konstanter magnetischer Flußdichte B wird die wirksame Fläche A der Schleife geändert.

Relativbewegung von Schleife und Feld

Verschiebung der Schleife	Verschiebung des Feldes	Dehnung/Stauchung der Schleife im Feld	Drehung der Schleife im Feld

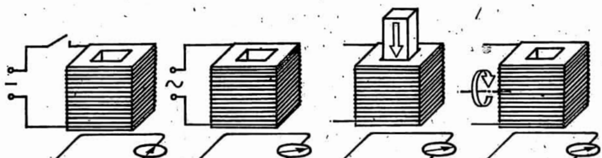


Technische Anwendungen:

Tauchspulenmikrophon	Tonbandwiedergabe		Generator/Außenpolmaschine

2) Bei konstanter wirksamer Fläche A wird die magnetische Flußdichte B in der Schleife geändert.

Ein-/Ausschalten der Erregerstromstärke	periodische Änderung der Erregerstromstärke	Einführen eines Stoffes in das Feld	Drehung des Magnetfeldes



Technische Anwendungen:

Zündspule	Transformator	elektromagn. Tonabnehmer	Generator/Innenpolmaschine

Bei der Anwendung von Gesetzen, die nach Physikern benannt sind, sollten einige erzieherisch wirksame Charaktereigenschaften und Denkweisen des jeweiligen Forschers hervorgehoben werden. So wird man bei dem Archimedischen Gesetz nicht bei der allgemein bekannten, aber erzieherisch kaum wirksamen Anekdote über sein Bad und den anschließenden Lauf durch die Stadt stehenbleiben. Man wird den Schülern berichten, wie Archimedes mit Leidenschaft die physikalischen Gesetze zur Verteidigung seiner Heimatstadt gegen die Römer benutzte.

Erklären des Wirkprinzips von technischen Anwendungen. Der Behandlung von technischen Anwendungen bereits erkannter physikalischer Gesetze sollte folgende Gliederung zugrunde gelegt werden:

— Vorzeigen des Gerätes im Original, Modell oder Foto und Informieren über den Verwendungszweck des Gerätes,
— Nennen des physikalischen Gesetzes, das als Wirkprinzip genutzt wird,
— Beschreiben des Aufbaus des Gerätes anhand einer symbolhaft-schematischen Zeichnung (Vgl. hierzu die Beschreibung eines Meßgerätes im Abschnitt 3.2.2.!),
— Erklären der Wirkungsweise des Gerätes anhand der symbolhaft-schematischen Zeichnung, in die jetzt auch die Formelzeichen eingetragen werden, und anhand der Zusammenfassung zu dem physikalischen Gesetz (Vgl. hierzu auch Abschnitt 3.6.5.!).

Erläutern der Bedeutung des Gesetzes für die Entwicklung von Physik und Technik sowie für die Herausbildung des wissenschaftlichen Weltbildes. An ausgewählten Gesetzen zeigen wir den Schülern den Einfluß der Entdeckung dieser Gesetze auf die Entwicklung der Physik und auf die Herausbildung des wissenschaftlichen Weltbildes.
Durch historische und aktuelle Betrachtungen zur Geschichte der Entdekkung eines physikalischen Gesetzes, zu dessen Einfluß auf die Entwicklung des wissenschaftlichen Weltbildes und auf die Entwicklung der Technik können die Schüler auch verstehen lernen, daß die Physik nicht nur ein System von Erkenntnissen über die Natur ist, sondern daß die Physik stets auch die Tätigkeit von Menschen unter bestimmten gesellschaftlichen Verhältnissen ist. (Vgl. hierzu die Beispiele im Abschnitt 3.5.!)
In einer Diskussion von Beispielen für den Einsatz einer technischen Anwendung in verschiedenen Bereichen der Praxis zeigen wir den Schülern den Einfluß der Entdeckung und Anwendung ausgewählter Gesetze auf die Entwicklung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts. Dazu werden bei diesen Beispielen besonders Anwendungen aus Hauptrichtungen des wissenschaftlich-technischen Fortschritts ausgewählt. Je nach der Spezifik der technischen Anwendungen und ihrer sozialen Auswirkungen und je nach den Voraussetzungen der Schüler stehen dabei folgende Inhalte im Mittelpunkt:

— Durch die Entdeckung physikalischer Gesetze ist der Mensch in der Lage, diese in Technik und Produktion nach seinem Willen wirken zu lassen.
— Der Wissenschaftler und der Techniker sind für die Zielstellung der Nutzung des physikalischen Gesetzes moralisch verantwortlich.

- Durch die Nutzung der physikalischen Gesetze werden die Arbeitsbedingungen der Menschen verbessert, der Wirkungsgrad der Maschinen erhöht, die Arbeitsproduktivität gesteigert, der wissenschaftlich-technische Fortschritt vorangebracht.

Erkennen von weiteren Gesetzen. Mit der Anwendung der Gesetze und Definitionen zur Analyse anderer physikalischer Fragestellungen bzw. zur Auswertung der Meßwerte weiterer Experimente setzt ein neuer Erkenntnisprozeß ein: das empirische bzw. das theoretische Erarbeiten physikalischer Gesetze und Zusammenhänge. Diese Erkenntnisprozesse beginnen wieder bei dem anfangs dargestellten 1. Schritt.

2.2.7. Wir wiederholen und üben

Ergänzend zu den 6 Schritten bei der Anwendung der Mathematik hatten wir noch den Schritt „Wir wiederholen und üben" formuliert (vgl. Abschnitt 2.1.). Dieser Schritt ist erforderlich, weil die Faßlichkeit des Unterrichts nicht nur davon abhängt, daß die Schüler die erforderlichen mathematischen und physikalischen Mittel zu einem früheren Zeitpunkt bereits kennengelernt haben. Viel wichtiger ist es, ob und in welchem Maße diese Kenntnisse und Fertigkeiten im gegebenen Moment verfügbar sind. Daher ist es für die Faßlichkeit des Unterrichts bei der Anwendung der Mathematik notwendig, die aus der Erfahrung bekannten und immer wieder zu erwartenden Probleme bei der Behandlung eines bestimmten physikalischen Unterrichtsstoffes durch gezieltes Üben im Rahmen einer täglichen Übung im Physikunterricht (oder nach einer Absprache mit dem Mathematiklehrer in dessen Unterricht) zu vermindern. Daraus folgt:

In täglichen Übungen werden die für die Anwendung der Mathematik erforderlichen mathematischen und physikalischen Grundlagen rechtzeitig wiederholt und geübt.

Beispiele für den Inhalt solcher Übungen zu vorhersehbaren Schwierigkeiten beim *Lösen von Aufgaben* und bei der *Auswertung von Experimenten* sind:

- die Multiplikation von zwei sehr großen Zahlen (bei der Behandlung der mechanischen Arbeit),
- die Division einer sehr großen Zahl durch eine sehr kleine Zahl (bei der Behandlung des Drucks),
- die Division einer kleinen Zahl durch eine große Zahl (bei der Berechnung der elektrischen Stromstärke),
- die Division zweier kleiner Zahlen (bei der Auswertung von Messungen zur Bestimmung des elektrischen Widerstandes),
- das Abtrennen von Zehnerpotenzen,
- die Wahl des Maßstabes für die grafische Darstellung von Meßwerten (bei der Auswertung der Messungen in der Wärmelehre und in der Elektrizitätslehre),
- das Ablesen von Wertepaaren aus Diagrammen,
- das Erkennen der Proportionalitäten $y \sim x$ bzw. $y \sim \frac{1}{x}$ aus den Gleichungen $y = k \cdot x$ bzw. $y = k \cdot \frac{1}{x}$,

- das Erkennen von Proportionalitäten aus Potenzfunktionen mit drei und mehr Variablen,
- das Umstellen von Größengleichungen,
- das Umrechnen von Einheiten,
- das Umrechnen von Massenangaben in der Einheit kg in Gewichtsangaben in der Einheit kN,
- das Angeben von Winkeln im Bogenmaß,
- das Nennen der qualitativen Merkmale physikalischer Größen,
- das Erläutern des Inhalts physikalischer Gesetze,
- das Zuordnen von Formelzeichen, Einheiten, Definitionsgleichungen und Meßgeräten zu physikalischen Größen.

Für die Erarbeitung des Ansatzes einer *Definitionsgleichung in Quotientenform* empfiehlt sich die Übung des Schließens von beliebigen Größenangaben auf die Angabe einer Größe bezogen auf die Einheit einer anderen Größe.
Beispiele:

- In einer Zeit von 5 s fließen durch eine Wasserleitung 200 ml Wasser. Wieviel Wasser fließt je 1 s hindurch?
- In einem Straßenbahnwagen mit der Grundfläche von 30m² stehen 60 Fahrgäste. Wieviel Fahrgäste kommen durchschnittlich auf 1 m²?

Für die Erarbeitung des Ansatzes einer *Definitionsgleichung in Produktform* empfiehlt sich, den Schülern in einer Übung bewußtzumachen, daß der Wert bestimmter Größen vom Produkt zweier anderer Größen abhängt, und daß das Produkt $a \cdot b$ bei großem Wert von a und kleinem Wert von b genauso groß sein kann wie bei kleinem Wert von a und großem Wert von b.
Beispiele:

- In einer Klasse sammeln 20 Schüler jeweils 5 kg Altpapier, in einer anderen Klasse sammeln 25 Schüler jeweils 4 kg Altpapier. Vergleiche die Sammelergebnisse der beiden Klassen!
- Nenne verschiedene Möglichkeiten für die Zahlen a und b, so daß ihr Produkt 100 ergibt!

Von besonderer Bedeutung sind tägliche Übungen für die Vorbereitung der Schüler auf die *theoretische Herleitung einer Gleichung.*

Das betrifft insbesondere

- die Wiederholung der physikalischen Zusammenhänge und Modellvorstellungen, die später als Ansatz der Herleitung dienen oder die bei Substitutionen genutzt werden sollen,
- das Üben der notwendigen mathematischen Umformungen und Substitutionen an ähnlichen mathematischen Beispielen.

Von dieser Vorbereitung hängt es ganz entscheidend ab, wieviel Schüler mit Hilfe des Lehrers den Ansatz der Deduktion selbst erkennen oder zumindest verstehen können. Und von dieser Vorbereitung hängt es auch ab, ob die logische Entwicklung der mathematischen Deduktion auf das mathematische Verständnis der Schüler aufbauen und ungestört erfolgen kann oder ob die Entwicklung der Deduktion unterbrochen werden muß, um unterlassene Übungen einzuschieben. Von dieser Vorbereitung hängt es schließlich auch ab, ob die Schüler an die nachfolgende Interpretation der Größengleichung mit Verständnis und mit Freude herangehen können oder ob mathematische Schwierigkeiten ihr weiteres Verständnis überschatten.

Die Anzahl der Schüler, für die solche vorbereitenden Übungen und Wiederholungen notwendig sind, ist erfahrungsgemäß groß.

Bestandteil der täglichen Übungen in den oberen Klassen sollte auch die *Arbeit mit dem Tafelwerk* sein.

Hierzu gehören
- das Aufsuchen von Formelzeichen, Einheiten und Definitionsgleichungen physikalischer Größen,
- das Aufsuchen von physikalischen Gesetzen und deren wiederholende Interpretation,
- das Aufsuchen der Beziehungen zwischen den Einheiten physikalischer Größen,
- das Aufsuchen und Interpretieren von Größenwerten physikalischer Größen.

Einen festen Platz sollte in den täglichen Übungen auch das wiederholende *Interpretieren einer bereits früher behandelten Gleichung* einnehmen.

Inhalt einer solchen Interpretation sollten folgende Schülertätigkeiten sein:
- Nennen des Teilgebietes der Physik, zu dem diese Gleichung gehört,
- Nennen der Bezeichnung der Gleichung,
- Nennen der in der Gleichung enthaltenen physikalischen Größen und deren Einheiten,
- wörtliches Formulieren des Gesetzes bzw. des qualitativen Merkmals der durch die Gleichung definierten physikalischen Größe,
- Nennen und Erläutern der in der Gleichung enthaltenen physikalischen Abhängigkeiten, darunter auch Angeben von Ursache und Wirkung sowie von Zusammenhängen zwischen den Richtungen vektorieller Größen (vgl. die Abschnitte 3.3.7. und 3.4.5.),
- Nennen und Erläutern von Beispielen für das Wirken des physikalischen Gesetzes in der Natur und für dessen Anwendung in der Technik.

2.2.8. Systematisieren von physikalischen Größen und Gesetzen

Durch das Systematisieren von physikalischen Größen und Gesetzen wird bei den Schülern das physikalische Verständnis der einzelnen Gleichungen vertieft. Der pädagogische Nutzen solcher Systematisierungen ist dann besonders hoch, wenn die Schüler die Übersichten selbst und dabei so rechtzeitig erarbeiten, daß diese beim Lösen von Aufgaben sowie beim Wiederholen und beim Vorbereiten auf Leistungskontrollen noch häufig benutzt werden können. Die Herstellung solcher Zusammenhänge schafft weiterhin günstige Voraussetzungen für das Verstehen grundlegender physikalischer Vorstellungen und Zusammenhänge. Im Mittelpunkt solcher Systematisierungen können stehen:

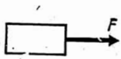
Systematisierung des Wissens über mehrere physikalische Größen. Durch diese Systematisierungen stellen die Schüler Verbindungen zwischen einzelnen physikalischen Größen einer oder mehrerer Stoffeinheiten her. In Übersicht 2.2./2 ist eine solche Systematisierung für die Größen Weg, Zeit und Geschwindigkeit in Klasse 6 angeführt. Entsprechende Systematisierungen empfehlen sich zum Beispiel zu den Größen Masse, Volumen

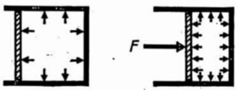
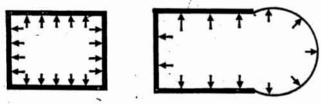
und Dichte (Klasse 6), Kraft, Arbeit und Leistung (Klasse 7), Stromstärke, Spannung und Widerstand (Klasse 8), Kraft, Impuls und Kraftstoß (Klasse 11).
Durch solche Systematisierungen können auch die Unterschiede zwischen bestimmten physikalischen Größen betont werden. Solche Gegenüberstellungen sind in den Übersichten 2.2./3 und 2.2./4 für die Größen Kraft und Druck (Klasse 7) sowie Geschwindigkeit und Impuls (Klasse 12) dargestellt.

Übersicht 2.2./2: Die physikalischen Größen Weg, Zeit und Geschwindigkeit (Klasse 6)

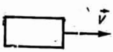
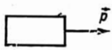
Größe	Weg	Zeit	Geschwindigkeit
Physikalische Bedeutung	Der Weg gibt an, wie lang die von einem Körper zurückgelegte Strecke ist.	Die Zeit gibt an, wie lange ein Vorgang dauert.	Die Geschwindigkeit gibt an, wie schnell sich ein Körper bewegt.
Formelzeichen	s	t	v
Einheit	Meter (1 m) Kilometer (1 km)	Sekunde (1 s) Stunde (1 h)	Meter je Sekunde $\left(1\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}\right)$ Kilometer je Stunde $\left(1\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}\right)$
Meßgerät	Längenmaßstäbe (Lineal, Meßband, Kilometerzähler)	Uhren (Stoppuhr, Armbanduhr)	Tachometer
Berechnung			$v = \frac{s}{t}$

Übersicht 2.2./3: Kraft und Druck

Kraft	Druck
 Die Kraft gibt an, wie stark ein Körper auf einen anderen Körper einwirkt. Einheit: N Meßgerät: Federkraftmesser	 Der Druck eines Gases gibt an, wie stark das Bestreben des Gases ist, sich auszudehnen. Einheit: Pa Meßgerät: Manometer
Die Kraft hat einen Angriffspunkt.	Der Druck hat eine Angriffsfläche.
Die Kraft hat eine bestimmte Richtung.	Der Druck hat keine bestimmte Richtung, er wirkt nach allen Richtungen.

Kraft	Druck
Wirkt von außen auf eine bewegliche Begrenzung des Gases eine Kraft ein, so wird das Volumen des Gases verkleinert. Dadurch erhöht sich der Druck im Innern des Gases.	Der Druck im Innern eines Gases führt zu Kräften auf die Begrenzungsflächen, wodurch diese verformt oder verschoben werden können. Dabei wird das Volumen des Gases vergrößert und der Druck verkleinert.
	

Übersicht 2.2./4: Geschwindigkeit und Impuls

Geschwindigkeit	Impuls
	
$v = \frac{s}{t}$	$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
Die Geschwindigkeit eines Körpers ist ein Maß dafür, wie schnell und in welche Richtung die Ortsveränderung des Körpers erfolgt.	Der Impuls eines Körpers ist ein Maß dafür, wie stark man auf ihn einwirken muß, um seine Bewegung zu beenden.
Einheit: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	Einheit: N · s
Meßgerät: Tachometer	Meßgerät: —
Die Geschwindigkeit beschreibt den Bewegungszustand eines Körpers nach Ort und Zeit. Sie ist eine Größe aus der Kinematik.	Der Impuls beschreibt den Bewegungszustand eines Körpers unter Bezugnahme auf das Einwirken von Kräften. Er ist eine Größe aus der Dynamik.

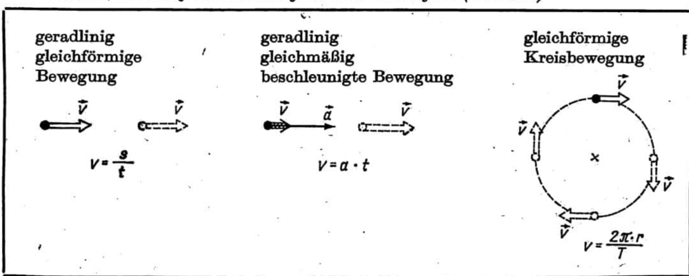
Übersicht 2.2./5: Bewegung eines Körpers unter dem Einwirken einer Kraft (Klasse 9)

Kraft F und Beschleunigung a	Geschwindigkeit v	Weg s
Die Beschleunigung a, die ein Körper unter dem Einwirken einer Kraft F erhält, ist dieser Kraft F direkt und seiner Masse m umgekehrt proportional.	Die Geschwindigkeit v, die ein Körper unter dem Einwirken einer Kraft erhält, ist um so größer, je größer die Beschleunigung a ist und je länger die Kraft einwirkt.	Der unter dem Einwirken einer Kraft zurückgelegte Weg eines Körpers ist um so größer, je größer die durch die Kraft hervorgerufene Beschleunigung a ist und je länger die Kraft einwirkt. Der Weg wird nach der Gleichung berechnet:
$a = \frac{F}{m}$	$v = a \cdot t$	$s = \frac{a}{2} \cdot t^2$

Übersicht 2.2./6: Die physikalischen Größen der Thermodynamik (Klasse 11)

Größe	Temperatur	Innere Energie	Wärme	Volumenarbeit
physikalische Bedeutung	Die Temperatur eines Körpers ist ein Maß dafür, wie warm bzw. wie kalt er ist.	Die innere Energie eines Körpers ist ein Maß für die in seinem Inneren gespeicherte Energie.	Die Wärme ist ein Maß für die bei der Wärmeübertragung über die Systemgrenze aufgenommene bzw. abgegebene Energie.	Die Volumenarbeit ist ein Maß für die durch mechanische Arbeit über die Systemgrenze zugeführte bzw. abgegebene mechanische Energie.
Formelzeichen	T	U	Q	W
Einheit	K	J	J	J
1. Hauptsatz		ΔU	$= Q$	$+ W$
Berechnung von Q und W			$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$	$W = p \cdot V$

Übersicht 2.2./7: Betrag und Richtung der Geschwindigkeit (Klasse 9)



Systematisierung des Wissens über Größen und Gesetze. Solche Übersichten dienen dazu, bestimmte Gleichungen aus der relativen Isoliertheit eines Stoffgebietes herauszulösen und in entsprechende Zusammenhänge mit anderen Stoffgebieten zu bringen. Ein Beispiel hierfür sind die in Übersicht 2.2./5 dargestellten Zusammenhänge. Die Übersicht 2.2./6 ist ein Beispiel für eine Systematisierung zur Thermodynamik (Klasse 11). Ziel solcher Systematisierungen kann es auch sein, die Gültigkeitsbedingungen der einzelnen Gleichungen bewußtzumachen. Ein Beispiel hierfür ist die in Übersicht 2.2./7 dargestellte Systematisierung für die Geschwindigkeit bei verschiedenen Bewegungen (Klasse 9). Der Kopf dieser Systematisierungstabelle sollte bereits zu Beginn der Behandlung der Kinematik vorgegeben werden. Die einzelnen Zeichnungen und Gleichungen werden dann schrittweise ergänzt.

3. Gestaltung typischer Erkenntnisprozesse bei der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht

3.1. Einführung und Definition abgeleiteter physikalischer Größen

„Vielleicht aber stellt sich heraus, daß da, wo es sich um Begriffe handelt, dialektisches Denken mindestens ebenso weit führt wie mathematisches Rechnen.“

(F. Engels [10; S. 370])

3.1.1. Physikalische Größen

Physikalische Größen machen eine quantitative und eine qualitative Aussage über eine meßbare physikalische Eigenschaft eines physikalischen Objektes. Dieses Objekt kann ein Vorgang, ein Zustand oder ein Ding sein. In Rechenoperationen werden stellvertretend für die Größen Formelzeichen benutzt. Durch die Einführung physikalischer Größen wird die mathematische Darstellung physikalischer Zusammenhänge in Form grafischer Darstellungen, Proportionalitäten, Gleichungen oder Ungleichungen möglich.
Nach der Art der Definition werden physikalische Größen in zwei Gruppen eingeteilt, in *Basisgrößen* und in *abgeleitete Größen*. Diese Einteilung stellt kein Werturteil über die physikalischen Größen dar, denn die Wahl der Basisgrößen ist willkürlich. Man wird aber solche Größen als Basisgrößen wählen, die der menschlichen Betrachtungsweise einfach erscheinen und die für die physikalischen Untersuchungen zweckmäßig sind. (Hierüber stimmen die Auffassungen verschiedener Autoren jedoch nicht immer überein.)
Abgeleitete physikalische Größen werden durch eine Rechenvorschrift definiert, die man Definitionsgleichung nennt. Dadurch wird ein physikalischer Zusammenhang auf einen mathematischen Zusammenhang abgebildet. Hierzu dient meist der Quotient oder das Produkt zweier anderer Größen.
Bei der Definition der Basisgrößen erfolgt keine derartige Abbildung. Physikalische Basisgrößen werden durch eine Meßvorschrift und durch die Einführung einer Einheit definiert.
Manchmal werden die physikalischen Größen auch in *extensive oder Quantitätsgrößen* und in *intensive oder Qualitätsgrößen* eingeteilt. Erstere geben Antwort auf die Fragen „Wie groß?“, „Wieviel?“ (Länge, Masse, Energie, elektrische Ladung u. a.), letztere geben Antwort auf die Fragen „Wie stark?“, „Wie konzentriert?“ (Dichte, Geschwindigkeit, Temperatur, Druck, elektrische Feldstärke u. a.). Bei einem homogenen Körper bleibt eine In-

tensitätsgröße bei einer gedachten Unterteilung des Körpers für alle seine Teile erhalten. Für eine Quantitätsgröße gilt das nicht.
Eine weitere Einteilung der physikalischen Größen, die vornehmlich in der Thermodynamik benutzt wird, ist die Einteilung in *Zustandsgrößen* (wie Temperatur und Energie) und in *Prozeßgrößen* (wie mechanische Arbeit und Wärme). Das Kennzeichen einer Zustandsgröße ist ihre Unabhängigkeit von der Vorgeschichte, d. h. von der Art und von dem „Weg" vorangegangener Zustandsänderungen. Für die Prozeßgrößen fehlt diese Unabhängigkeit, sie charakterisieren gerade die Art und das Ausmaß dieser Zustandsänderungen. Je nach der gewählten Betrachtungsweise erhalten die Prozeßgrößen in Energiebilanzen ein negatives oder positives Vorzeichen.

3.1.2. Vorschlag für die Einführung und Definition abgeleiteter physikalischer Größen

Für die Einführung und Definition abgeleiteter physikalischer Größen empfehlen wir ein Vorgehen in folgenden Schritten:

(0) *Wir wiederholen und üben.*

(1) *Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik.*
— Motivieren der Einführung der physikalischen Größe,
— Durchführen erster Beobachtungen und Messungen zum empirischen Herausarbeiten der physikalischen Eigenschaft, die durch die neue physikalische Größe beschrieben wird.

(2) *Wir vereinfachen/idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*
— Untersuchen dieser physikalischen Eigenschaft am idealisierten physikalischen Objekt,
— Mitteilen des Fachwortes für die physikalische Eigenschaft.

(3) *Wir suchen eine Definitionsgleichung zur zahlenmäßigen Angabe der physikalischen Größe.*
— Halbquantitative Angabe der physikalischen Größe,
— Motivieren der Erarbeitung einer Definitionsgleichung,
— Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung,
— Finden einer Möglichkeit zur zahlenmäßigen Angabe der physikalischen Eigenschaft an realen Objekten,
— Verallgemeinern zur bzw. Geben der Definitionsgleichung,
— Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen der Definitionsgleichung,
— Einführen der Einheit der physikalischen Größe.

(4) *Wir fassen zusammen.*

(5) *Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung an einigen einfachen Beispielen.*
— Erläuterung des Inhalts der Gleichung in einer Konkretisierungsreihe,
— Entwickeln erster Größenvorstellungen,
— erstes Lösen von Aufgaben,
— Formulieren der Meßvorschrift für die physikalische Größe und erste praktische Meßübungen.

(6) *Wir können erklären, voraussagen und neue Gesetze erkennen.*

— Erklären und Vorausberechnen physikalischer Eigenschaften und Vorgänge durch Lösen von qualitativen, funktionalen und quantitativen Aufgaben,

— Erkennen von Gesetzen und Zusammenhängen.

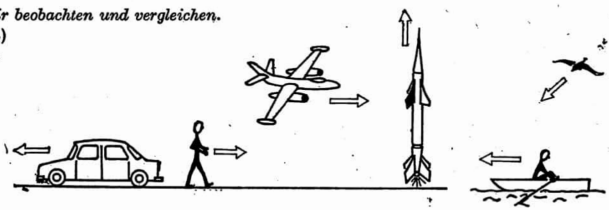
3.1.3. Erarbeiten einer Definitionsgleichung in Quotientenform

Das Erarbeiten einer Definitionsgleichung in Quotientenform demonstrieren wir in den Tafeln 2.2./1 und 3.1./1 bis 3.1./4 für die physikalischen Größen Beschleunigung, Geschwindigkeit, Leistung, Druck und elektrischer Widerstand. Die Gestaltung der ersten zwei Schritte „Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik“ sowie „Wir vereinfachen/idealisieren die Erscheinungen aus der Sicht der Physik“ sind in den Abschnitten 2.2.1. und 2.2.2. beschrieben. Dabei entstehen in den genannten Abstraktions- und Konkretisierungsreihen die Teile (1a) bis (2b). Daran anschließend erfolgt der Schritt „Wir suchen eine Definitionsgleichung zur zahlenmäßigen Angabe der physikalischen Größe“. Das allgemeine Vorgehen hierzu ist im

Tafel 3.1./1: Abstraktionsreihe und Konkretisierungsreihe zur physikalischen Größe „Geschwindigkeit“

Wir beobachten und vergleichen.

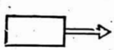
(1a)



(1b) **In Natur und Technik bewegen sich Menschen, Tiere, Verkehrsmittel und Maschinen unterschiedlich schnell.**

Wir vereinfachen.

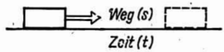
(2a)



(2b) Die Geschwindigkeit eines Körpers gibt an, wie schnell er sich bewegt.

Wir suchen eine Gleichung.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Ansatz:

Bei der gleichförmigen Bewegung werden in gleichen Zeiten gleiche Wege zurückgelegt. Daher kann die Geschwindigkeit eines Körpers durch den in 1 Sekunde zurückgelegten Weg angegeben werden.

Beispiele:

Schüler	Weg	Zeit	Geschwindigkeit (Weg je 1 s)
Ute	20 m	5 s	4 m je 1 s oder $\frac{4\,\text{m}}{1\,\text{s}}$
Ralf	60 m	10 s	6 m je 1 s oder $\frac{6\,\text{m}}{1\,\text{s}}$
Olaf	30 m	6 s	5 m je 1 s oder $\frac{5\,\text{m}}{1\,\text{s}}$

(3c) Als Gleichung geschrieben:

$$\text{Geschwindigkeit eines Körpers} = \frac{\text{vom Körper zurückgelegter Weg}}{\text{dazu erforderliche Zeit}}$$

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}}$$

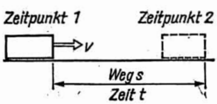
$$v = \frac{s}{t}$$

(3d) Einheiten: $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, $\frac{\text{km}}{\text{h}}$

Wir fassen zusammen.

(4)

Die Geschwindigkeit eines Körpers gibt an, wie schnell er sich bewegt.



Die Geschwindigkeit eines Körpers ist um so größer, je größer der Weg ist, den der Körper in einer bestimmten Zeit zurücklegt.

Gleichung: $v = \frac{s}{t}$ (nur für gleichförmige Bewegung)

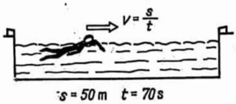
Darin bedeuten:

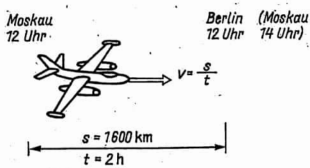
v die Geschwindigkeit des Körpers $\left(\text{in } \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$,

s den vom Körper zurückgelegten Weg (in m),

t die dazu erforderliche Zeit (in s).

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.
(5a/b)





$$v = \frac{50\ \text{m}}{70\ \text{s}} \qquad\qquad v = \frac{1\,600\ \text{km}}{2\ \text{h}}$$

$$v = 0{,}7\ \frac{\text{m}}{\text{s}} \qquad\qquad v = 800\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

(5c) Vervollständige die folgende Tabelle!

	s	t	v
Körper 1	70 m	10 s	...
Körper 2	...	2 min	$7\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$
Körper 3	800 km	...	$800\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$
Körper 4	50 km	30 min	...

Beantworte folgende Fragen:
Welcher Körper legt den weitesten Weg zurück und welcher den kürzesten?
Welcher Körper bewegt sich die längste Zeit und welcher die kürzeste?
Welcher Körper hat die größte Geschwindigkeit und welcher die kleinste?
Welche Fahrzeuge könnten die einzelnen Körper sein?

(5d) Für einen Fußgänger mit einer Geschwindigkeit von 4 km/h und für einen Radfahrer mit einer Geschwindigkeit von 16 km/h gilt:

Fußgänger:		Radfahrer:	
4 km	≙ 1 h	16 km	≙ 1 h
8 km	≙ ...	32 km	≙ ...
16 km	≙ ...	64 km	≙ ...
...	≙ 3 h	...	≙ 3 h
...	≙ 0,5 h	...	≙ 30 min

Wie ändert sich der zurückgelegte Weg, wenn die Zeitdauer verdreifacht wird?
Wie ändert sich die erforderliche Zeit, wenn der zurückzulegende Weg auf die Hälfte verkürzt wird?
Wie ändert sich der in gleichen Zeiten zurückgelegte Weg, wenn die Geschwindigkeit vervierfacht wird?

Abschnitt 2.2.3. dargestellt, so daß wir uns hier auf das Spezifische dieses Schrittes bei der Erarbeitung einer Definitionsgleichung konzentrieren.

Halbquantitative Angabe der physikalischen Größe. Ausgehend von experimentellen Demonstrationen verschiedener physikalischer Objekte werden den Schülern Fragen gestellt wie: „Welches Fahrzeug ist am schnellsten? Welches ist am langsamsten?“ oder „Mit welcher Maschine wird die mechanische Arbeit am schnellsten verrichtet?“ oder „Welches Bauteil behindert den Stromfluß am stärksten?“. Nach der Beantwortung dieser Fragen folgt die Aufforderung, aus den Beobachtungen einen Satz zu formulieren, der so beginnt: „Der (Die/Das) . . . ist um so größer, je . . . ist.“ Hierbei sind jeweils beide in der Gleichung $a = \frac{b}{c}$ enthaltenen Aussagen zu erarbeiten:
„Der (Die/Das) . . . (a) ist um so größer, je größer (bei gleichem c) . . . (b) ist.“
„Der (Die/Das) . . . (a) ist um so größer, je kleiner (bei gleichem b) . . . (c) ist.“
Als günstig erweist es sich, hierzu auch die zwei Umkehrungen formulieren zu lassen: „Der (Die/Das) . . . (a) ist um so kleiner, je . . . ist“.

Zur halbquantitativen Angabe der Geschwindigkeit werden an Hand der Demonstration der Bewegung von drei Spielzeugen Sätze gefunden wie: „Die Geschwindigkeit eines Körpers ist um so größer, je größer der in einer bestimmten Zeit zurückgelegte Weg ist“ oder „Die Geschwindigkeit eines Körpers ist um so größer, je kürzer die Zeit ist, die für einen bestimmten Weg benötigt wird“. Anschließend werden die Umkehrungen zu diesen Sätzen gefunden.

Motivieren der Erarbeitung einer Definitionsgleichung. Das Erarbeiten der Definitionsgleichung der physikalischen Größe kann für die Schüler dadurch

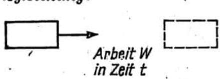
Tafel 3.1./2: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Mechanische Leistung“

Wir beobachten und vergleichen.
(1a) feste Rolle — Pferdefuhrwerk
elektrischer Bauaufzug — Traktor
Kran — LKW
(1b) Für das Verrichten von gleich großen mechanischen Arbeiten können unterschiedliche Zeiten benötigt werden.

Wir vereinfachen.
(2a)

(2b) Die mechanische Leistung gibt an, wie schnell die mechanische Arbeit verrichtet wird.

Wir suchen eine Definitionsgleichung.
(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Ansatz:

Bei einem gleichmäßigen Verrichten der mechanischen Arbeit ist die verrichtete Arbeit proportional zur Arbeitszeit. Daher kann die mechanische Leistung durch die in 1 Sekunde verrichtete mechanische Arbeit angegeben werden.

Beispiele:

	verrichtete Arbeit	benötigte Zeit	Leistung (Arbeit je 1 s)
Kran 1	80 000 J	4 s	20 000 J je 1 s oder $\frac{20\,000\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{s}}$
Kran 2	80 000 J	8 s	10 000 J je 1 s oder $\frac{10\,000\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{s}}$
Kran 3	400 000 J	8 s	50 000 J je 1 s oder $\frac{50\,000\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{s}}$

(3c) Als Gleichung geschrieben:

$$\text{mechanische Leistung} = \frac{\text{verrichtete mechanische Arbeit}}{\text{dazu erforderliche Zeit}}$$

$$\text{Leistung} = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Zeit}}$$

$$P = \frac{W}{t}$$

(3d) Einheit: Watt (W) $\left(1\ \mathrm{W} = 1\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}\right)$

Wir fassen zusammen.

(4)

Die mechanische Leistung gibt an, wie schnell die mechanische Arbeit verrichtet wird.

Die mechanische Leistung ist um so größer, je größer die in einer bestimmten Zeit verrichtete mechanische Arbeit ist.

Definitionsgleichung:

$$P = \frac{W}{t}$$

(Gültigkeitsbedingung: gleichmäßiges Arbeiten)

Darin bedeuten:

P die mechanische Leistung (in W),
W die verrichtete mechanische Arbeit (in J),
t die benötigte Zeit (in s).

Umrechnung der Einheiten:

$$1\ \mathrm{W} = 1\ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}}$$

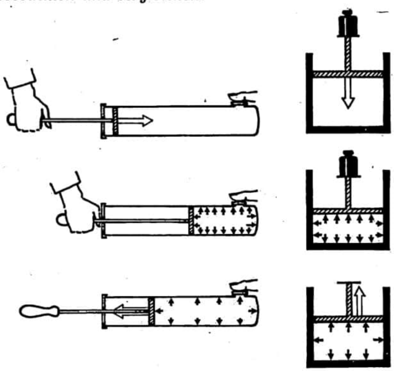
$$\left(1\ \mathrm{kW} = 1\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{s}}\right)$$

motiviert werden, daß der Lehrer die für die Schüler zwar noch unlösbare, inhaltlich aber leicht erfaßbare Aufgabe stellt, die betrachtete physikalische Eigenschaft bei zwei oder bei noch mehr physikalischen Objekten zahlenmäßig zu vergleichen. Dazu dienen Fragen wie: „Wievielmal so schnell ist das (blaue) Auto im Vergleich zum (roten) Auto?“ und „Unter welcher Voraussetzung wäre die Geschwindigkeit beider Autos gleich groß?“ oder „Wievielmal so groß ist der elektrische Widerstand des Bauteils 1 im Vergleich zum elektrischen Widerstand des Bauteils 2?“ und „Unter welcher Voraussetzung wäre der elektrische Widerstand beider Bauteile gleich groß?“. Auf diese Fragen können die Schüler gewöhnlich nur unvollständig antworten.

Tafel 3.1./3: Abstraktionsreihe und Konkretisierungsreihe zur physikalischen Größe „Druck“

Wir beobachten und vergleichen.

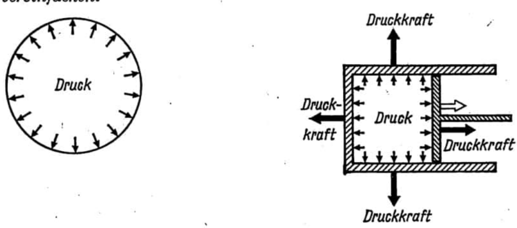
(1a)



(1b) Zusammengedrückte Luft besitzt das Bestreben, wieder ihren ursprünglichen Raum einzunehmen.

Wir vereinfachen.

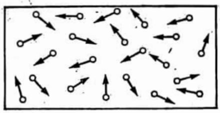
(2a)



(2b) Der Druck eines Gases gibt an, wie stark das Bestreben des Gases ist, sich auszudehnen.
Der Druck des Gases äußert sich durch Druckkräfte auf die Begrenzungsflächen des Gases.

Wir deuten das im Modell.

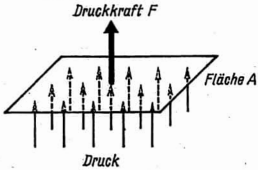
(2c)



(2d) Der Druck eines Gases gegen die Begrenzungsflächen entsteht durch die Stöße der Gasmoleküle gegen die Begrenzung.
Je größer der Druck eines Gases ist, desto größer ist die Anzahl und die Stärke der Stöße der Gasmoleküle gegen die Begrenzungsflächen.

Wir suchen eine Definitionsgleichung.

(3a) Eintragen der Formelzeichen:



(3b) Ansatz:
Die Druckkraft auf die Begrenzungsfläche eines Gases ist proportional zu dieser Begrenzungsfläche. Daher kann man den Druck eines Gases durch die auf 1 m² wirkende Druckkraft angeben.
Beispiele:

Gas	Druckkraft	Begrenzungsfläche	Druck (Druckkraft) je 1 m²
Gas 1	300 N	2 m²	$\frac{150\ \text{N}}{1\ \text{m}^2}$
Gas 2	300 N	3 m²	$\frac{100\ \text{N}}{1\ \text{m}^2}$
Gas 3	100 N	0,5 m²	$\frac{200\ \text{N}}{1\ \text{m}^2}$

(3c) Als Gleichung geschrieben:

$$\text{Druck eines Gases} = \frac{\text{Druckkraft auf Begrenzungsfläche}}{\text{Begrenzungsfläche}}$$

$$\text{Druck} = \frac{\text{Druckkraft}}{\text{Fläche}}$$

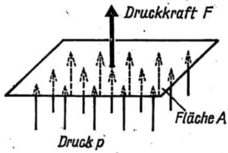
$$p = \frac{F}{A}$$

(3d) Einheit: Pascal (Pa) $\left(1\ \text{Pa} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$

Wir fassen zusammen.

(4)

Der Druck eines Gases gibt an, wie stark das Bestreben des Gases ist, sich auszudehnen.



Je größer der Druck ist, desto größer ist die auf eine bestimmte Fläche wirkende Druckkraft.

Definitionsgleichung: $p = \frac{F}{A}$

Darin bedeuten:

p den Druck des Gases (in Pa),
F die Druckkraft auf eine Fläche (in N),
A die Fläche (in m²).

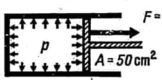
Umrechnung der Einheiten:

$$1\ \text{Pa} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

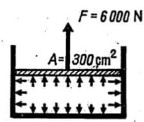
$$\left(1\ \text{kPa} = 1\ \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right)$$

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

(5a/b)



$$p = \frac{F}{A}$$
$$p = \frac{2000\ \text{N}}{0{,}005\ \text{m}^2}$$
$$p = 400\,000\ \text{Pa}$$
$$p = 400\ \text{kPa}$$



$$p = \frac{F}{A}$$
$$p = \frac{6000\ \text{N}}{0{,}03\ \text{m}^2}$$
$$p = 200\,000\ \text{Pa}$$
$$p = 200\ \text{kPa}$$

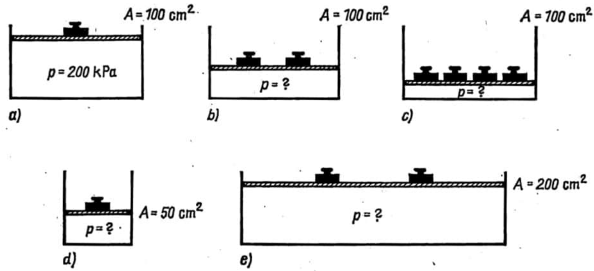
(5c) a) Was sagt uns die Angabe: Der Druck eines Gases ist 15 kPa?

b) Wie groß ist die Druckkraft dieses Gases auf Flächen von 2 m², 6 m² bzw. 8 m²?

Für $p = 15$ kPa gilt:

A	F
1 m²	...
2 m²	...
6 m²	...
8 m²	...

(5d) 1. Im Versuch a drückt auf den Kolben ein Massestück mit seiner Gewichtskraft und erzeugt dadurch im Gas einen Druck von 200 kPa. Welcher Druck wird in den Versuchen b bis e erzeugt?



2. Der Druck in einer Gasflasche soll a) 12 MPa, b) 8 MPa, c) 6 MPa bzw. d) 4 MPa betragen. Welche Druckkraft wirkt bei dieser Gasflasche jeweils auf ein Flächenstück von 100 cm^2?
Welchen Zusammenhang erkennst du aus den Ergebnissen?

Es wird aber für alle Schüler das Problem erkennbar, ein Maß für die Geschwindigkeit oder für den elektrischen Widerstand zu finden. Die Notwendigkeit der zahlenmäßigen Angabe der Geschwindigkeit (oder anderer Größen) wird auch mit dem Hinweis motiviert, daß man durch solche vergleichenden Angaben wie „schneller als ...“ oder „langsamer als ...“ und auch durch solche halbquantitativen Aussagen wie „Je ... desto ...“ weder in der Natur die Zusammenhänge genau erkennen, noch die Vorgänge in der Natur und in der Technik exakt beherrschen kann.

Hieraus wird das Ziel formuliert: „Wir wollen eine Möglichkeit finden, die Geschwindigkeit eines Körpers mit Hilfe einer Gleichung zahlenmäßig anzugeben.“

Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung. In den Abstraktionsreihen entstehen die Teile (3a).

Bei der erstmaligen Erarbeitung einer Definitionsgleichung in Klasse 6 sollte das Einführen der Formelzeichen erst nach der Erarbeitung der Wortgleichung im Teil (3c) von Tafel 3.1./1 erfolgen.

Finden einer Möglichkeit zur zahlenmäßigen Angabe der physikalischen Eigenschaft an realen Objekten. Grundlage für eine Definitionsgleichung in Quotientenform ist meistens eine Proportionalität zwischen zwei physikalischen Größen. Diese Proportionalitäten werden im Unterricht (wie in der Physik als Wissenschaft) in verschiedener Weise gewonnen.

a) Die Proportionalität wird aus der Diskussion einiger den Schülern aus der Erfahrung bekannten Beispielen erkannt. Diese Diskussion kann durch einige Demonstrationsexperimente unterstützt werden. Den Schülern wird mitgeteilt, daß diese Proportionalität noch experimentell geprüft werden müßte, um die Gültigkeitsgrenzen derselben zu ermitteln. Für die Bestätigung der Proportionalität in dem gewöhnlich interessierenden Bereich werden die Erfahrungen der Menschen als ausreichend betrachtet. Beispiele: $m \sim V$ und $F \sim A$.

b) Die Proportionalität wird von vornherein als gültig vorausgesetzt. Beispiele: Die Beschränkung der Betrachtungen auf gleichförmig bewegte Körper setzt für diese Körper die Gültigkeit der Proportionalität $s \sim t$ voraus. Diese Proportionalität kann durch ein Demonstrationsexperiment verdeutlicht werden. Die Beschränkung der Betrachtungen auf gleichmäßig beschleunigte Körper setzt für diese Körper die Gültigkeit der Proportionalität $v \sim t$ voraus.

c) Die Proportionalität wird experimentell erarbeitet. Die Proportionalität wird dabei nach dem Vorgehen im Abschnitt 3.3.4. bereits in einer vorangehenden Stunde erarbeitet. Beispiele: $I \sim U$ und $a \sim F$.

Nachdem die jeweilige Proportionalität entweder aus der Erfahrung entnommen, vorausgesetzt oder in einer vorangegangenen Stunde bereits experimentell erarbeitet wurde, wird die Zielstellung wiederholt: „Wie können wir unter Nutzung dieser Proportionalität die ... (Größe) zahlenmäßig angeben?“ Diese Frage wird zunächst für einige konkrete Objekte an einigen angenommenen oder ermittelten Meßwerten untersucht. Das weitere Vorgehen erläutern wir am Beispiel der Erarbeitung der Definitionsgleichung für die Geschwindigkeit:

Der Lehrer formuliert die Voraussetzung, die der Erarbeitung der Definitionsgleichung für die Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Körpers zugrunde gelegt wird. „Wir wollen annehmen, daß die Bewegung der Spielzeugautos gleichförmig ist. Das heißt: In gleichen Zeiten werden gleiche Wege zurückgelegt.“ Jetzt suchen die Schüler nach einer Antwort auf die Frage: „Wie könnten wir die Geschwindigkeit eines Autos zahlenmäßig angeben?“ Einige der folgenden Möglichkeiten finden die Schüler selbst:

- Angabe der Zeiten für gleiche Wege (Rekorde im Laufen und Schwimmen),
- Angabe der Wege bei gleicher Zeit (Rekorde bei Stundenrennen der Bahnfahrer),
- Angabe der für 1 Meter erforderlichen Zeit und
- Angabe des je 1 Sekunde zurückgelegten Weges.

Aus diesen Möglichkeiten wird die zuletzt genannte hervorgehoben. Um sie anzuwenden, werden für die drei Spielzeuge die Wege gemessen, die diese in verschiedenen Zeiten zurücklegen, z. B.

- Auto 1: 16 cm in 4 Sekunden,
- Auto 2: 80 cm in 5 Sekunden,
- Auto 3: 50 cm in 6 Sekunden.

Die Berechnung der je 1 Sekunde zurückgelegten Wege ergibt 4 cm, 16 cm bzw. 8,3 cm. Diese Zurückführung der zahlenmäßigen Angaben der Geschwindigkeit auf den je 1 Sekunde zurückgelegten Weg wird an einem weiteren Beispiel vertieft: In einem Ferienlager werden für die drei Schüler Ute, Rolf und Olaf verschiedener Klassenstufen die Zeiten gemessen, die diese zum Durchlaufen unterschiedlich langer Strecken benötigen:

Ute: 20 Meter in 5 Sekunden, das heißt 4 m je 1 s oder $\frac{4\,\text{m}}{1\,\text{s}}$,

Rolf: 60 Meter in 10 Sekunden, das heißt 6 m je 1 s oder $\frac{6\,\text{m}}{1\,\text{s}}$,

Olaf: 30 Meter in 6 Sekunden, das heißt 5 m je 1 s oder $\frac{5\,\text{m}}{1\,\text{s}}$.

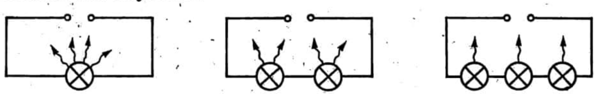
Die so erhaltenen Quotienten werden für die drei Schüler verglichen.
In Auswertung dieser zwei Beispiele wird den Schülern die Frage gestellt: „Was haben wir gerechnet, um die Geschwindigkeiten der Spielzeugautos bzw. die Geschwindigkeiten der Schüler zahlenmäßig angeben zu können?“ Als Ergebnis wird gemeinsam der Ansatz (3b) in Tafel 3.1./1 formuliert.

In entsprechender Weise findet man die Ansätze (3b) in den Tafeln 2.2./1 und 3.1./2 bis 4. Bei der Formulierung dieser Ansätze empfiehlt es sich, stets von der Proportionalität auszugehen, die der Definitionsgleichung zugrunde liegt.
Eine Besonderheit liegt bei der Definitionsgleichung des *Wirkungsgrades* vor. Obgleich die Definitionsgleichung Quotientenform besitzt, liegt ihr doch

Tafel 3.1./4: Abstraktionsreihe und Konkretisierungsreihe zur physikalischen Größe „Elektrischer Widerstand“

Wir beobachten und vergleichen.

(1a)



(1b) Jedes elektrische Gerät hat die Eigenschaft, den Stromfluß zu behindern.

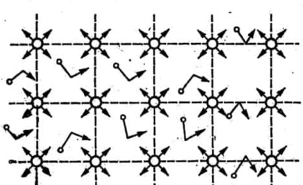
Wir vereinfachen.

(2a)

(2b) Der elektrische Widerstand eines Bauteils gibt an, wie groß die Behinderung des Stromes in ihm ist.

Wir deuten das im Modell.

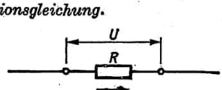
(2c)



(2d) Durch die ständigen Zusammenstöße der Elektronen mit den Ionen im Metallkristall wird die gerichtete Bewegung der Elektronen behindert. Je größer diese Behinderung der Bewegung der Elektronen ist, desto größer ist der elektrische Widerstand eines Leiters.

Wir suchen eine Definitionsgleichung.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Ansatz:

Bei jedem metallischen Leiter ist die Stromstärke proportional zur Spannung. Daher kann man den elektrischen Widerstand eines Leiters durch die je 1 A erforderliche Spannung angeben.

Beispiele:

Leiter	Spannung	Stromstärke	Widerstand (erforderliche Spannung je 1 A)
Leiter 1	4 V	2 A	$\frac{2\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{A}}$
Leiter 2	15 V	3 A	$\frac{5\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{A}}$
Leiter 3	15 V	2 A	$\frac{7{,}5\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{A}}$

(3c) Als Gleichung geschrieben:

$$\text{elektrischer Widerstand eines Leiters} = \frac{\text{Spannung am Leiter}}{\text{Stromstärke im Leiter}}$$

$$\text{Widerstand} = \frac{\text{Spannung}}{\text{Stromstärke}}$$

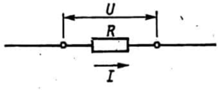
$$R = \frac{U}{I}$$

(3d) Einheit: Ohm (Ω) $\left(1\,\Omega = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}\right)$

Wir fassen zusammen.

(4)

Der elektrische Widerstand eines Leiters gibt an, wie groß die Behinderung des Stromes in ihm ist. Je größer der elektrische Widerstand eines Leiters ist, desto größer ist die Behinderung der Bewegung der Elektronen in ihm.



Der elektrische Widerstand eines Leiters ist um so größer, je größer die für eine bestimmte Stromstärke erforderliche Spannung sein muß.

Definitionsgleichung: $R = \frac{U}{I}$

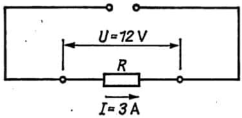
Darin bedeuten:
R den elektrischen Widerstand (in Ω),
U die anliegende Spannung (in V),
I die Stromstärke (in A).

Umrechnen der Einheiten:

$$1\,\Omega = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$$

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

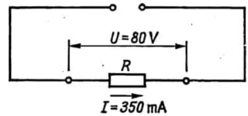
(5a/b)



$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{12\ \mathrm{V}}{3\ \mathrm{A}}$$

$$R = 4\ \Omega$$



$$R = \frac{U}{I}$$

$$R = \frac{80\ \mathrm{V}}{0{,}35\ \mathrm{A}}$$

$$R = 230\ \Omega$$

(5c) Eine Spule hat einen Widerstand von 20 Ω. Das bedeutet:	20 V ≙ 1 A	... ≙ 3 A
	40 V ≙ ...	... ≙ 0,5 A
	100 V ≙ ...	... ≙ 100 mA

(5d) Wie groß muß der Widerstand gewählt werden, damit bei einer stets gleichen Spannung von 12 V ein Strom von

a)	b)	c)	d)	e)
6 A	3 A	2 A	1 A	0,5 A fließt?

Vergleiche die erhaltenen Ergebnisse! Welchen Zusammenhang erkennst du?

keine Proportionalität zugrunde. Dieser Definition liegt der Zusammenhang zugrunde, daß bei Anlagen zur Energieumwandlung die nutzbringende Energie stets kleiner als die aufzuwendende Energie ist.

Verallgemeinern zur Definitionsgleichung. Die an einzelnen realen Objekten erarbeitete Möglichkeit zur zahlenmäßigen Angabe einer physikalischen Eigenschaft wird zunächst an Hand der Darstellung (3a) in den Abstraktionsreihen für das idealisierte Objekt als Wortgleichung verallgemeinert und dann unter Einführung des Formelzeichens der neuen physikalischen Größe als Gleichung dargestellt.

Für die Verallgemeinerung zur Definitionsgleichung der Geschwindigkeit stellt der Lehrer die Frage: „Wie kann man allgemein die Geschwindigkeit eines beliebigen Körpers aus dem von ihm zurückgelegten Weg und der dafür erforderlichen Zeit berechnen?“ In Beantwortung dieser Frage kann die Mehrzahl der Schüler von selbst zu der Wortgleichung (3c) in Tafel 3.1./1 übergehen. Zur weiteren Abkürzung dieser Wortgleichung werden die Formelzeichen für die drei Größen mitgeteilt und die Größengleichung aufgeschrieben.

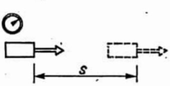
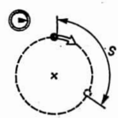
Um den Schülern die Festlegung des Formelzeichens zu begründen, empfiehlt sich ein Hinweis auf den Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Industrie und der Entwicklung der Physik. Daraus erklärt sich, daß die vorzugsweise Auswahl des Anfangsbuchstabens englischer Wörter nicht zufällig oder willkürlich, sondern aus der Geschichte der gesellschaftlichen Entwicklung und der Physik bedingt ist. (Für Materialkonstanten werden griechische Buchstaben benutzt.)

A (area)
V (volume)
t (time)
v (velocity)
m (mass)
F (force)
p (pressure)
E (energy)
W (work)
P (power)
Q (quantity of heat)
a (acceleration)
g (gravitional acceleration)
f (frequency)
n (number of turns)
M (moment of force)

Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen der Definitionsgleichung. Anhand eines Rückblickes auf den vorangegangenen Erkenntnisweg wird den Schülern bewußtgemacht, welche einschränkenden Bedingungen zur Vereinfachung der Erscheinungen und Vorgänge eingeführt wurden, die jetzt auch für die Anwendung der Definitionsgleichung gelten.

So können zur Definitionsgleichung der Geschwindigkeit die Fragen entwickelt werden: „Es gibt Vorgänge, bei denen die Geschwindigkeit der Körper konstant ist (gleichförmige Fahrt eines PKW). Es gibt aber auch viele Vorgänge, bei denen sich die Geschwindigkeit der Körper ändert (Anfahren oder Abbremsen eines PKW). Für welche Vorgänge können wir die Geschwindigkeit eines Körpers nach der Gleichung $v = \frac{s}{t}$ berechnen? Für welche Vorgänge kann man die Gleichung nicht anwenden?" Um den Schülern die einschränkende Bedingung bewußtzumachen, kann an diesem oder zu einem späteren Zeitpunkt in Klasse 6 die Übersicht 3.1./1 erarbeitet werden.

Übersicht 3.1./1

geradlinig gleichförmige Bewegung	gleichförmige Kreisbewegung	geradlinig beschleunigte Bewegung
$v = \frac{s}{t}$ 	$v = \frac{s}{t}$ 	andere Gleichung erforderlich (Klasse 9) 

(Für Klasse 9 vgl. Übersicht 2.2./7!)

Einführen der Einheit der physikalischen Größe. Ausgehend von den zuvor betrachteten Quotienten, wird den Schülern gezeigt, welche Einheit sich für die neue Größe ergibt, bzw. es wird ihnen mitgeteilt, welche Bezeichnung und welches Kurzzeichen für die Einheit international festgelegt wurden. Es entstehen die Teile (3d) in den Abstraktionsreihen. Wenn die Einheit nach einem Physiker benannt wurde, dann sollte mit dieser Mitteilung auch eine Information über einige Leistungen des Physikers gegeben werden, der mit dieser Festlegung geehrt wird.

3.1.4. Erarbeiten einer Definitionsgleichung in Produktform

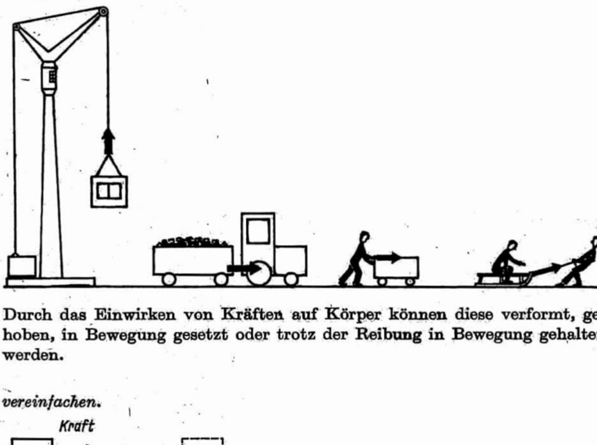
Zwischen der Erarbeitung von Definitionsgleichungen in Quotientenform und der Erarbeitung von Definitionsgleichungen in Produktform besteht ein prinzipieller Unterschied. Die Definitionsgleichungen in Quotientenform werden überwiegend auf der Grundlage von Messungen (oder auch quantitativen Erfahrungen) erarbeitet. Die Definitionsgleichungen in Produktform können hingegen nicht auf der Grundlage von Messungen und damit auch nicht auf der Grundlage von Proportionalitäten erarbeitet werden, da es für solche Größen wie mechanische Arbeit, Impuls, Kraftstoß und Drehmoment prinzipiell keine Meßgeräte gibt. An die Stelle von Messungen treten hier theoretische Plausibilitätsbetrachtungen, die zu Festsetzungsdefinitionen führen.

Bei den Darlegungen zur Erarbeitung einer Definitionsgleichung in Produktform beschränken wir uns auf jene Teilschritte, die von der Erarbeitung einer Definitionsgleichung in Quotientenform abweichen. Alle anderen Teilschritte können sinngemäß nach dem Vorgehen im Abschnitt 3.1.3. gestaltet und aus den Tafeln 3.1./5 bis 7 erkannt werden.

Tafel 3.1./5: Abstraktionsreihe und Konkretisierungsreihe zur physikalischen Größe „Mechanische Arbeit“

Wir beobachten und vergleichen.

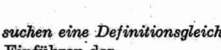
(1a)



(1b) **Durch das Einwirken von Kräften auf Körper können diese verformt, gehoben, in Bewegung gesetzt oder trotz der Reibung in Bewegung gehalten werden.**

Wir vereinfachen.

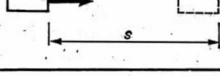
(2a)



(2b) **Mechanische Arbeit wird verrichtet, wenn ein Körper durch eine Kraft bewegt oder verformt wird.**

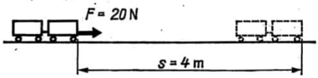
Wir suchen eine Definitionsgleichung.

(3a) Einführen der Formelzeichen:

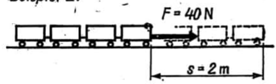


(3b) Ansatz:
Die verrichtete mechanische Arbeit ist um so größer, je größer die angreifende Kraft und je länger der zurückgelegte Weg sind.
In den folgenden Beispielen ist die verrichtete Arbeit gleich groß:

Beispiel 1:



Beispiel 2:



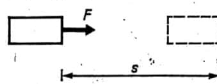
(3c) Festlegen einer Definitionsgleichung:
Arbeit = angreifende Kraft · zurückgelegter Weg
$W = F \cdot s$

(3d) Einheit: Joule (1 J) (1 J = 1 N · m)

Wir fassen zusammen.

(4)

Mechanische Arbeit wird verrichtet, wenn ein Körper durch eine Kraft bewegt oder verformt wird.
Die verrichtete Arbeit ist um so größer, je größer die einwirkende Kraft und je länger der zurückgelegte Weg sind.



Definitionsgleichung:
$W = F \cdot s$

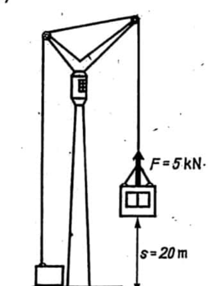
(Gültigkeitsbedingungen: konstante Kraft, Kraft wirkt in Wegrichtung)

Darin bedeuten:
W die verrichtete mechanische Arbeit (in J),
F die in Wegrichtung angreifende Kraft (in N),
s den zurückgelegten Weg (in m).

Umrechnung der Einheiten:
1 J = 1 N · m
(1 kJ = 1 kN · m)
(1 MJ = 1 MN · m)

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

(5a/b)



$W = F \cdot s$
$W = 5\,000\ \text{N} \cdot 20\ \text{m}$
$W = 100\,000\ \text{J}$
$W = 100\ \text{kJ}$

$W = F \cdot s$
$W = 40\ \text{kN} \cdot 20\,000\ \text{m}$
$W = 800\,000\ \text{kJ}$
$W = 800\ \text{MJ}$

(5c) kann entfallen
(5d) (vgl. das Beispiel zur mechanischen Arbeit S. 108)

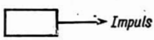
Tafel 3.1./6: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Impuls“

Wir beobachten und vergleichen.

(1a) Abbremsen eines LKW und eines Mopeds ($m_1 > m_2$, $v_1 > v_2$), Abbremsen eines beladenen und eines unbeladenen Güterwaggons mit Bremsschuhen ($m_1 > m_2$, $v_1 > v_2$), Abbremsen zweier Schlitten ($m_1 = m_2$, $v_1 < v_2$).

(1b) Das Anhalten von Körpern mit verschiedenen Massen und mit verschiedenen Geschwindigkeiten ist unterschiedlich schwer.

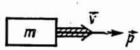
Wir idealisieren.

(2a) 

Annahme:
gleichförmige Bewegung

(2b) Der Impuls eines Körpers ist ein Maß dafür, wie stark man auf ihn einwirken muß, um seine Bewegung zu beenden.

Wir lernen die Definitionsgleichung kennen.

(3a) Einführen der Formelzeichen: 

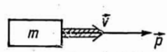
(3b) Ansatz:
Der Impuls eines Körpers ist um so größer, je größer seine Masse und je größer seine Geschwindigkeit sind. Der Impuls ist eine vektorielle physikalische Größe.

(3c) Aus theoretischen Untersuchungen wurde als Definitionsgleichung festgelegt:
$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

(3d) Einheit: $N \cdot s$ ($1\,N \cdot s = 1\,kg \cdot m \cdot s^{-1}$)

Wir fassen zusammen.

(4)

Der Impuls eines Körpers ist ein Maß dafür, wie stark man auf ihn einwirken muß, um seine Bewegung zu beenden. Der Impuls ist eine vektorielle physikalische Größe.
Definitionsgleichung:
$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$
Einheit: $N \cdot s$ 

Halbquantitative Angabe der physikalischen Größe. Durch theoretische Erörterungen an Vorgängen, die den Schülern aus dem Alltag bekannt sind, wird unter Führung des Lehrers die Erkenntnis erarbeitet: „Der (Die/Das) ... ist um so größer, je größer ... ist und je größer ... ist.“ Da hier keine Messungen möglich sind, dürfen diese Zusammenhänge nicht als Proportionalität formuliert werden, es könnte ja zum Beispiel auch eine quadratische Abhängigkeit existieren, die man allein aus Plausibilitätsbetrachtungen nicht erkennen kann.

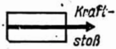
Tafel 3.1./7: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Kraftstoß“

Wir beobachten und vergleichen.

(1a) Anstoßen eines Fußballs — Rangieren von Waggons
Abschlagen eines Tennisballs — Aufeinanderstoßen von Billardkugeln

(1b) Bei einem Stoß auf einen frei beweglichen Körper ist der eigentliche Vorgang der Beschleunigung nicht beobachtbar.

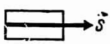
Wir idealisieren.

(2a) 

Annahmen:
- Kraft wirkt kurzzeitig,
- Kraft ist während Stoß konstant,
- Körper nicht deformierbar (Massenpunkt),
- keine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme,
- Weg während Stoß $\ll$ Weg nach Stoß.

(2b) Der Kraftstoß einer Kraft ist ein Maß dafür, wie kräftig und wie lange die Kraft auf einen Körper einwirkt.

Wir lernen die Definitionsgleichung kennen.

(3a) Einführen der Formelzeichen: 

(3b) Ansatz:
Der Kraftstoß einer Kraft ist um so größer, je größer die Kraft ist und je länger sie einwirkt.
Der Kraftstoß ist eine vektorielle physikalische Größe.

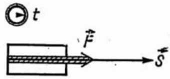
(3c) Aus theoretischen Untersuchungen wurde als Definitionsgleichung festgelegt:
$\vec{S} = \vec{F} \cdot t$

(3d) Einheit: N · s

Wir fassen zusammen.

(4)

Der Kraftstoß einer Kraft ist ein Maß dafür, wie kräftig und wie lange die Kraft auf einen Körper einwirkt. Der Kraftstoß ist eine vektorielle physikalische Größe.



Definitionsgleichung:
$\vec{S} = \vec{F} \cdot t$

(Gültigkeitsbedingungen: kurzzeitiges Einwirken der Kraft, keine Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme)

Einheit: N · s

Zur Erarbeitung der halbquantitativen Angaben der mechanischen Arbeit ist eine Betrachtung zum Verrichten der Verschiebungsarbeit an drei gleichen Experimentierwagen geeignet.
Dazu wird zuerst die Frage untersucht: „Wie hängt die verrichtete Arbeit von der am Körper angreifenden Kraft ab?“ Ziehen wir den Experimentierwagen mit einer Kraft von 10 N einen Weg von 1 m, so wird eine bestimmte Arbeit verrichtet. Wird der zweite Wagen mit der gleichen Kraft den gleichen Weg gezogen, so wird wiederum die gleiche Arbeit wie beim ersten Wagen verrichtet. Würde man beide Wagen miteinander verbinden, dann müßte eine doppelt so große Kraft (20 N) an den Wagen angreifen, es würde aber auch eine doppelt so große Arbeit verrichtet werden. Unter Einbeziehung des dritten Wagens finden die Schüler auf der Grundlage entsprechender Demonstrationen die Antwort auf die o. g. Frage: Die verrichtete mechanische Arbeit ist um so größer, je größer die angreifende Kraft ist.
In entsprechender Weise wird jetzt eine zweite Frage untersucht: „Wie hängt die verrichtete Arbeit von dem vom Körper zurückgelegten Weg ab?“ Aus der Demonstration der etappenweisen Bewegung eines Wagens um Wege von 1 m, zweimal 1 m bzw. dreimal 1 m und der kontinuierlichen Bewegung eines zweiten Wagens um Wege von 2 m bzw. 3 m können die Schüler auch die Antwort auf die zweite Frage finden. Abschließend werden diese zwei Erkenntnisse zusammengefaßt.

Motivieren der Erarbeitung einer Definitionsgleichung. (Vgl. Abschnitt 3.1.3.!)

Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung. (Vgl. Abschnitt 3.1.3.!)

Finden einer Möglichkeit zur zahlenmäßigen Angabe der physikalischen Eigenschaft an realen Objekten. Auf der Grundlage der oben erarbeiteten Zusammenhänge und entsprechender vorangegangener Übungen zur Produktbildung (vgl. Abschnitt 2.2.7.) werden die Schüler zu der Erkenntnis geführt, daß beide Größen in die Definitionsgleichung als Faktoren eingehen müssen. Bei den Größen Drehmoment, Kraftstoß und Impuls müssen die Schüler in der Abiturstufe aber darauf aufmerksam gemacht werden, daß man aus den bisherigen Betrachtungen nicht sagen kann, mit welchen Potenzen diese Größen in das Produkt eingehen. Für diese Größen werden im nachfolgenden Teilschritt Festsetzungsdefinitionen gegeben. Für die Größe mechanische Arbeit besteht eine etwas andere Situation, da man sich durch die Verschiebung eines Experimentierwagens um einen Weg von 1 m ein bequemes Vergleichsmaß schaffen kann.

Beim Finden einer Möglichkeit zur zahlenmäßigen Angabe der mechanischen Arbeit kann man von zwei Vorgängen ausgehen, in denen nach den vorangegangenen Betrachtungen die gleiche Arbeit verrichtet wird (vgl. Teil (3b) in Tafel 3.1./5). Hierzu gibt der Lehrer folgende Zielstellung: „Wir wollen eine Gleichung zur Berechnung der mechanischen Arbeit festlegen. Diese Gleichung müßte für beide Vorgänge die gleiche Arbeit ergeben. Wer hat einen Vorschlag, wie die Gleichung aussehen müßte: Arbeit = . . . ?“

Hierauf finden nur wenige Schüler den Ansatz. Es empfiehlt sich, von den Vorschlägen der Schüler an einer Nebentafel die drei in Tabelle 3.1./1 dargestellten Vorschläge zu diskutieren.
Ohne Berücksichtigung der Einheiten zeigt der Vergleich der Zahlenwerte, daß nur das Produkt für beide Vorgänge gleiche Zahlenwerte für die verrichteten Arbeiten ergibt. Nunmehr werden die Schüler aufgefordert, auch aus dem oben erkannten halbquantitativen Zusammenhang zwischen Arbeit, Kraft und Weg zu begründen, weshalb die Vorschläge mit den Quotienten ausscheiden und weshalb diesem Zusammenhang allein der Vorschlag mit dem Produkt entspricht.

Tabelle 3.1./1

Vorschläge	Arbeit (Beispiel 1)	Arbeit (Beispiel 2)	Vergleich
$\text{Arbeit} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Weg}}$	$\frac{20\ \text{N}}{4\ \text{m}}$	$\frac{40\ \text{N}}{2\ \text{m}}$	$5 \neq 20$
$\text{Arbeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Kraft}}$	$\frac{4\ \text{m}}{20\ \text{N}}$	$\frac{2\ \text{m}}{40\ \text{N}}$	$0{,}2 \neq 0{,}05$
$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \cdot \text{Weg}$	$20\ \text{N} \cdot 4\ \text{m}$	$40\ \text{N} \cdot 2\ \text{m}$	$80 = 80$

Verallgemeinern zur Definitionsgleichung bzw. Geben der Definitionsgleichung. Für die Größe mechanische Arbeit wird die an den Experimentierwagen gefundene Möglichkeit zur zahlenmäßigen Angabe der Arbeit für beliebige Körper verallgemeinert. Für die Größen Drehmoment, Impuls und Kraftstoß werden die Definitionsgleichungen als Festsetzungsdefinitionen gegeben. In den Tafeln 2.2./2 sowie 3.1./6 und 7 entstehen die Teile (3c).

Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen der Definitionsgleichung. (Vgl. Abschnitt 3.1.3.!)

Einführen der Einheit der physikalischen Größe. (Vgl. Abschnitt 3.1.3.!)

Ein anderer Weg zur Einführung der Definitionsgleichungen in Produktform ist für die Abiturstufe im Abschnitt 3.1.7. dargestellt.

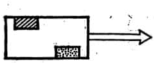
3.1.5. Erarbeiten weiterer Definitionsgleichungen

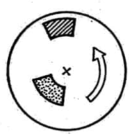
Theoretische Herleitung von Definitionsgleichungen. Für einige physikalische Größen werden die Definitionsgleichungen auf theoretischem Wege erarbeitet. Das betrifft zum Beispiel die Größen potentielle Energie und kinetische Energie. Das Vorgehen hierbei ist im Abschnitt 3.4. dargelegt.

Tafel 3.1./8: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Winkelgeschwindigkeit“

Wir beobachten und vergleichen.

(1a)



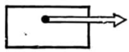


(1b) Bei der Translation bewegen sich alle Teile des Körpers gleich schnell.
Der Bewegungszustand des gesamten Körpers kann durch den Bewegungszustand eines seiner Teile beschrieben werden.

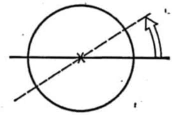
Bei der Rotation bewegen sich einzelne Teile des Körpers unterschiedlich schnell.
Der Bewegungszustand des gesamten Körpers kann nicht mehr durch den Bewegungszustand eines einzelnen Punktes beschrieben werden.

Wir idealisieren.

(2a) In den Körper kann man einen beliebigen Punkt einzeichnen, der sich mit dem Körper mitbewegt.



In den rotierenden Körper kann man durch die Achse eine Gerade einzeichnen, die sich mit dem Körper mitdreht.

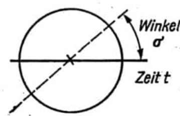


(2b) Bei der Translation gibt es eine physikalische Größe, die den Bewegungszustand für alle Teile des Körpers beschreibt: die *Bahngeschwindigkeit* des Körpers.

Bei der Rotation gibt es in Analogie zur Translation auch eine physikalische Größe, die den Bewegungszustand für alle Teile des Körpers beschreibt: die *Winkelgeschwindigkeit des* Körpers.

Wir suchen eine Definitionsgleichung.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Ansatz:

$$\text{Bahngeschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} \qquad \text{Winkelgeschwindigkeit} = \frac{\text{Winkel}}{\text{Zeit}}$$

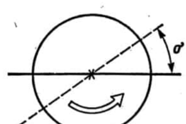
(3c) Definitionsgleichung:

$$v = \frac{s}{t} \qquad \omega = \frac{\sigma}{t}$$

(3d) Einheit: $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ $\qquad$ s^{-1}

Wir fassen zusammen.

(4) Die Winkelgeschwindigkeit eines Körpers ist ein Maß dafür, wie schnell dieser rotiert.



Definitionsgleichung:

$\omega = \dfrac{\sigma}{t}$ (Gültigkeitsbedingung: gleichförmige Rotation)

Darin bedeuten:
ω die Winkelgeschwindigkeit (in s^{-1}),
σ den Drehwinkel (im Bogenmaß),
t die Zeit (in s).

Festlegung von Definitionsgleichungen durch Analogiebetrachtungen. Auf diesem Wege können im Physikunterricht zum Beispiel die Definitionsgleichungen der Größen Winkelgeschwindigkeit, Winkelbeschleunigung und Trägheitsmoment erarbeitet werden. In Tafel 3.1./8 ist ein Weg zur Erarbeitung der Größe Winkelgeschwindigkeit durch Analogiebetrachtungen dargestellt. (Für die Einführung der Einheit s^{-1} empfiehlt sich eine rechtzeitige Übung zum Umrechnen von Winkelangaben aus dem Winkelmaß in das Bogenmaß. Vgl. Abschnitt 2.2.7.!)

3.1.6. Interpretieren der Definitionsgleichungen

Nach dem im Abschnitt 2.2.4. beschriebenen Schritt „Wir fassen zusammen" folgt der Schritt „Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung an einigen einfachen Beispielen". Das allgemeine Vorgehen hierbei ist im Abschnitt 2.2.5. dargestellt, hier beschränken wir uns auf einige Ergänzungen.

Erläuterung des Inhalts der Gleichung in einer Konkretisierungsreihe. In den Tafeln 2.2./9 und 3.1./1 bis 5 entstehen die Teile (5a).

Entwickeln erster Größenvorstellungen. An Hand einer nach bestimmten Gesichtspunkten geordneten Übersicht erhalten die Schüler erste Vorstellungen über die in der Technik und in der Natur vorkommenden Werte der eingeführten physikalischen Größe (vgl. Übersicht 3.1./2). Durch die Schüler werden einzelne Werte von diesen Beispielen interpretiert.

Dazu dienen Fragen wie:
„Was sagt uns die Angabe: Ein Fußgänger hat eine Geschwindigkeit von 4 km/h?"
„Was sagt uns die Angabe: Der Draht hat einen elektrischen Widerstand von 8 Ω?"
„Was sagt uns die Angabe: Das Magnetfeld hat eine magnetische Flußdichte von 2 T?"
Dabei orientiert der Lehrer die Schüler darauf, solche Werte wie 4 km/h als 4 km/1 h bzw. 8 Ω als 8 V/1 A bzw. 2 T als 2 N je 1 A Stromstärke und 1 m Leiterlänge zu kommentieren.

Solche Fragen führen auch zu der Notwendigkeit, für bestimmte physikalische Größen (wie Geschwindigkeit, Leistung u. a.) solche Begriffe wie „Durchschnittswert", „mittlerer Wert", „Höchstwert" oder „maximaler Wert" gegenüberzustellen. Hierdurch wird die Aufmerksamkeit der Schüler darauf gelenkt, immer die in die Definition eingegangenen Bedingungen (wie gleichförmige Bewegung, gleichmäßiges Verrichten der Arbeit) zu beachten. Weiterhin wird der Näherungscharakter der angegebenen Werte hervorgehoben.
Durch die Auswahl der Beispiele in solchen Übersichten über die in der Natur und in der Technik vorkommenden Werte der physikalischen Größe erkennen die Schüler die Zweckmäßigkeit der Einführung von Vielfachen oder Teilen der Einheit, und sie werden mit weiteren Bereichen der Natur und Technik bekannt, in denen die neue physikalische Größe von Bedeutung ist.
In diese Übersichten sollten möglichst oft Beispiele für den Betrag dieser physikalischen Größe im Bereich der Biologie (Zugkräfte und Geschwindigkeit von Tieren, Dichte des Menschen, Blutdruck, Leistung des Herzens, Stärke von Gehirnströmen), der Geographie (Geschwindigkeit von Meeresströmungen und Gletschern, Dichte verschiedener Erdschichten), der Astro-

Übersicht 3.1./2: Geschwindigkeiten in Natur und Technik

Fahrzeuge	km/h	Mensch/Tier	km/h	Naturvorgänge	
Personenkraftwagen (auf der Autobahn)	bis 100	Mensch		Windgeschwindigkeiten	
D-Zug	bis 120	Fußgänger	4	Sturm	bis 90 km/h
		100-m-Läufer	30	Orkan	bis 120 km/h
		Radfahrer	20		
		Rennfahrer	bis 70	Schallgeschwindigkeiten	
Schiffe				in Luft	340 m/s
Segelschiffe	bis 30	Tiere		in Wasser	1500 m/s
Handelsschiffe	bis 50	Elefant	bis 30		
U-Boote	bis 60	Pferd	bis 90	Lichtgeschwindigkeit	300 000 km/s
		Gepard	bis 130		
Flugzeuge/Raumschiffe					
Verkehrsflugzeuge	bis 900	Buchfink	bis 50	Erde auf der Bahn um die Sonne	30 km/s
Militärflugzeuge	bis 3600	Schwalbe	bis 120	Gletschereis	20 cm am Tag
Raumschiffe um die Erde	8 km/s	Wanderfalke	bis 250		
		Delphin	bis 60		

nomie (Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Umlaufbahn, Lichtgeschwindigkeit, Dichte anderer Gestirne, Druck in der Sonne) und der Technik angegeben werden. Zusammen mit einigen kommentierenden Worten des Lehrers fördert dies die Entwicklung des wissenschaftlichen Weltbildes und zeigt die Bedeutung der Physik für die Erkenntnisgewinnung in anderen Naturwissenschaften.

Erstes Lösen von Aufgaben. In den o. g. Konkretisierungsreihen entstehen die Teile (5b) bis (5d). Für die Aufgaben in den Teilen (5c) und (5d) empfiehlt es sich, Werte aus den oben genannten Übersichten zugrunde zu legen.

Formulieren der Meßvorschrift für die physikalische Größe und erste praktische Meßübungen. Durch das Formulieren der Meßvorschrift zur praktischen Bestimmung der physikalischen Größe aus deren Definitionsgleichung erfolgt ein weiteres Interpretieren der Definitionsgleichung. Damit wird meistens die Durchführung einer experimentellen Schülerarbeit oder eines Demonstrationsexperimentes vorbereitet. Hierbei sollten die Schüler je nach Altersstufe die zu messenden Größen, die Meßanordnung und die Meßtabelle selbst vorschlagen.

Auf eine solche Interpretation sollte auch dann nicht verzichtet werden, wenn im Unterricht ein Meßgerät zur direkten Messung der physikalischen Größe benutzt wird.

Physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Definitionsgleichung. Für Definitionsgleichungen in Produktform kommt es darauf an, den Schülern die physikalischen Konsequenzen bewußtzumachen, die sich daraus ergeben, daß die Faktoren mathematisch gleichwertig in das Produkt eingehen. Für Definitionsgleichungen in der Quotientenform $a = \frac{b}{c}$ kommt es in den oberen Klassen auf die Erkenntnis an, daß der mathematisch möglichen Proportionalität $a \sim b$ keine physikalische Abhängigkeit entspricht. So ist der elektrische Widerstand R für metallische Leiter von der elektrischen Spannung U unabhängig.

3.1.7. Mathematisch motivierte Wege für die Definition abgeleiteter physikalischer Größen

Für physikalische Größen, deren Definitionsgleichungen *Quotientenform* haben, ist dieser Weg durch folgende Schritte gekennzeichnet:

— Aus experimentellen Untersuchungen wird an mehreren Objekten eine Proportionalität zwischen zwei physikalischen Größen erkannt.
— Um diese Proportionalität als Gleichung schreiben zu können, muß aus mathematischen Erwägungen ein Proportionalitätsfaktor eingeführt werden. Aus der Proportionalität kann auf die mathematische Konstanz des Quotienten der zwei physikalischen Größen geschlossen werden.
— Aus der Tatsache, daß die Proportionalität an verschiedenen Objekten wiederkehrt, der Proportionalitätsfaktor bzw. der Quotient aber für jedes Objekt einen anderen Wert annimmt, wird geschlossen, daß dieser Faktor bzw. Quotient eine gemeinsame physikalische Eigenschaft dieser Objekte widerspiegelt.
— Durch eine Namensgebung für diesen Faktor bzw. für diesen Quotienten wird eine neue physikalische Größe definiert.
— Es wird nach einer physikalischen Interpretation der neuen physikalischen Größe gesucht.

Für physikalische Größen, deren Definitionsgleichungen *Produktform* haben, ist dieser mathematisch motivierte Weg durch folgende Schritte gekennzeichnet:

— In theoretischen Untersuchungen treten bestimmte Produkte (häufig) auf.
— Um die Gleichung zu vereinfachen, wird durch eine Namensgebung für dieses Produkt eine neue physikalische Größe eingeführt.
— Es wird nach einer physikalischen Interpretation dieser neuen physikalischen Größe gesucht.

Diese Wege sind mathematisch und physikalisch korrekt. Dennoch sind diese mathematisch motivierten Wege zur Definition physikalischer Größen für den Unterricht in der allgemeinbildenden Schule wohl pädagogisch nicht besonders effektiv, weil das inhaltliche Verständnis der physikalischen Größen meistens zu kurz kommt. Nicht selten wird mit den Gleichungen sogar schon gerechnet, bevor die Schüler wissen, was sie eigentlich berechnen. In der Abiturstufe sollten einige ausgewählte physikalische Größen nach einer physikalisch motivierten Einführung auch noch eine mathematisch motivierte Einführung erfahren.
So können den Schülern nach der im Abschnitt 3.1.4. beschriebenen Einführung der physikalischen Größen Kraftstoß und Impuls bei der anschließenden Erarbeitung der Gleichung $F \cdot t = m \cdot v_2 - m \cdot v_1$ die zuvor nur mitgeteilten Definitionsgleichungen dieser Größen begründet werden.

3.2. Einführung und Definition physikalischer Basisgrößen

„Übrigens ist diese Art, einen fundamentalen physikalischen Begriff dadurch zu definieren, daß man ihn erst auf eine spezifische Sinnesempfindung zurückführt, und hierauf die erste primitive Definition durch eine zweite, schärfere ergänzt und verfeinert, die in der Physik allgemein übliche und wohl auch einzig mögliche."

(M. Planck [1; S. 11])

3.2.1. Vorschlag für die Einführung und Definition physikalischer Basisgrößen

Für die Einführung und Definition physikalischer Basisgrößen empfehlen wir ein Vorgehen in folgenden Schritten:

(1) *Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik.*
— Motivieren der Einführung der physikalischen Größe,
— Durchführen erster Beobachtungen zum empirischen Herausarbeiten der physikalischen Eigenschaft, die durch die physikalische Größe beschrieben wird.
(2) *Wir vereinfachen die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*
— Untersuchen dieser physikalischen Eigenschaft am idealisierten physikalischen Objekt,
— Mitteilen bzw. Anwenden des Fachwortes für die physikalische Eigenschaft.
(3) *Wir messen.*
— Halbquantitative Angabe der physikalischen Größe,
— Motivieren der Erarbeitung einer Meßvorschrift,
— Finden bzw. Beschreiben einer Möglichkeit zum Messen der physikalischen Eigenschaft,
— Einführen bzw. Wiederholen der Einheit der physikalischen Größe,
— Mitteilen des Formelzeichens für die physikalische Größe.
(4) *Wir fassen zusammen.*
(5) *Wir verdeutlichen uns die Bedeutung der physikalischen Größe an einigen einfachen Beispielen.*
— Erläutern der Bedeutung der physikalischen Größe in einer Konkretisierungsreihe,
— Entwickeln erster Größenvorstellungen bzw. Erweitern derselben,
— Durchführen erster praktischer Meßübungen.
(6) *Wir können neue Gesetze erkennen.*

Die Abweichungen dieses Vorschlages von dem Vorschlag zur Behandlung abgeleiteter physikalischer Größen ergeben sich aus dem im Abschnitt 3.1.1. dargestellten Unterschied zwischen der Definition einer Basisgröße und der Definition einer abgeleiteten Größe sowie aus den Vorleistungen anderer Unterrichtsfächer. So besitzen die Schüler aus dem Unterricht in den Fächern Mathematik, Werkunterricht, Heimatkunde, Geographie und Biologie sowie aus dem täglichen Leben bereits umfangreiche Kenntnisse über einige Basisgrößen (Länge, Zeit, Temperatur und Masse). Daher kann im Physikunterricht nicht bei allen zu behandelnden Basisgrößen von einer Ersteinführung

derselben gesprochen werden. Manchmal handelt es sich vielmehr darum, bestimmte bereits vorhandene Kenntnisse vom Umgangssprachlichen abzugrenzen, zu ordnen und zu verallgemeinern.
Der hier dargelegte Vorschlag gilt auch für die Einführung und Definition solcher physikalischer Größen, die in der Physik als Wissenschaft zwar abgeleitete Größen darstellen, im Unterricht einer bestimmten Klassenstufe aber methodisch wie eine Basisgröße behandelt werden. Beispiele hierfür sind die elektrische Spannung und die Masse bzw. die Kraft.

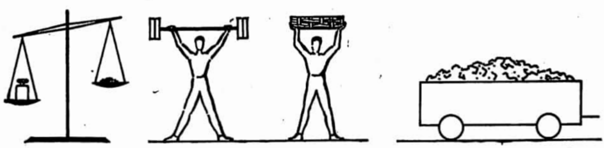
3.2.2. Erarbeiten der Meßvorschrift für die physikalische Basisgröße

Die Gestaltung der ersten zwei Schritte bei der Einführung und Definition physikalischer Größen ist im Abschnitt 2.2. beschrieben. In den Tafeln 2.2./3 und 3.2./1 entstehen dabei die Teile (1a) bis (2b).
Daran anschließend erfolgt der 3. Schritt: „Wir messen“. Dieser beginnt mit den Teilschritten „Halbquantitative Angabe der physikalischen Größe“ und „Motivieren der Erarbeitung einer Meßvorschrift“. Hierfür gelten sinngemäß die gleichen Aussagen wie für abgeleitete physikalische Größen (vgl. Abschnitt 3.1.3.).

Tafel 3.2./1: Abstraktionsreihe zur physikalischen Größe „Masse“

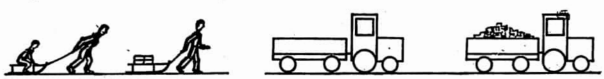
Wir beobachten und vergleichen.

(1a)



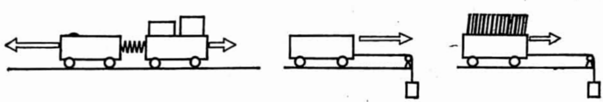
(1b) Körper sind unterschiedlich schwer (bzw. leicht).

(1c)



(1d) Um verschiedene Körper in Bewegung zu versetzen oder abzubremsen, sind unterschiedlich große Kräfte erforderlich.

(1e)



(1f) Körper, die schwerer sind als andere, lassen sich auch nur mit größeren Kräften in Bewegung versetzen oder abbremsen.

Wir vereinfachen.

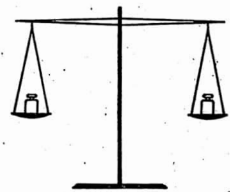
(2a) $\boxed{}$

(2b) Die Masse eines Körpers gibt an, wie schwer bzw. wie träge er ist.

Wir messen.

(3a) Einführung des Formelzeichens: $\boxed{m}$

(3b) Ansatz:
Eine Balkenwaage befindet sich im Gleichgewicht, wenn die zwei Körper auf beiden Seiten gleich schwer sind.



(3d) Festlegung einer Einheit: kg
1 Kilogramm ist die Masse des Urkilogramms.

Wir fassen zusammen.

(4)

Die Masse eines Körpers gibt an, wie schwer bzw. wie träge er ist.
Je schwerer bzw. je träger ein Körper ist, desto größer ist seine Masse.

$\boxed{m}$

Formelzeichen: m
Meßgerät: Waage (mit Wägesatz)
Einheiten: kg und t

Finden bzw. Beschreiben einer Möglichkeit zum Messen der physikalischen Eigenschaft. Den Schülern wird die Frage gestellt: „Wie können wir die Masse des Hakenkörpers, des Experimentierwagens usw. zahlenmäßig vergleichen?“ oder „Wie können wir die Stärke der Ströme, die durch diese Lampen fließen, zahlenmäßig vergleichen?“
Bei einigen Größen können diese Fragen entfallen, wenn die Schüler hierauf bereits im Zusammenhang mit den Fragen zur halbquantitativen Angabe der physikalischen Größe geantwortet haben.
Beim Finden bzw. beim Beschreiben einer Möglichkeit zum Vergleichen und nach Festlegung einer Einheit zum Messen der physikalischen Eigenschaft kommt es vor allem darauf an, den Schülern die physikalischen Zusammenhänge bewußtzumachen, die der Eichung der Meßgeräte zugrunde liegen. Dabei ist es für die Entwicklung des schöpferischen und des technischen Denkens nützlich, die Schüler auch nach weiteren Zusammenhängen aus dem täglichen Leben suchen zu lassen, die prinzipiell ebenfalls zum Messen der betrachteten physikalischen Eigenschaft geeignet sind — auch wenn deren technische Realisierung nicht oder nur sehr aufwendig möglich wäre.

Der Beschreibung eines Meßgerätes sollte folgende Gliederung zugrunde gelegt werden:

- Verwendungszweck des Gerätes,
- für die Funktion des Gerätes wichtige Teile,
- physikalisches Gesetz, das als Wirkprinzip genutzt wird,
- Wirkungsweise des Gerätes auf der Grundlage des physikalischen Gesetzes.

Einführen bzw. Wiederholen der Einheit der physikalischen Größe. Nach der Angabe der international festgelegten Bezeichnung für die Einheit der neuen physikalischen Größe durch die Schüler (bzw. durch den Lehrer) wird den Schülern bei ausgewählten Größen, wie Masse und Temperatur, in einem kurzen Lehrervortrag die historische Entstehung der heute gültigen Verkörperung der Einheit in Form eines Prototyps beziehungsweise das Zustandekommen der heute gültigen Meßvorschrift erläutert. Durch diesen kurzen Vortrag sollen die Schüler erkennen, daß die heute benutzten Einheiten das Ergebnis einer historischen Entwicklung darstellen. Da ein solcher Vortrag nicht nur fertige Verallgemeinerungen enthalten kann, sondern diese vielmehr erst an Hand einiger historischer Einzelheiten entwickelt bzw. illustriert werden müssen, sind die Schüler zu Beginn des Vortrages darauf hinzuweisen, daß sie sich diese Einzelheiten nicht merken sollen.
Im Mittelpunkt eines solchen Vortrages können folgende Schwerpunkte stehen:

- erste praktische Bedürfnisse zum Vergleich und zur Messung dieser Größe und erste Ansätze zur Entwicklung geeigneter Meßgeräte,
- schrittweises Überwinden der Benutzung unterschiedlicher Einheiten in den verschiedenen Ländern und die Bedeutung dieser Vereinheitlichung für den Aufschwung in der internationalen Entwicklung von Handel, Technik, Verkehr und Forschung,
- schrittweises Verbessern der Meßgenauigkeit und deren Bedeutung für die Erkenntnis der Natur und für die Anwendung in der Technik.

Der Vortrag zur Einführung der Einheit für die *Masse* könnte folgende Aussagen umfassen:

- Der griechische Physiker Archimedes hat bei seinen Untersuchungen die Masse in der Einheit Chalkos gemessen. (1 Chalkos = 0,13 g; 8 Chalkoi = 1 Obolos = 1,04 g). In anderen Ländern waren noch andere Einheiten üblich. Deshalb wurde bei Händlern stets unmittelbar mit Waagen gemessen.
- Erst vor etwa 200 Jahren haben sich Physiker und Ingenieure vieler Länder auf die Einheit 1 Kilogramm geeinigt. Einige Berufsgruppen wie die Goldschmiede und einige Länder haben heute noch eigene Einheiten (Karat, Unze).
- Als Masseneinheit hatte man ursprünglich die Masse von 1 Liter Wasser (bei 4 °C) gewählt. Es standen zwar überall Wasser und relativ genaue Litergefäße zur Verfügung, aber die für Präzisionsmessungen erforderliche Einhaltung der Temperatur von 4 °C war nicht einfach. Es wurden deshalb für die Wissenschaft bald Zylinder aus Platin hergestellt, deren Masse derjenigen von 1 Liter Wasser möglichst gleichkommen sollte. Infolge verschiedener Fehlerquellen ist dieses Urkilogramm etwa um 0,4 g größer geworden, als ursprünglich geplant.
- Als vor 100 Jahren ein neues Urkilogramm aus Platin-Iridium hergestellt und in 40 Kopien an alle beteiligten Länder geliefert wurde, hat man das Urkilogramm aber trotzdem in dieser Größe beibehalten.

— Inzwischen haben immer mehr Länder diese Einheit übernommen. Die DDR erhielt die Kopie des Urkilogramms mit der Nummer 55.

Der Vortrag zur Einführung der Einheit für die *Temperatur* könnte folgende Aussagen umfassen:

— Bereits im Altertum war bekannt, daß sich Körper bei Erwärmung ausdehnen. Versuche zur Nutzung dieses Zusammenhangs für die Schaffung eines Meßgerätes für die Temperatur wurden aber erst durch Galilei bekannt. Er versuchte dafür die Ausdehnung von Luft zu nutzen. Diese Versuche blieben ohne Erfolg.
— Der entscheidende Fortschritt gelang erst, als man die Wärmeausdehnung von Alkohol zum Bau eines Thermometers nutzte. Einem geschickten Glasbläser gelang es, ein Glasgerät herzustellen, das wie die heutigen Thermometer aus einem kleinen Gefäß mit einer sich anschließenden engen Röhre bestand. Dieses Thermometer wurde für erste Temperaturmessungen in der Wetterforschung benutzt.
— Der Nachteil dieses Thermometers bestand darin, daß die Skale willkürlich aufgetragen worden war, weil man noch keine Temperaturwerte kannte, die in der Natur an jedem Ort und zu jeder Zeit immer wieder vorkommen. Als Anfang der Skale wurde die tiefste Winterkälte und als Ende die größte Sommerhitze genommen.
— Ein großer Fortschritt wurde vor etwa 260 Jahren durch eine deutschen Glasbläser erreicht. Er nutzte drei in der Natur vorkommende Temperaturen zur Anfertigung einer Skale: Die Temperatur einer Salmiaklösung, die erst bei starkem Frost erstarrt, die Temperatur schmelzenden Eises und die Temperatur des gesunden menschlichen Körpers. Den Abstand zwischen der Gefriertemperatur dieser Salmiaklösung und der Temperatur des gesunden menschlichen Körpers unterteilte er in mehrere Teile. In Anlehnung an das zu jener Zeit übliche Zwölfersystem wählte er dafür zunächst 12 Teile. Später nahm er noch weitere Unterteilungen vor (in 8 mal 12 Teile). (Hinweis: Dutzend, 12 Monate, 1 Tag gleich 2mal 12 Stunden, 1 Stunde gleich 5 mal 12 Minuten, 1 Vollkreis gleich 30 mal 12 Grad, 12 Feen im Märchen Dornröschen usw.)
— In der folgenden Zeit entstanden nach ähnlichen, in der Natur immer wiederkehrenden Temperaturpunkten weitere Skalen. So schlug der Schwede Celsius vor, als feste Temperaturpunkte die Temperatur von schmelzendem Eis und die Siedetemperatur des Wassers zu benutzen. Dem Siedepunkt ordnete er 0° und dem Schmelzpunkt 100° zu. Den Abstand zwischen beiden Punkten teilte er als Anhänger des Dezimalsystems in 100 Teile ein, die er Grad nannte.
— Allmählich kam es zu einem großen Durcheinander bei Temperaturangaben, die den Austausch von Forschungsergebnissen und die Angabe von Temperaturen für bestimmte Prozesse in der Industrie und in der Medizin erschwerten. So konnte es zum Beispiel der Fall sein, daß der Arzt zwar ein Bad bei einer bestimmten Temperatur verordnete, die Hausfrau sich aber nach einer anderen Temperaturskale richtete als der Arzt. Es war deshalb in der Medizin ein Fortschritt, daß 1916 in Deutschland das heute noch gültige Fieberthermometer durch Gesetz eingeführt wurde.
— Im Jahre 1927 einigten sich 31 Länder auf die Benutzung einer einheitlichen Skale, die nach Celsius benannt wurde. Man behielt die Unterteilung in 100° bei, kehrte aber die Zuordnung der Werte 0° und 100° um; dem Schmelzpunkt wurden 0 °C und dem Siedepunkt wurden 100 °C zugeordnet.
In der Wissenschaft wird heute noch eine andere Skale benutzt. Diese wird in Klasse 8 behandelt.

3.3. Empirische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen

„Die wichtigste, um nicht zu sagen einzige Regel für echte Naturforschung ist die: eingedenk zu bleiben, daß es unsere Aufgabe ist, die Erscheinungen kennenzulernen, bevor wir nach Erklärungen suchen oder nach höheren Ursachen fragen möchten."

(R. Mayer)

3.3.1. Empirisch erarbeitete Gesetze

Jede Erkenntnis beginnt mit der unmittelbaren Erfahrung, die aus Beobachtungen oder aus Experimenten gewonnen wird. Diese unmittelbare Erfahrung führt zu Diagrammen und Gleichungen über die Natur. Diese Gesetze werden allein durch die numerische Auswertung der Meßergebnisse gefunden. Sie entbehren zunächst oder grundsätzlich einer theoretischen Begründung.

Besteht das Gesetz in einer Abhängigkeit zwischen zwei physikalischen Größen, so wird die Gleichung dafür meistens aus der Kurvendarstellung gefunden. Dazu dienen in der Physik als Wissenschaft Funktionskriterien. Mit Hilfe dieser Kriterien kann der Funktionstyp bestimmt werden. Zusätzlich wird mit diesen Kriterien eine weitere physikalische Größe als mathematisch notwendiger Poportionalitätsfaktor definiert. Für den im Umgang mit Gleichungen geübten Physiker bleibt hierbei die physikalische Bedeutung dieses Proportionalitätsfaktors zunächst ohne Bedeutung. Häufig wird in der Physik allein mit der Darstellung des empirisch erarbeiteten Gesetzes in Form einer Kurve gearbeitet, weil der mathematische Aufwand für die Aufstellung einer einigermaßen genauen Gleichung viel zu groß werden würde.

Besteht das Gesetz aus einem Zusammenhang zwischen drei oder mehr physikalischen Größen, so kann die Gleichung für das Gesetz durch eine numerische Auswertung der Meßwerte erhalten werden. Hierbei wird aber in der Physik als Wissenschaft geprüft, ob der dazu erforderliche mathematische Aufwand sinnvoll ist oder ob man sich nicht mit der Meßwerttabelle selbst als mathematische Darstellung des Zusammenhanges begnügt. Eine grafische Darstellung eines Gesetzes zwischen drei oder mehr physikalischen Größen in Form einer Kurve ist nicht möglich. Einige dieser Zusammenhänge werden in der Physik als Wissenschaft in einem dreidimensionalen Koordinatensystem als Potentialfläche dargestellt. Tritt eine Größe als ein Parameter auf, so entsteht als vereinfachte grafische Darstellung des Gesetzes eine Kurvenschar.

Aus den mathematischen Darstellungen der Gesetze läßt sich nicht schließen, was Ursache und was Wirkung ist. Nach Übereinkunft ist es aber üblich, bei grafischen Darstellungen auf der horizontalen Achse als die unabhängig veränderlich betrachtete Größe und auf der vertikalen Achse als die abhängig veränderlich betrachtete Größe aufzutragen. In der expliziten Form einer Gleichung wird die abhängige Veränderliche isoliert auf die linke Seite geschrieben. Es wäre aber falsch, aus dem Ohmschen Gesetz in der Form $I = U/R$ herauszulesen, daß eine Spannung prinzipiell Ursache und ein Strom prinzipiell Wirkung wäre. Ebenso falsch wäre der entgegengesetzte Schluß aus der Gleichung $U = I \cdot R$. Die Abhängigkeit der Veränderlichen

und die Wahl der Betrachtungsweise können am besten durch Worte ausgedrückt werden.
Bei der empirischen Erarbeitung physikalischer Gesetze im Unterricht hängt das Vorgehen vor allem davon ab, ob das Gesetz mit bereits definierten physikalischen Größen erarbeitet wird, wie beim Reflexionsgesetz oder beim Hebelgesetz, oder ob dafür zusätzlich noch eine weitere Größe definiert werden muß, wie z. B. bei der Gleichung zur Berechnung der Wärme, zu deren Aufstellung erst noch die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes definiert werden muß.

3.3.2. Vorschlag für die empirische Erarbeitung physikalischer Gesetze

Für die empirische Erarbeitung physikalischer Gesetze mit bereits definierten physikalischen Größen empfehlen wir ein Vorgehen in folgenden Schritten:

(0) *Wir wiederholen und üben.*
(1) *Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik.*
— Motivieren der Untersuchung des physikalischen Zusammenhanges,
— Durchführen erster Beobachtungen und Messungen zum empirischen Einführen in den physikalischen Zusammenhang.
(2) *Wir vereinfachen/idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*
— Idealisieren des physikalischen Zusammenhanges,
— Mitteilen der Fachwörter für die physikalischen Idealisierungen.
(3) *Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz in Form einer Gleichung oder eines Diagramms.*
— Halbquantitative Angabe des physikalischen Zusammenhanges,
— Motivieren für das Durchführen von Messungen,
— Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung,
— Entwickeln der Meßanordnung und der Meßtabelle,
— Durchführen der Messungen (möglichst im Schülerexperiment),
— Erarbeiten der empirischen Gleichung bzw. Zeichnen der Kurve aus den Meßwerten,
— wörtliches Formulieren des Gesetzes,
— Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen des Gesetzes.
(4) *Wir fassen zusammen.*
(5) *Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung (bzw. der Kurve) an einigen einfachen Beispielen.*
— Erläutern des Inhalts der Gleichung in einer Konkretisierungsreihe,
— erstes Lösen von Aufgaben,
— Festigen des Wissens über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes,
— physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Gleichung bzw. der mathematischen Form der Kurve.
(6) *Wir können erklären und voraussagen.*
— Erklären und Vorausberechnen physikalischer Eigenschaften und Vorgänge durch Lösen von qualitativen, funktionalen und quantitativen Aufgaben,

— Erklären des Wirkprinzips von technischen Anwendungen und Entwickeln von Ideen für technische Anwendungen,
— Erläutern der Bedeutung des Gesetzes für die Entwicklung von Physik und Technik sowie für die Herausbildung des wissenschaftlichen Weltbildes.

Die Gestaltung der ersten zwei Schritte bei der empirischen Erarbeitung von physikalischen Gesetzen ist in den Abschnitten 2.2.1. und 2.2.2. beschrieben. In den Tafeln 2.2./4 und 2.2./5 sowie 3.3./1 bis 3 entstehen dabei die Teile (1a) bis (2b). Das allgemeine Vorgehen zum Schritt „Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz in Form einer Gleichung oder eines Diagramms“ ist im Abschnitt 2.2.3. dargestellt, so daß wir uns hier auf das Spezifische dieses Schrittes bei der empirischen Erarbeitung eines Gesetzes konzentrieren. Dabei sind die nachfolgenden Fälle zu unterscheiden.

3.3.3. Erarbeiten des Gesetzes durch rechnerisches Auswerten von Meßwerten

Motivieren für das Durchführen von Messungen. (Vgl. Abschnitt 2.2.2.!)

Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung. Es werden die Formelzeichen der physikalischen Größen eingetragen, die gemessen (oder aus Hilfsmessungen berechnet) werden sollen. (Vgl. die Teile (3a) in den Tafeln 2.2./4 und 3.3./1!)

Entwickeln der Meßanordnung und der Meßtabelle. Ausgehend von dem zu untersuchenden Zusammenhang und der Veranschaulichung, werden von den Schülern Vorschläge gefordert, aus denen dann die konkrete Meßanordnung erarbeitet und die Meßtabelle entwickelt bzw. gegeben wird. (Vgl. die Teile (3b) in den Tafeln 2.2./4 und 3.3./1!)

Hierzu eignen sich Fragen an die Schüler wie:
— Welche physikalischen Größen wollen wir messen?
— Welche physikalischen Größen wollen wir konstant halten?
— Welche der zu messenden physikalischen Größen betrachten wir als unabhängige Größe, die wir planvoll verändern wollen?
— Welche Werte soll diese unabhängige Größe nacheinander annehmen?

Bei der Vorbereitung der Messungen und der Meßtabelle sollte man bereits die Möglichkeiten ihrer rechnerischen Auswertung berücksichtigen, so daß man nach der Durchführung der Messungen möglichst über Meßwerte verfügt, in denen der bestehende Zusammenhang offen zutage tritt. Anderenfalls kann es geschehen, daß man irgendwelche Wertekombinationen vorzuliegen hat, aus denen man den bestehenden Zusammenhang nur mühsam herausfinden kann.

Bei der Entwicklung der Meßtabelle für die Erarbeitung des Hebelgesetzes empfiehlt es sich daher, in jeder Meßreihe zwei der vier physikalischen Größen (zum Beispiel F_1 und l_1) konstant zu halten, damit in jeder Meßreihe nur noch zwei veränderliche Größen (F_2 und l_2) auftreten. Von diesen kann man l_2 als unabhängig veränderliche Größe auswählen und untersuchen, wie sich F_2 verändern muß, damit das Gleichgewicht erreicht wird.

In einer zweiten Meßreihe werden F_2 und l_2 konstant gehalten, l_1 wird als unabhängige und F_1 wird als abhängige veränderliche Größe betrachtet. (Vgl. Teil (3b) in Tafel 3.1./1!)

Muß die abhängig oder die unabhängig veränderliche Größe erst aus den Meßwerten anderer Größen berechnet werden, so beginnt die Meßtabelle dennoch mit der unabhängigen Größe. Da diese jetzt in der Tabelle von der abhängig veränderlichen Größe getrennt ist, werden beide farblich hervorgehoben.

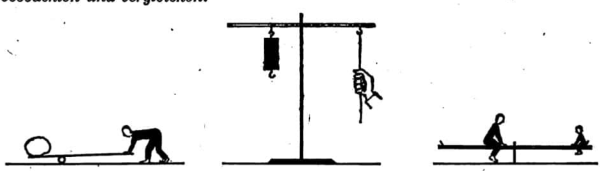
Durchführen der Messungen. Diese erfolgen möglichst im Schülerexperiment oder zumindest unter Einbeziehung der Schüler in das Demonstrationsexperiment.

Erarbeiten der Gleichung. Die Auswertung der Meßwerte wird bewußt als ein Prozeß des Suchens nach einer Gleichung gestaltet, die von den Meßwerten erfüllt wird. Dazu dienen Aufforderungen wie: „Seht Euch die Zahlen in den einzelnen Zeilen aufmerksam an! Wer erkennt zwischen den Meßwerten einen Zusammenhang? Wie kann man diesen Zusammenhang als Gleichung schreiben?“

Tafel 3.3./1: Abstraktionsreihe und Konkretisierungsreihe zur Behandlung des Hebelgesetzes

Wir beobachten und vergleichen.

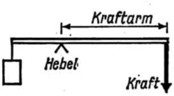
(1a)



(1b) Die für das Gleichgewicht aufzuwendende Kraft wird um so kleiner, je weiter außen die Kraft angreift.

Wir vereinfachen.

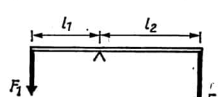
(2a)



(2b) Die für das Gleichgewicht an einem starren Hebel aufzuwendende Kraft wird um so kleiner, je größer der Kraftarm wird.

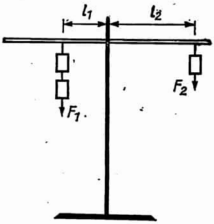
Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Meßanordnung und Meßtabelle:

F_1 in N	F_2 in N	l_1 in cm	l_2 in cm
1	...	5	(10)
1	...	5	(20)
1	...	5	(25)
...	1,5	(5)	5
...	1,5	(15)	5



(3c) Finden einer Gleichung:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

Wir fassen zusammen.

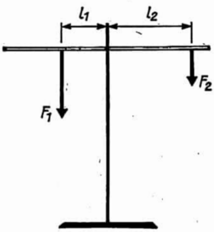
(4)

An einem Hebel besteht zwischen zwei Kräften Gleichgewicht, wenn sich die Kräfte zueinander umgekehrt verhalten wie ihre Kraftarme.

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

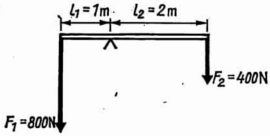
Darin bedeuten:

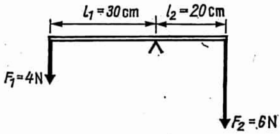
F_1 und F_2 die Kräfte (in N).
l_2 und l_1 die Kraftarme (in cm oder m).



Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

(5a/b)





$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

$$\frac{800\text{ N}}{400\text{ N}} = \frac{2\text{ m}}{1\text{ m}}$$

$$\frac{2}{1} = \frac{2}{1}$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

$$\frac{4\text{ N}}{6\text{ N}} = \frac{20\text{ cm}}{30\text{ cm}}$$

$$\frac{2}{3} = \frac{2}{3}$$

(5c) Vervollständige die Tabelle und stelle für zwei Beispiele die Kräfte und deren Kraftarme zeichnerisch dar:

F_1	F_2	l_2	l_1
50 N	10 N	1 m	...
20 N	60 N	10 cm	...
10 N	...	1 m	2 m
...	60 N	60 cm	20 cm

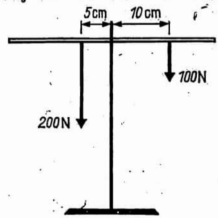
F_1	l_1	F_2	l_2
5 N	40 cm	20 N	...
100 N	...	20 N	25 cm
200 N	30 cm	...	10 cm
...	50 cm	100 N	5 cm

(5d) 1. Von einem Hebel ist nur der Teil in der Nähe des Drehpunktes zu sehen. Alle anderen Teile sind durch zwei Wände verdeckt. Nachdem an der Belastung des Hebels ein oder zwei nicht sichtbare Änderungen erfolgten, neigt sich der Hebel a) nach rechts, b) nach links oder c) er bleibt im Gleichgewicht. Welche Änderungen könnten in jedem der drei Fälle vorgenommen worden sein?

2. An dem nebenstehend gezeichneten Hebel wird jeweils eine der vier Größen verdoppelt.

a) Wie verändert sich dadurch das Gleichgewicht?

b) Wie kann durch Änderung einer anderen Größe das Gleichgewicht wieder hergestellt werden?



Erarbeiten einer Proportionalität. In besonders günstigen Fällen kann aus den Meßwerten ohne eine grafische Darstellung unmittelbar das Vorliegen einer Proportionalität erkannt werden. Das gilt immer dann, wenn die Messungen so durchgeführt werden können, daß die unabhängige physikalische Größe experimentell jeweils exakt verdoppelt, verdreifacht und vervierfacht werden kann. Das gilt zum Beispiel für die Proportionalitäten $Q \sim \Delta T$, $Q \sim m$, $R \sim l$, $R \sim 1/A$ und $I \sim U$. Ansonsten ist der Weg über die grafische Darstellung zu wählen. Aber auch in diesen einfachen Fällen sollte sich die grafische Darstellung der Meßwerte einschließlich einer ausführlichen Interpretation der Kurven dennoch aus Gründen der Übung und Festigung möglichst oft anschließen.

Wörtliches Formulieren des Gesetzes. (Vgl. Abschnitt 2.2.3.!)

Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen. (Vgl. Abschnitt 2.2.3.!)

3.3.4. Erarbeiten des Gesetzes durch grafisches Auswerten von Meßwerten

Nachdem die Messungen, wie im vorangegangenen Abschnitt dargelegt, vorbereitet und durchgeführt wurden, werden die Meßwerte grafisch ausgewertet.

Zeichnen der Kurve. Die einzelnen Meßwerte ergeben in der grafischen Darstellung verschiedene, voneinander isolierte Punkte. Durch diese läßt man eine Kurve hindurchgehen. Dabei ist man bestrebt, sich möglichst wenig von den Punkten zu entfernen und der Kurve dennoch eine regelmäßige Form zu geben, das heißt eine Form ohne Ecken, ohne zu starke Biegungen, ohne plötzliche Änderung der Krümmung (vgl. die Teile (3c) in den Tafeln 2.2./5 und 3.3./2). Dies sollte man den Schülern mit der Idee begründen, die der gesamten klassischen Physik zugrunde liegt: Die Natur macht keine Sprünge! Die so erhaltene Kurve stellt das physikalische Gesetz dar. Man nimmt nicht nur an, daß die Kurve diejenigen Werte angibt, die zwischen den gemessenen Werten liegen, sondern daß sie auch für die gemessenen Werte genauere Angaben liefert als die Messung selbst (vgl. Abschnitt 3.3.9.).

Erkennen einer Proportionalität. Aus der Kurve wird erkannt, ob zwischen den zwei physikalischen Größen eine Proportionalität vorliegt oder ob eine andere Abhängigkeit existiert. Je nach den Erfahrungen und dem Leistungs-

Tafel 3.3./2: Abstraktionsreihe zur Erarbeitung der Proportionalität $Q \sim \Delta T$ (bei m = konstant)

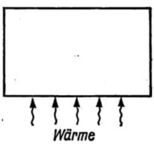
Wir beobachten und vergleichen.

(1a) Kochen von Speisen
Erhitzen von Wasser

(1b) Um die Temperatur verschiedener Körper zu erhöhen, muß man diese unterschiedlich lange erwärmen.

Wir vereinfachen.

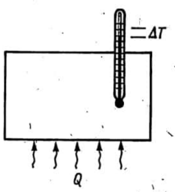
(2a)



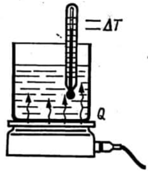
(2b) Zur Erhöhung der Temperatur von Körpern ist Wärme erforderlich. Diese hängt von der Masse des Körpers, der zu erreichenden Temperaturerhöhung und der Art des Stoffes ab, aus dem der Körper besteht.

Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz.

(3a) Einführen der Formelzeichen:

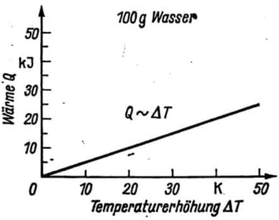


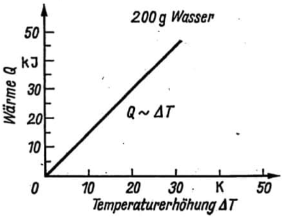
(3b) Meßanordnung und Meßtabelle:



Temperaturerhöhung ΔT in K	10	20	30	40
Betriebszeit t in s				
zugeführte Wärme Q in kJ				

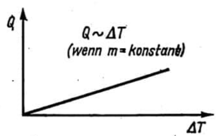
(3c) Grafische Darstellung und Auswertung:





Wir fassen zusammen.

(4) Die zur Temperaturerhöhung eines Körpers erforderliche Wärme Q ist der zu erreichenden Temperaturerhöhung ΔT proportional.
Das heißt:
Soll die Temperaturerhöhung doppelt so groß sein, so muß auch doppelt soviel Wärme zugeführt werden.



stand der Schüler wird das Vorliegen einer Proportionalität aus dem Verlauf der Kurve (mit anschließender Quotientenberechnung) oder durch die Diskussion einiger ausgewählter Wertepaare erarbeitet. Im letzteren Fall läßt man die Schüler aus der Kurve zunächst erkennen, ob der Zahlenwert der abhängigen physikalischen Größe in Abhängigkeit von der Änderung der unabhängigen Größe steigt oder fällt. Anschließend wird dies dann konkretisiert, indem die Schüler erkennen sollen, wie schnell der Zahlenwert der abhängigen physikalischen Größe in Abhängigkeit von der Änderung der unabhängigen physikalischen Größe steigt oder fällt. (Vgl. hierzu auch Abschnitt 3.3.6.!)

So stellen wir den Schülern zur grafischen Darstellung im Teil (3) von Tafel 3.3./2 Fragen wie: „Wieviel Wärme muß zugeführt werden, damit eine Temperaturerhöhung von 6 K erreicht wird?“, „Wie muß die Wärmezufuhr geändert werden, wenn eine größere Temperaturerhöhung erreicht werden soll?“ und „Wie groß muß die zugeführte Wärme sein, damit eine doppelt so große Temperaturerhöhung erreicht wird?“. Neben der Beantwortung mit konkreten Werten wird eine verallgemeinerte Formulierung erarbei-

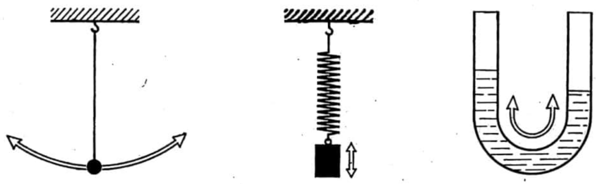
tet: Wenn die Temperaturerhöhung doppelt so groß sein soll, dann ist bei gleicher Masse auch eine doppelt so große Wärmezufuhr erforderlich. Die Frage wird für eine dreimal so große Temperaturerhöhung wiederholt.
Nunmehr wird die Umkehrung erarbeitet.
Hierzu dienen Fragen wie „Wieviel Wärme muß zugeführt werden, damit eine Temperaturerhöhung von 30 K erreicht wird?“, „Wieviel Wärme muß zugeführt werden, wenn die Temperaturerhöhung nur halb so groß sein soll?“. Diese Fragen werden wiederum sowohl konkret als auch in verallgemeinerter Formulierung beantwortet: Wenn die Temperaturerhöhung nur halb so groß sein soll, dann ist bei gleicher Masse auch nur eine halb so große Wärmezufuhr erforderlich.

Übergang zur Gleichung. Rein mathematisch kann von der Proportionalität $y \sim x$ zu der linearen Funktionsgleichung $y = k \cdot x$ übergegangen werden. Für den Physikunterricht in der allgemeinbildenden Schule halten wir diesen

Tafel 3.3./3: Abstraktionsreihe zur Erarbeitung der Gleichung für die harmonische Schwingung

Wir beobachten und vergleichen.

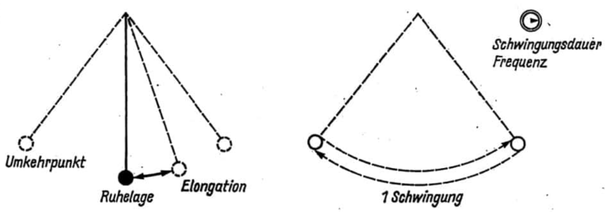
(1a)



(1b) Verschiedene Körper können in eine regelmäßige Bewegung versetzt werden.

Wir idealisieren.

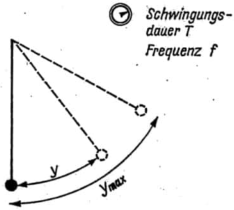
(2a)



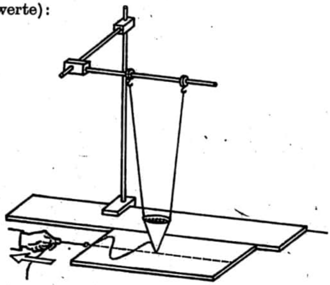
(2b) Wird ein schwingungsfähiger Körper durch Energiezufuhr aus seiner Ruhelage gebracht, so schwingt der Körper periodisch um seine Ruhelage.
Unter einer Schwingung versteht man einen vollständigen Hin- und Hergang des schwingenden Körpers.
Die für eine Schwingung erforderliche Zeit bezeichnet man als Schwingungsdauer.
Die Anzahl der in der Zeiteinheit ausgeführten Schwingungen wird als Frequenz der Schwingung bezeichnet. Die Elongation gibt an, wie weit zu einem bestimmten Zeitpunkt die Entfernung aus der Ruhelage ist.

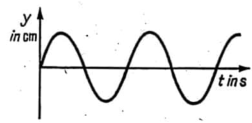
Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Meßanordnung (mit selbstschreibender graphischer Darstellung der Meßwerte):





(3c) Übergang zur Gleichung:

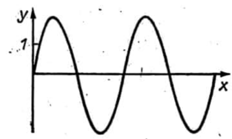
Die grafische Darstellung der Schwingung stellt das Bild einer Sinusfunktion dar, die in Richtung der y-Achse gedehnt (oder gestaucht) ist ($y = a \cdot \sin x$) und die gleichzeitig auch in Richtung der x-Achse gedehnt (oder gestaucht) ist ($y = \sin b \cdot x$).

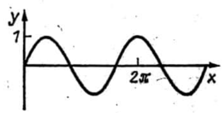
Zu der grafischen Darstellung der Schwingung gehört daher die Gleichung:

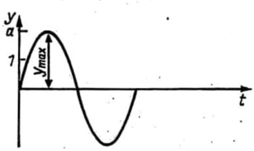
$y = a \cdot \sin b \cdot x$

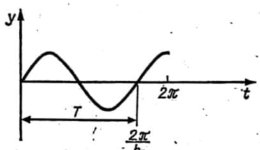
Deutung der Größen x, y, a und b:

$x \triangleq$ Zeit t $\quad y \triangleq$ Elongation









$a \triangleq$ maximale Schwingungsweite

$a \triangleq y_{\max}$

$\frac{2\pi}{b} \triangleq$ Schwingungsdauer T

d. h. $b \triangleq \frac{2\pi}{T}$

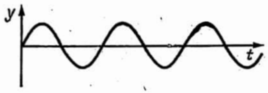
wegen $\frac{1}{T} = f$ gilt:

$b \triangleq 2\pi \cdot f$

Umformung der Gleichung für die Schwingung:
Setzt man für a und b die erhaltenen Werte ein, so erhält man
$y = y_{\max} \cdot \sin 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$

Wir fassen zusammen.

(4) Bei der harmonischen Schwingung kann man die Elongation des schwingenden Körpers für jeden Zeitpunkt nach der Gleichung ermitteln:



$y = y_{\max} \cdot \sin 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t$

Weg methodisch für erfolglos. Wenn man auf diesem mathematisch formalen Weg zum Beispiel die Größen elektrischer Widerstand und Masse einführt, um die Proportionalitäten $I \sim U$ und $a \sim F$ als Gleichungen schreiben zu können, wird es sehr schwer werden, den Schülern ein physikalisches Verständnis der Größen elektrischer Widerstand und Masse zu vermitteln. Hier ist es nach unserer Erfahrung besser, nach der Erarbeitung dieser Proportionalitäten die Größen elektrischer Widerstand und Masse entsprechend dem Vorgehen im Abschnitt 3.1.3. als selbständige physikalische Größen einzuführen. Hierbei werden die Proportionalitäten zur Aufstellung der Definitionsgleichungen genutzt. Diese Gleichungen stellen dann sowohl die Definitionsgleichung der neuen Größen als auch die Gleichung für die empirisch erarbeiteten Gesetze dar.

Die Erarbeitung des Grundgesetzes der Dynamik für die Rotation kann danach – in verkürzter Darstellung – wie folgt erfolgen:

– Problemstellung: Wird die mit einem Drehmoment erreichte Winkelbeschleunigung eines Körpers ebenso wie die mit einer Kraft erreichte Beschleunigung eines Körpers von einer Eigenschaft des beschleunigten Körpers abhängen?
– Empirische Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der Winkelbeschleunigung α und dem Drehmoment M_D an verschiedenen Körpern.
– Erkenntnisse: 1. Die Winkelbeschleunigung α ist zum Drehmoment M_D proportional. 2. Zur Erreichung der gleichen Winkelbeschleunigung sind bei verschiedenen Körpern unterschiedliche Drehmomente erforderlich. Das heißt: Die Körper sind gegenüber einer Winkelbeschleunigung unterschiedlich träge. Diese Eigenschaft bezeichnet man als Trägheitsmoment J.
– Ansatz zur Definition: Das Trägheitsmoment J wird durch das für eine Winkelbeschleunigung von $1\,s^{-2}$ erforderliche Drehmoment angegeben. Das heißt:

$$J = \frac{M_D}{\alpha}.$$

– Diese Gleichung stellt sowohl die Definitionsgleichung für das Trägheitsmoment als auch das Grundgesetz der Dynamik für die Rotation dar.

Den Übergang von der Kurve zur Gleichung empfehlen wir bei der Erarbeitung der Gleichung für die harmonische Schwingung. An Hand der verschiedenen in „Mathematik in Übersichten" dargestellten Typen der Sinusfunktion kann mit den Schülern erarbeitet werden, daß zur mathematischen Beschreibung des Weg-Zeit-Gesetzes einer beliebigen harmonischen Schwingung nur die Gleichung $y = a \cdot \sin bx$ geeignet ist. Durch einen Vergleich der mathematischen Variablen mit den physikalischen Größen wird die Gleichung für die harmonische Schwingung gefunden (vgl. Teil (3) in Tafel 3.3./3).

3.3.5. Erarbeiten der Gleichung durch Zusammenfassen zweier Proportionalitäten

Beispiele hierfür sind: die Erarbeitung der Gleichungen

$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$, $R = \varrho \cdot l/A$, $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T$ und

$F = I \cdot l \cdot B$.

Diese Gleichungen empfehlen wir, in drei Schritten zu erarbeiten, die wir an zwei Beispielen demonstrieren.

Gleichung zur Berechnung der Wärme

Empirisches Erarbeiten der zwei Proportionalitäten. Nach dem im Abschnitt 3.3.4. beschriebenen Vorgehen werden die Proportionalitäten $Q \sim \Delta T$ und $Q \sim m$ erarbeitet (vgl. Tafel 3.3./2).

Definition einer weiteren physikalischen Größe. Nach dem Vorgehen im Abschnitt 3.2. wird die physikalische Größe spezifische Wärmekapazität methodisch wie eine Basisgröße eingeführt. Die Meßvorschrift und die Einheit der Größe werden auf der Grundlage der zwei Proportionalitäten erarbeitet. Als Definition der spezifischen Wärmekapazität wird formuliert: „Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes gibt an, wieviel Wärme zur Temperaturerhöhung von 1 kg dieses Stoffes um 1 K nötig ist."

Erarbeiten der Gleichung durch logisches Schließen vom Einheitskörper auf einen beliebigen Körper. Hierzu eignet sich das inhaltliche Lösen einer Aufgabe wie der folgenden:

Aufgabe:

Welche Wärmezufuhr ist erforderlich, um die Temperatur von 10 kg Petroleum von 20 °C auf 50 °C zu erhöhen?

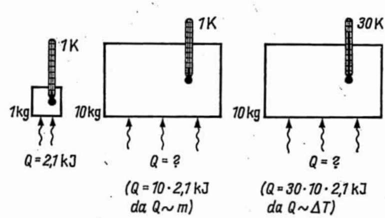
Analyse: Aus dem Tafelwerk wird entnommen:

Die spezifische Wärmekapazität von Petroleum ist $2{,}1\ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$.

Das heißt: Zur Erwärmung von 1 kg Petroleum um 1 K ist eine Wärme von 2,1 kJ erforderlich.

Lösung:

Anhand der nebenstehenden schematischen Darstellungen wird das Ergebnis gefunden:



Rechnet man das letzte Produkt aus, so erhält man: 630 kJ.
Ergebnis: Zur Erhöhung der Temperatur von 10 kg Petroleum um 30 K ist eine Wärmezufuhr von 630 kJ erforderlich.
Erarbeitung der Gleichung: Die Schüler werden aufgefordert, unter Nutzung des oben vollzogenen Lösungsweges anzugeben, welche Rechenoperation erforderlich ist,
a) wenn die Masse des Petroleums nicht 10 kg, sondern 20 kg beträgt,
b) wenn die Temperaturerhöhung nicht 30 K, sondern 50 K beträgt und
c) wenn statt Petroleum Wasser erwärmt werden soll.
Schließlich verallgemeinert man den Lösungsweg zur Gleichung $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ und formuliert die Zusammenfassung (vgl. Tafel 2.2./11).
Ein Nachteil der Erarbeitung der Gleichung nach diesem Weg ist es, daß bei der Lösung der Aufgabe mit Zahlen und nicht mit Größen gerechnet wird (z.B. 10 statt 10 kg). Dieser „Schönheitsfehler" wird aber durch das erreichbare inhaltliche Verständnis der Gleichung mehr als ausgeglichen.

Gleichung zur Berechnung der Kraft auf stromdurchflossene Leiter

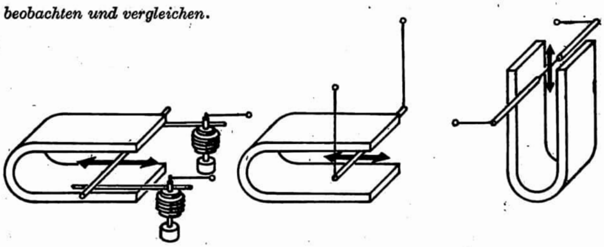
Empirisches Erarbeiten der zwei Proportionalitäten. (Vgl. Tafel 3.3./4!)

Definition einer weiteren physikalischen Größe. Als Definition der magnetischen Flußdichte B wird formuliert: „Die magnetische Flußdichte ist ein Maß für die Stärke des magnetischen Feldes. Die magnetische Flußdichte wird durch die auf einen 1 m langen Leiter bei einer Stromstärke von 1 A wirkende Kraft angegeben."
Auf die Festlegung einer Meßvorschrift und einer Einheit muß vorerst verzichtet werden.

Tafel 3.3./4: Abstraktionsreihe zur Erarbeitung der zwei Proportionalitäten $F \sim I$ und $F \sim l$

Wir beobachten und vergleichen.

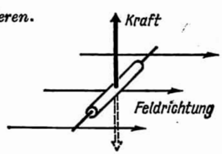
(1a)



(1b) In magnetischen Feldern wirken auf stromdurchflossene Leiter unterschiedliche Kräfte.

Wir idealisieren.

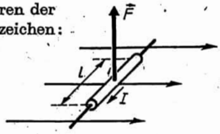
(2a)



(2b) Die in magnetischen Feldern auf stromdurchflossene Leiter wirkenden Kräfte sind von der Länge der Leiter, der Stromstärke im Leiter und von der Stärke der Magnetfelder abhängig.
Die Richtung der Kraft ist von der Richtung des Stromflusses und des Magnetfeldes abhängig.

Wir messen und suchen ein physikalisches Gesetz.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Meßanordnung und Meßtabelle:

I = konstant

l	F

l = konstant

I	F

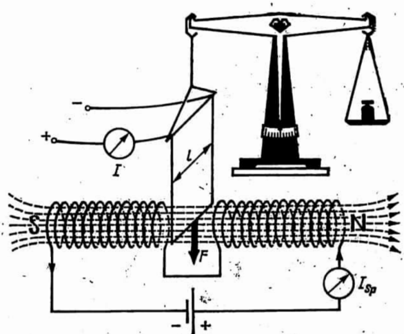
(3c) Führt man die Messung aus, so erhält man als Ergebnis:

$F \sim l$,

wenn I = konstant,

$F \sim I$,

wenn l = konstant.



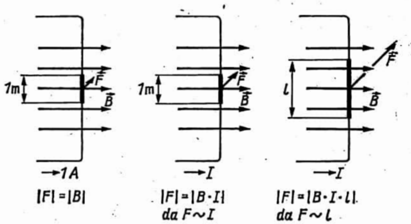
Für verschiedene Spulen und Erregerstromstärken des Magnetfeldes, d. h. für verschieden starke Magnetfelder, erhält man jeweils verschiedene Proportionalitätsfaktoren.

Erarbeiten der Gleichung durch logisches Schließen vom Einheitsleiter auf einen beliebigen Leiter. Hierzu eignet sich eine Aufgabe wie die folgende:

Aufgabe:

Die magnetische Flußdichte B eines Feldes sei bekannt. Wie kann die Kraft berechnet werden, die auf einen Leiter mit der Länge l wirkt, der von einem Strom der Stromstärke I durchflossen wird?

Analyse:
In einem magnetischen Feld mit der magnetischen Flußdichte B wirkt auf einen 1 m langen Leiter bei einer Stromstärke von 1 A eine Kraft, die zahlenmäßig gleich B ist.
Lösung:



Verallgemeinern zur Gleichung und Festlegen der Einheit von B.

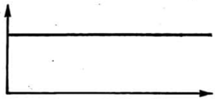
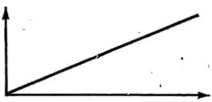
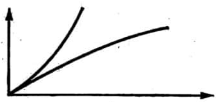
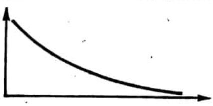
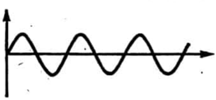
$F = B \cdot I \cdot l$ Einheit von B: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}}$

Anschließendes Erläutern einer mathematisch motivierten Einführung von B als Proportionalitätsfaktor. Um die Proportionalitäten $F \sim I$ und $F \sim l$ zu einer Gleichung zusammenfassen zu können, muß ein Proportionalitätsfaktor eingeführt werden: $F = k \cdot I \cdot l$. Dieser Faktor kann für die verschiedenen magnetischen Felder unterschiedlich groß sein.
Man nennt ihn in der Physik magnetische Flußdichte.

3.3.6. Physikalische Analyse der mathematischen Form einer Kurve

Innerhalb des Schrittes „Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Kurve an einigen einfachen Beispielen“ erfolgt auch eine physikalische Analyse der mathematischen Form der Kurve für ein Gesetz (vgl. Abschnitt 2.2.5.). Nach den mathematischen Formen der im Physikunterricht auftretenden Kurven können einige wenige Grundformen unterschieden werden. Diese Grundformen und deren physikalische Bedeutung sind zusammen mit einigen Beispielen in Übersicht 3.3./1 dargestellt.
Im Mittelpunkt der physikalischen Analyse der mathematischen Form einer Kurve steht die physikalische Analyse der linearen und der nichtlinearen Abschnitte, der Maxima, Minima, Wendepunkte und Nullstellen sowie der Periodizität oder der Grenzwerte der Kurve.
Für den Unterricht empfiehlt es sich, zu diesen Grundformen einen Foliensatz für den Tageslichtschreiber herzustellen. Die Achsen der Folien bleiben unbeschriftet. Die jeweiligen Größen werden von den Schülern dem jeweils betrachteten physikalischen Zusammenhang entsprechend ergänzt. Bei Systematisierungen erkennen die Schüler dann leichter gewisse Ähnlichkeiten, die in verschiedenen physikalischen Sachverhalten in gleicher Weise wiederkehren. In den oberen Klassen kann die physikalische Analyse der mathematischen Form einer Kurve auf der Grundlage der Kenntnisse der Schüler aus dem Mathematikunterricht und auf der Grundlage ihrer Erfahrungen aus dem Physikunterricht erfolgen. Hierzu dienen Fragen wie „Welchen Zusammenhang können wir zwischen der ... und der ... aus dem Ver-

Übersicht 3.3./1: Deutung der mathematischen Form von Kurven

Mathematische Form der Kurve	Physikalische Bedeutung dieser Form	Beispiele
	Konstanz einer Größe	gleichförmige Prozesse, Sättigungsbereiche, Sperrbereiche
	proportionale Vergrößerung zweier physikalischer Größen	$Q \sim \Delta T$ $I \sim U$ $a \sim F$ $\Delta l \sim \Delta T$
	nichtproportionales Wachstum einer Größe in Abhängigkeit von der Vergrößerung einer anderen Größe	I-U-Kennlinien, Temperaturabhängigkeit von Stoffkonstanten
	Abklingen eines Vorganges	Abkühlungskurven, Entladestrom, radioaktiver Zerfall
	periodischer Vorgang	harmonische Schwingung, Wechselspannung, I-U-Kennlinie für Schwingkreis
	Der Gesamtvorgang setzt sich aus mehreren, qualitativ unterschiedlichen physikalischen Teilvorgängen zusammen.	Anomalie des Wassers, Temperatur-Zeit-Diagramme, s-t- und v-t-Diagramme von zusammengesetzten Bewegungen, I-U-Kennlinien, Resonanzkurve

lauf der Kurve erkennen?“ oder „Welchem Funktionstyp entspricht die Kurve? Welcher Zusammenhang besteht demzufolge zwischen ... und ...?“.

Für die Anfangsklassen des Physikunterrichts empfehlen wir ein Vorgehen in folgenden Schritten:

— Bestimmen der allgemeinen Tendenz der Änderung der abhängigen Größe von einer Änderung der unabhängigen Größe.
— Untersuchen der Änderung der abhängigen Größe in Abhängigkeit vom Zuwachs der unabhängigen Größe.

Ausgehend von einem „runden“ Zahlenwert für die unabhängige Größe, werden die Fragen diskutiert: „Wie ändert sich die ... (abhängige Größe), wenn der Betrag der ... (unabhängigen Größe) verdoppelt oder verdreifacht wird?“ und „Wieviel mal so groß (klein) muß die ... (unabhängige Größe) werden, damit sich die ... (abhängige Größe) verdoppelt oder verdreifacht?“

— Untersuchen der Änderung der abhängigen Größe in Abhängigkeit von der Abnahme der unabhängigen Größe.

Ausgehend von einem relativ großen Zahlenwert für die unabhängige Größe, werden die Fragen diskutiert: „Wie ändert sich die ... (abhängige Größe), wenn der Betrag der ... (unabhängigen Größe) auf die Hälfte verkleinert wird?“ und „Auf wieviel ... (Einheit) muß die ... (unabhängige Größe) verkleinert (vergrößert) werden, damit die ... (abhängige Größe) nur noch halb so groß wie vorher ist?“ Bei der konkreten Formulierung der Fragestellungen und der Antworten ist auf eine korrekte Beachtung der Ursache-Wirkung-Beziehungen zwischen den Veränderungen der Größen zu achten.

— Formulieren der Abhängigkeit.

In einem Merksatz wird die physikalische Abhängigkeit meist als direkte oder indirekte Proportionalität formuliert. Dabei wird gewöhnlich die in der Natur und in der Technik am häufigsten als abhängig betrachtete Größe sowohl im Merksatz als auch in der mathematischen Darstellung zuerst genannt. In den Klassen 7 und 8 sollte dieser Merksatz noch in folgender Weise ergänzt werden: „Wenn die ... verdoppelt oder verdreifacht wird, dann wird ...“. In Klasse 6 muß der Merksatz solange auf diese letzte Formulierung beschränkt bleiben, bis im Mathematikunterricht der Proportionalitätsbegriff und das Proportionalitätszeichen eingeführt sind.

— Diskutieren der mathematischen Form der Kurve.

Nunmehr wird die Frage diskutiert: „Woran ist im Diagramm zu erkennen, daß die ... und die ... proportional (umgekehrt proportional) zueinander sind?“

— Vergleichen des Verlaufs zweier Kurven zu ein und demselben Gesetz.

Zur weiteren Vertiefung des Verständnisses des Gesetzes und der mathematischen Form der Kurve werden den Schülern zwei Kurven vorgegeben, die sich aus Messungen an zwei verschiedenen Objekten ergeben. Zu diesen Kurven werden Fragen gestellt wie: „Worin stimmen beide Kurven überein?“, „Worin unterscheiden sich die Kurven?“, „Wie können diese Unterschiede physikalisch erklärt werden?“

3.3.7. Physikalische Analyse der mathematischen Struktur einer Gleichung in den Anfangsklassen des Physikunterrichts

Innerhalb des Schrittes „Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung an einigen einfachen Beispielen“ erfolgt auch eine physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Gleichung für ein Gesetz (vgl. Abschnitt 2.2.5.). Da die empirische Erarbeitung von Gesetzen in den Anfangsklassen häufiger auftritt als in den oberen, beschränken wir uns hier auf die Durchführung der physikalischen Analyse der mathematischen Struktur einer Gleichung in den Anfangsklassen. (Das Vorgehen in den oberen Klassen, die über andere Voraussetzungen aus dem Mathematikunterricht verfügen, wird im Abschnitt 3.4.5. dargestellt.)

Im Unterricht der Klassen 6 bis 8 werden vorwiegend Gesetze behandelt, deren Gleichungen die Strukturen $a = a_1 + a_2$, $a_1 : a_2 = b_{1/2} : b_{2/1}$, $a = \frac{b}{c}$ oder $a = b \cdot c$ haben. Wir beschränken uns hier auf die letzten zwei Strukturen.

Für das Erkennen der in den Gleichungen $a = \frac{b}{c}$ bzw. $a = b \cdot c$ enthaltenen physikalischen Abhängigkeiten kann man in diesen Klassen zwei Wege wählen. Wir erläutern diese Wege am Beispiel des Ohmschen Gesetzes sowie an den Gleichungen zur Berechnung der elektrischen Leistung und der mechanischen Arbeit. (Hierbei ist es ohne Bedeutung, daß die letztgenannten Gleichungen theoretisch erarbeitet werden.)

Beispiel: Ohmsches Gesetz

Die praktisch wichtigste Formulierung des Ohmschen Gesetzes $I = U/R$ hat die Struktur $a = \frac{b}{c}$. An einer Nebentafel berechnet man mit den Schülern einige Quotienten, wie

$$\frac{10}{20} = 0{,}5 \qquad \frac{20}{20} = 1 \qquad \frac{40}{20} = 2 \qquad \frac{60}{20} = 3 \qquad \frac{100}{20} = 5\,.$$

Anhand dieser Beispiele wird die Abhängigkeit erarbeitet: „Der Wert a eines Quotienten $\frac{b}{c}$ wird bei konstantem Nenner c um so größer, je größer der Zähler b wird.“ Diese Abhängigkeit kann zunächst anschaulich durch Pfeile an den Variablen symbolisiert werden, bevor sie als Proportionalität geschrieben wird. (Vgl. Tafel 3.3./5! Hierbei sollte man den Schülern sagen, daß wir — um uns die Zusammenhänge noch deutlicher zu machen — einmal eine Schreibweise benutzen, die in der Mathematik nicht üblich ist.) Wenn die Schüler auf Grund ihres mathematischen Wissens diese Proportionalität bereits kennen, dienen die angegebenen Quotienten nur einer nochmaligen Verdeutlichung der Proportionalität. Bei der Formulierung der Proportionalität ist stets die als konstant angenommene Größe anzugeben. An der Haupttafel entsteht der linke obere Teil von Tafel 3.3./5. Hierbei sollten der Zähler und der Wert des Quotienten mit farbiger Kreide hervorgehoben werden. In entsprechender Weise berechnet man einige Quotienten, wie $200:10 = 20 \quad 200:20 = 10 \quad 200:40 = 5 \quad 200:50 = 4 \quad 200:100 = 2\,.$

Hieraus wird die Abhängigkeit erarbeitet: „Der Wert a eines Quotienten $\frac{b}{c}$ wird bei konstantem Zähler b um so kleiner, je größer der Nenner c wird.“ An der Haupttafel entsteht der rechte obere Teil von Tafel 3.3./5.

Bei diesem Weg untersucht man zunächst die Struktur der Gleichung $a = \frac{b}{c}$ und überträgt die Ergebnisse anschließend durch Analogiebetrachtungen auf das Ohmsche Gesetz. Das weitere Vorgehen ist aus Tafel 3.3./5 zu erkennen. Die erhaltenen Abhängigkeiten werden im Experiment demonstriert. Die Analogiebetrachtungen werden für die Schüler erleichtert, wenn auch bei den Gleichungen $a = \frac{b}{c}$ und $I = \frac{U}{R}$ entsprechende Variablen mit gleicher Farbe geschrieben werden. Diese Farben sollten auch bei der Beschriftung der Schaltpläne in Tafel 3.3./5 benutzt werden.

Beispiel: Elektrische Leistung

Die Gleichung zur Berechnung der elektrischen Leistung hat die Struktur $a = b \cdot c$. Man kann jetzt wieder sinngemäß den gleichen Weg wie im vorangegangenen Beispiel

Tafel 3.3./5: Physikalische Analyse der mathematischen Struktur einer Gleichung $a = \frac{b}{c}$

$$\boxed{a = \frac{b}{c}}$$

Für c = konstant gilt:

$$a = \frac{b}{\text{konstant}}$$

$$a\uparrow = \frac{b\uparrow}{\text{konstant}} \quad \text{und} \quad a\downarrow = \frac{b\downarrow}{\text{konstant}}$$

oder: $a \sim b$

Für b = konstant gilt:

$$a = \frac{\text{konstant}}{c}$$

$$a\downarrow = \frac{\text{konstant}}{c\uparrow} \quad \text{und}$$

$$a\uparrow = \frac{\text{konstant}}{c\downarrow}$$

oder $a \sim \frac{1}{c}$

Beispiel:

Ohmsches Gesetz $\boxed{I = \frac{U}{R}}$

Für R = konstant gilt:

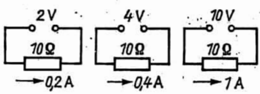
$I \sim U.$

Für U = konstant gilt:

$I \sim \frac{1}{R}$

Wir verdeutlichen uns diese Abhängigkeiten an Beispielen.

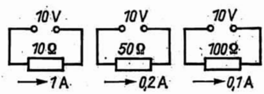
R = konstant



Für R = konstant gilt:

$I \sim U$

U = konstant



Für U = konstant gilt:

$I \sim \frac{1}{R}$

wählen. Man kann aber auch mit dem Lösen einer Aufgabe durch inhaltliches Berechnen beginnen. Das Erkennen der in der Gleichung enthaltenen Abhängigkeiten erfolgt dabei auf der Grundlage mehrerer Einzelberechnungen.

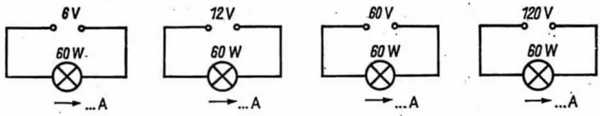
***Aufgabe*:**

Vier verschiedene Glühlampen werden mit verschiedenen Betriebsspannungen betrieben: 6 V, 12 V, 60 V und 120 V. Jede dieser Lampen hat eine elektrische Leistung von 60 W.

a) Wie groß ist jeweils die Stromstärke?

b) Welche Abhängigkeit besteht zwischen der elektrischen Leistung, der Spannung und der Stromstärke?

Analyse:



Lösung:
Für die elektrische Leistung gilt die Gleichung:
$P = U \cdot I$

P in W	U in V	I in A
60	6	...
60	12	...
60	60	...
60	120	...

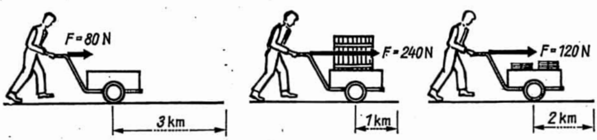
(Die Formelzeichen und die Werte werden in den Schaltplänen und in der Tabelle farbig angegeben.)

Ergebnis: Da die Lampen trotz der unterschiedlichen Spannungen gleiche elektrische Leistung haben, müssen die Stromstärken 10 A, 5 A, 1 A bzw. 0,5 A betragen.
Es folgt die weitere Auswertung: Spannung und Stromstärke sind in der Gleichung zur Berechnung der elektrischen Leistung in gleicher Weise enthalten. Bei der elektrischen Leistung kommt es daher nicht allein auf die Spannung und auch nicht allein auf die Stromstärke, sondern stets auf beide Größen an.
Die elektrische Leistung einer Lampe kann bei großer Spannung und kleiner Stromstärke genauso groß sein wie die einer anderen Lampe bei kleiner Spannung und großer Stromstärke.
Nunmehr wird erarbeitet, daß man diese Zusammenhänge auch mit Hilfe der Mathematik sofort aus der Struktur der Gleichung $a = b \cdot c$ hätte voraussagen können.

Beispiel: *Mechanische Arbeit*

Für eine Analyse der Gleichung $W = F \cdot s$ eignet sich folgende
Aufgabe:

Mit einem Fahrradanhänger werden verschiedene Mengen Altpapier und Flaschen transportiert.
Der Weg zur Sammelstelle ist ebenfalls unterschiedlich.



a) Berechne die jeweils verrichtete mechanische Arbeit!
b) Was erkennst du aus den Ergebnissen?

3.3.8. Einführen der Schüler in das Wesen eines Gesetzes

Im Zusammenhang mit der Benutzung des Begriffes Gesetz sind die Schüler schrittweise in das Wesen eines Gesetzes einzuführen. Mit dem Wort Gesetz kommen die Schüler im Physikunterricht spätestens beim Reflexionsgesetz in Klasse 6 in Berührung. An diesem Beispiel ist es auch möglich, den

Schülern den Unterschied zwischen einem von Menschen geschaffenen juristischen Gesetz und einem in der Natur wirkenden physikalischen Gesetz zu erläutern. Dabei wird man in dieser Klasse keinesfalls von „objektiv real existierenden Gesetzen" sprechen. Auch den Sinn der Worte „notwendiger, allgemeiner und wesentlicher Zusammenhang" können die Schüler noch nicht erfassen. Uns scheint es ausreichend, wenn die Schüler zum Beispiel beim *Reflexionsgesetz* auf folgende Merkmale aufmerksam gemacht werden:

- An allen Orten der Erde und an allen Tagen gilt für alle Vorgänge, bei denen Licht reflektiert wird, das Reflexionsgesetz. Und als Umkehrung formuliert: Es gibt keinen Reflexionsvorgang, bei dem dieses Gesetz nicht gilt.
- Die Vorgänge, bei denen Licht reflektiert wird, unterscheiden sich nach dem Material der reflektierenden Fläche, nach dem Einfallswinkel, nach der Farbe des benutzten Lichtes und dessen Stärke. Für alle Reflexionsvorgänge ist typisch und charakteristisch, daß der Einfallswinkel gleich dem Reflexionswinkel ist.
- Da dieser Zusammenhang für alle Vorgänge gilt, bei denen Licht reflektiert wird, wiederholt sich dieser Zusammenhang auch in der Zukunft immer wieder.
- Dieser Zusammenhang ist unabhängig vom Menschen. Der Mensch braucht die Einhaltung dieses Zusammenhangs nicht zu kontrollieren, und er kann diesen Zusammenhang auch nicht ändern, er kann ihn aber — nachdem er ihn erkannt hat — nutzen.

Bei der Behandlung der nachfolgenden Gesetze werden diese vier Merkmale immer wieder in den Mittelpunkt gestellt. Bei einem solchen Vorgehen wird der Lehrer für seine Klasse leicht entscheiden können, ab welchem Zeitpunkt statt „für alle" von „allgemein", statt „charakteristisch und typisch und wiederholt sich" von „notwendig und wesentlich" und statt „unabhängig vom Menschen" von „objektiv real" gesprochen wird.
Allmählich werden die Schüler auch darauf hingewiesen, daß die Gültigkeit eines Gesetzes an bestimmte Bedingungen geknüpft ist.
Bei der Erarbeitung eines Gesetzes ist den Schülern weiterhin bewußtzumachen, daß das Kriterium der Wahrheit allein die Praxis ist. Hierbei wird man gegenüber den Schülern der Klassen 6 bis 8 noch nicht den Begriff Praxis in den Vordergrund stellen. Es ist ausreichend und für die Schüler verständlich, jeweils die Bereiche der menschlichen Tätigkeit wie Technik, Medizin, Haushalt, das Basteln usw. konkret zu benennen. Insgesamt soll den Schülern bewußt werden, daß die Überprüfung der Wahrheit eines Gesetzes keine Frage der Anzahl der Experimente ist. Ein Gesetz ist wahr, wenn sich die auf seiner Grundlage konstruierten Maschinen und technischen Anlagen sowie das auf seiner Grundlage erfolgende Verhalten der Menschen bewähren.

3.3.9. Einführung in Fehlerbetrachtungen

Die empirische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen beruht auf der Messung von physikalischen Größen. Bei allen in der Physik als Wissenschaft und im Physikunterricht erhaltenen Meßwerten treten unvermeidliche Abweichungen von den wahren Werten auf. Das heißt: die Meßwerte für physikalische Größen sind grundsätzlich Näherungswerte. Obgleich es nicht die Aufgabe der allgemeinbildenden Schule sein kann, die Methoden der Fehlerrechnung zu behandeln, müssen die Schüler dennoch von Beginn des Phy-

sikunterrichts an in einfache Fehlerbetrachtungen eingeführt werden. Die Notwendigkeit hierzu ergibt sich aus den Fragen, die bei den Schülern bereits in den ersten Stunden des Physikunterrichts im Zusammenhang mit der Auswertung von Meßreihen zur grafischen Darstellung einer Proportionalität, mit der Aufstellung einer Gleichung aus Meßwerten oder im Zusammenhang mit den Abweichungen der Meßwerte einzelner Schülergruppen bei dem gleichen Experiment auftreten.
Im folgenden unterbreiten wir einen Vorschlag, wie die Schüler in die Fehlerbetrachtungen eingeführt werden können. Dabei gehen wir davon aus, daß diese Fehlerbetrachtungen in allen Klassenstufen zuerst an Demonstrationsexperimenten durchgeführt werden und nicht allein auf Schülerexperimente beschränkt werden.
In *Klasse 6* wird den Schülern von den ersten Messungen an bewußtgemacht, daß Meßwerte Näherungswerte sind, die von den wahren Werten abweichen. Hierbei empfiehlt es sich, den Begriff „Abweichung“ in den Mittelpunkt zu stellen und den Begriff „Fehler“ etwas zurückzustellen. Da die Schüler in diesem Alter den Begriff „Fehler“ noch zu sehr mit einem persönlichen Fehlverhalten (des Messenden oder des Herstellers von Meßgeräten) verbinden, könnten sie sonst nicht ausreichend erfassen, daß auch bei den sorgfältigsten Messungen mit sehr genauen Meßgeräten Abweichungen des Meßwertes vom wahren Wert unvermeidlich sind.
Möglichkeiten für solche Betrachtungen bieten sich bei der Behandlung der physikalischen Größen Volumen und Masse. Im Anschluß an die Entwicklung erster Größenvorstellungen zum Volumen und zur Masse von Körpern werden die Schüler jeweils aufgefordert, zu Hause die Volumen- bzw. die Massenangaben auf verschiedenen kosmetischen Artikeln und Haushaltchemikalien festzustellen. Solche Angaben wie 48 ml $\pm$ 1,5 ml, 100 ml $\pm$ 3 ml, 250 ml $\pm$ $\pm$ 6 ml oder 500 ml $\pm$ 15 ml bieten die Grundlage für eine erste Erörterung des Auftretens von Abweichungen des Meßwertes vom Sollwert. Diese Betrachtungen können anhand der Angaben der Fehlergrenzen auf Meßzylindern und der persönlichen Fehler beim Bestimmen des Volumens von Flüssigkeiten vertieft werden.
Entsprechende Betrachtungen sind bei der physikalischen Größe Masse möglich. Bei der Behandlung der Temperatur werden diese Fragen durch eine Diskussion der Angabe + 20 °C auf Meßzylindern und auf Stahlbandmaßen fortgesetzt.

Aus solchen Betrachtungen heraus wird es dann für die Schüler auch verständlich, daß man bei der Auswertung der Meßreihe zum Reflexionsgesetz trotz der Abweichungen einzelner Reflexionswinkel vom Einfallswinkel zu der Gleichung $\alpha = \alpha'$ übergehen kann. Hierbei sollte die Aufmerksamkeit der Schüler darauf gelenkt werden, daß diese Abweichungen nicht allein aus fehlerhaften Messungen des Reflexionswinkels, sondern auch aus einer fehlerhaften Einstellung des Einfallswinkels resultieren können.

In *Klasse 7* lernen die Schüler, konkrete Fehlerursachen genauer zu erkennen. Dabei unterscheiden sie bei den Abweichungen der Meßwerte von den wahren Werten zwischen Fehlern der Meßgeräte, Fehlern durch die Experimentieranordnung und persönlichen Fehlern.
Zum Erkennen des Fehlers der Meßgeräte kann eine Messung mehrmals nacheinander oder gleichzeitig mit verschiedenen Meßgeräten durchgeführt werden.

Hierzu kann bei den ersten Messungen mit dem Federkraftmesser zunächst in jeder Schülergruppe die Gewichtskraft eines bestimmten Hakenkörpers gemessen werden. Anschließend gibt jede Gruppe den Hakenkörper an die nächste Schülergruppe weiter und mißt die Gewichtskraft des neu erhaltenen gleichen Hakenkörpers. Dies kann mehrmals wiederholt werden. Im Ergebnis dieser Messungen wird für die Hakenkörper als Maßverkörperung der Masse der Begriff „Gerätefehler" eingeführt. Nunmehr behält jede Schülergruppe den bei ihr befindlichen Hakenkörper, dafür werden jetzt mehrmals die Federkraftmesser weitergegeben. Im Ergebnis dessen kann auch für die Federkraftmesser der Begriff „Gerätefehler" eingeführt werden.

Um bei den Schülern keine abwertende Haltung gegenüber den in der Schule verwendeten Meßgeräten aufkommen zu lassen, muß man ihnen bewußtmachen, daß auch die viel genaueren Meßgeräte in der Wissenschaft unvermeidliche Gerätefehler haben.
Das Erkennen von Fehlern durch die Experimentieranordnung erfolgt in engem Zusammenhang mit dem Untersuchen der Gültigkeitsbedingungen physikalischer Gesetze. Diese Fehlerbetrachtungen sind physikalisch besonders wichtig, durch sie kann bei den Schülern ein stereotypes Nennen von allgemeinen Fehlern vermieden werden. Gleichzeitig werden die Schüler bei der Anwendung eines physikalischen Gesetzes auf eine praktische Fragestellung dazu erzogen, stets eine Analyse durchzuführen, ob die Gültigkeitsbedingungen des physikalischen Gesetzes erfüllt sind.

Der Begriff „Fehler durch die Experimentieranordnung" kann nach der Behandlung der Reibungskraft bei der Untersuchung der Kraftübertragung an einer gut geölten und an einer schlecht geölten festen Rolle erarbeitet werden.

Zum Erkennen der persönlichen Fehler eignet sich eine Diskussion bekannter typischer Fehler der Schüler beim Umgang mit Meßgeräten und Experimentiergeräten.
In *Klasse 8* werden diese Fehlerbetrachtungen in anderen Stoffgebieten inhaltlich weiter vertieft.

In der Wärmelehre eignet sich hierzu insbesondere das Schülerexperiment zur Untersuchung der Energieübertragung beim Mischen von Flüssigkeiten. Die überwiegende Mehrzahl der Schülergruppen gießt hierbei das Wasser mit der höheren Anfangstemperatur in das Wasser mit der tieferen Anfangstemperatur. Diese Schülergruppen erhalten als Ergebnis:

$Q_{\text{abgegeben}} > Q_{\text{aufgenommen}}$.

Ein oder zwei Schülergruppen erhalten bei umgekehrtem Vorgehen jedoch das Ergebnis:

$Q_{\text{aufgenommen}} > Q_{\text{abgegeben}}$.

Im ersten Fall führt die Fehlerbetrachtung zu der Gleichung:

$$\underset{\substack{\text{vom heißen}\\ \text{Wasser}}}{Q_{\text{abgegeben}}} = \underset{\text{von Mischung}}{Q_{\text{aufgenommen}}} + \underset{\substack{\text{vom kalten}\\ \text{Gefäß}}}{Q_{\text{aufgenommen}}}$$

Im zweiten Fall erhält man:

$$\underset{\text{von Mischung}}{Q_{\text{aufgenommen}}} = \underset{\substack{\text{vom heißen}\\ \text{Wasser}}}{Q_{\text{abgegeben}}} + \underset{\substack{\text{vom heißen}\\ \text{Gefäß}}}{Q_{\text{abgegeben}}}$$

In der Elektrizitätslehre demonstriert man nach ersten Messungen zur Stromstärke den Gerätefehler der Meßgeräte. Dazu kann man im Demonstrationsexperiment mehrere Meßgeräte in Reihe schalten und die Meßwerte vergleichen. Hieraus wird später begründet, weshalb bei den folgenden Überprüfungen der Voraussagen zu den Gesetzen $I = I_1 = I_2$ und $I = I_1 + I_2$ die Messungen nacheinander mit demselben Meßgerät und nicht gleichzeitig mit mehreren Meßgeräten durchgeführt werden.

In Klasse 8 sollten die Schüler auch erstmals eine Information über die bei den benutzten Meßgeräten möglichen Abweichungen erhalten:
Thermometer mit 1/1°-Teilung:

Bereich von -5 °C bis $+60$ °C Abweichung: ± 2 K

Bereich über $+60$ °C bis $+110$ °C Abweichung: ± 3 K

Meßzylinder für 100 ml:

Abweichung: $\pm 0{,}5$ ml bis ± 1 ml über den gesamten Volumenbereich

Schüler-Vielfachmeßgerät Polytest 1:

Abweichung $\pm 2{,}5\%$ für Gleichstrom (bzw. $\pm 5\%$ für Wechselstrom) über die gesamte Skale.

In den *Klassen 9 und 10* wird im Unterrichtsgespräch bei der Planung einiger Demonstrationsexperimente auch die Frage diskutiert, wie die Experimentieranordnung gewählt werden sollte, damit die Fehler durch diese möglichst klein gehalten werden können. Bei einigen Demonstrations- und Schülerexperimenten sollen die Schüler auch die Tendenz erkennen, mit der der berechnete Wert für die experimentell zu bestimmende physikalische Größe infolge der verschiedenen Fehler durch die Experimentieranordnung vom wahren Wert abweichen wird. Hierzu kann auch das Lösen von Aufgaben dienen. (Beispiele hierfür sind die Aufgaben zur Beachtung der Gültigkeitsbedingungen von physikalischen Gesetzen im Abschnitt 3.6.1.) Es bleibt dem Lehrer vorbehalten, ob in diesen Klassen die Gerätefehler und die Fehler durch die Experimentieranordnung zu dem Begriff „systematischer Fehler“ zusammengefaßt werden.
Elemente der Fehlerrechnung sollten den *Klassen 11 und 12* vorbehalten bleiben. In den Anfangsklassen des Physikunterrichts kann man lediglich bei einigen Experimenten von der Mittelwertbildung Gebrauch machen. Bedingung für die Anwendbarkeit der Mittelwertbildung ist jedoch, daß der systematische Fehler gegenüber dem persönlichen Fehler sehr klein ist. Diese Bedingung ist nur bei bestimmten Experimenten erfüllt. Ein Beispiel hierfür ist eine Zeitmessung mittels einer Stoppuhr.

3.4. Theoretische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen und Zusammenhängen

„Doch habe ich keineswegs zur Ableitung eines Satzes jedesmal das kürzeste und eleganteste Verfahren aufgesucht, sondern stets dasjenige, welches mir gedanklich als das naheliegendste und durchsichtigste erscheint. Denn weder wie der Satz tatsächlich gefunden worden ist, noch wie er am direktesten nachträglich bewiesen werden kann, suchte ich darzustellen, sondern wie er am einfachsten hätte gefunden werden können.“

(M. Planck [1; S. VI])

3.4.1. Theoretisch erarbeitete Gesetze

Die theoretische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen erfolgt mit Hilfe von logischen und mathematischen Schlüssen aus Aussagen, Zusammenhängen oder Gesetzen, die als wahr vorausgesetzt werden dürfen und in der Physik im allgemeinen eine ganz überragende Bedeutung haben. Deshalb bedürfen die deduktiv abgeleiteten Erkenntnisse aus logischer Sicht keiner experimentellen Prüfung, diese sind im allgemeinen jedoch aus didaktischer Sicht nützlich. In den oberen Klassen sollte den Schülern aber bewußtgemacht werden, daß das abgeleitete Gesetz in dem Experiment nicht geprüft, sondern verdeutlicht werden soll. Anders verhält es sich, wenn die Ableitung einer neuen Aussage mit Hilfe von Analogieschlüssen erfolgt oder wenn sie von Modellvorstellungen ausgeht, ohne daß für die Schüler die Gültigkeitsgrenzen des Modells gesicherte Erkenntnisse darstellen.
Methodischer Ausgangspunkt für die theoretische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen im Unterricht sollte ebenso wie für die empirische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen möglichst eine Fragestellung sein, die aus theoretischen Erörterungen oder aus der Erfahrung entwickelt wird.

3.4.2. Vorschlag für die theoretische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen und Zusammenhängen

Für die theoretische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen und Zusammenhängen empfehlen wir ein Vorgehen in folgenden Schritten:

(0) *Wir wiederholen und üben.*

(1) *Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik.*
— Motivieren der Untersuchung des physikalischen Zusammenhanges,
— empirisches Einführen in den physikalischen Zusammenhang.

(2) *Wir vereinfachen/idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*
— Idealisieren des physikalischen Zusammenhanges,
— Mitteilen der Fachwörter für die physikalischen Idealisierungen.

(3) *Wir leiten aus gesichertem Wissen ein physikalisches Gesetz her.*
— Motivieren für die theoretische Erarbeitung,
— Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung,
— Finden eines Ansatzes,
— Erarbeiten der Gleichung bzw. der Kurve durch Umformen des Ansatzes mit Hilfe logischer und mathematischer Schlüsse,
— Interpretieren der in der Gleichung enthaltenen physikalischen Größen,
— wörtliches Formulieren des Gesetzes bzw. des Zusammenhanges,
— Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen des Gesetzes.

(4) *Wir fassen zusammen.*

(5) *Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung (bzw. der Kurve) an einigen einfachen Beispielen.*
— Erläutern des Inhalts der Gleichung in einer Konkretisierungsreihe,
— erstes Lösen von Aufgaben,

— Festigen des Wissens über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes,
— physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Gleichung bzw. der mathematischen Form der Kurve.

(6) *Wir können erklären und voraussagen.*

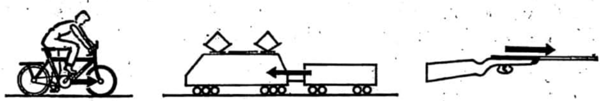
— Erklären und Vorausberechnen von physikalischen Vorgängen durch Lösen von qualitativen, funktionalen und quantitativen Aufgaben,
— Erklären des Wirkprinzips von technischen Anwendungen und Entwickeln von Ideen für technische Anwendungen,
— Erläutern der Bedeutung des Gesetzes für die Entwicklung von Physik und Technik sowie des wissenschaftlichen Weltbildes.

Falls es sich bei der theoretischen Erarbeitung einer Größengleichung nur um die Anpassung einer allgemeingültigen Gleichung an einen Sonderfall handelt, entfallen einige der angeführten Schritte.
Die Gestaltung der ersten zwei Schritte bei der theoretischen Erarbeitung von physikalischen Gesetzen ist in den Abschnitten 2.2.1. und 2.2.2. beschrieben. In den Tafeln 2.2./6 und 2.2./7 sowie in den Tafeln 3.4./1 bis 3 entstehen dabei die Teile (1a) bis (2b). Das allgemeine Vorgehen zum Schritt „Wir leiten aus gesichertem Wissen ein physikalisches Gesetz her“ ist im Abschnitt 2.2.3. dargestellt, so daß wir uns im folgenden auf das Spezifische dieses Schrittes bei der theoretischen Erarbeitung eines Gesetzes konzentrieren.

Tafel 3.4./1: Abstraktionsreihe und Konkretisierungsreihe zur Behandlung der kinetischen Energie

Wir beobachten und vergleichen.

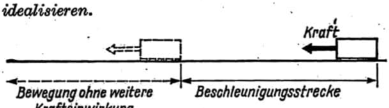
(1a)



(1b) Um einen Körper zu beschleunigen, ist eine Kraft in der entsprechenden Richtung erforderlich.

Wir idealisieren.

(2a)

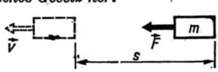


Annahme: Reibungskräfte und Luftwiderstand sind gegenüber der beschleunigenden Kraft vernachlässigbar klein.

(2b) Entlang der Beschleunigungsstrecke wird durch die Kraft am Körper eine Beschleunigungsarbeit verrichtet.

Wir leiten ein physikalisches Gesetz her.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Ansatz:

Der Betrag der kinetischen Energie eines bewegten Körpers	=	dem Betrag der am Körper aus der Ruhelage heraus verrichteten Beschleunigungsarbeit

(3c) Als Gleichung geschrieben:

$$E_{\text{kin}} = W_{\text{Beschleunigung}}$$

(3d) Umformungen

$$E_{\text{kin}} = F \cdot s \quad (1) \qquad F = m \cdot a \quad (2)$$

$$\text{(2) in (1)} \quad E_{\text{kin}} = m \cdot a \cdot s \quad (3) \qquad s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad (4)$$

$$\text{(4) in (3)} \quad E_{\text{kin}} = m \cdot a \cdot \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot a^2 \cdot t^2$$

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (a \cdot t)^2 \quad (5) \qquad v = a \cdot t \quad (6)$$

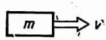
$$\text{(6) in (5)} \quad E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Wir fassen zusammen.

(4)

Der Betrag der kinetischen Energie eines Körpers ist gleich dem Betrag der an ihm verrichteten Beschleunigungsarbeit.
Die kinetische Energie wird nach der Gleichung berechnet:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$



Einheiten

(J) (kg) $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

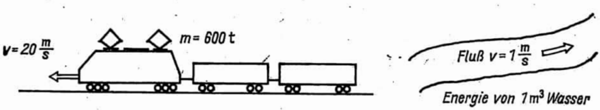
Umrechnen der Einheiten

$1\ \text{J} = 1\ \text{N} \cdot \text{m}$

$\left(1\ \text{N} = 1\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}\right)$

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung.

(5a/b)



$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$
$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot 600\,000\ \text{kg} \cdot \left(20\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$
$$E_{kin} = 300\,000 \cdot 400\ \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$
$$E_{kin} = 120\,000\,000\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}$$
$$E_{kin} = 120\,000\,000\ \text{N} \cdot \text{m}$$
$$E_{kin} = 120\ \text{MJ}$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$
$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot 1\,000\ \text{kg} \cdot \left(1\ \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$
$$E_{kin} = 500\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$$
$$E_{kin} = 500\ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}$$
$$E_{kin} = 500\ \text{N} \cdot \text{m}$$
$$E_{kin} = 500\ \text{J}$$

(5c/d)

1. Vervollständigen Sie die zwei Tabellen!

m	E_{kin}
4 t	E
8 t	... ($2E$)
12 t	... ($3E$)

(v = konstant)

v	E_{kin}
30 km/h	E
60 km/h	...
90 km/h	...

(m = konstant)

2. Wie ändert sich die kinetische Energie eines Körpers, wenn
   a) dessen Masse und
   b) dessen Geschwindigkeit
   verdoppelt oder verdreifacht werden?

3. Zusatzaufgabe für die Abiturstufe: Vervollständigen Sie die Tabelle, und begründen Sie die Werte!

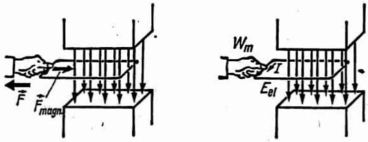
Fahrzeug	m (in t)	v (in km · h^{-1})	E_{kin}
PKW	1	30	E
LKW	8	90	...
Panzer	30	60	...

3.4.3. Erarbeiten der Gleichung (bzw. der Kurve)

Motivieren für die theoretische Erarbeitung. Hierfür gibt es „positive“ und „negative“ Motive. Zu den „negativen“ gehören: Das Gesetz kann prinzipiell nicht aus Messungen gewonnen werden, da für eine bestimmte physikalische Größe generell oder in der Schule kein Meßgerät existiert, die Durchführung bzw. die Auswertung der Messungen zuviel Zeit erfordern oder die Auswertung mathematisch zu schwierig ist. In der geometrischen Optik kann man davon ausgehen, daß es lästig ist, immer Konstruktionen zum Verlauf der Strahlen anzufertigen. Zu den „positiven“ Motiven gehören: Wir kennen gesicherte Gesetze bzw. bewährte Modelle, aus denen wir durch logische und mathematische Schlüsse neue Erkenntnisse ableiten können.

Wir leiten ein physikalisches Gesetz her.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Ansätze:

1) Energieerhaltungssatz:

elektrische Energie des Induktionsstromes	**=**	**mechanische Arbeit an Schleife**

2) Bedingung für konstante Geschwindigkeit der Schleife:

mechanische Kraft der Hand auf Schleife	**+**	**magnetische Kraft des Magnetfeldes auf strom durchflossene Schleife**	**= 0**

(3c) Als Gleichung geschrieben:

1) $E_{el} = W_m$

$U \cdot I \cdot \Delta t = F \cdot s$ (1)

2) $F + F_{magn.} = 0$

$F + I \cdot l \cdot B = 0$

$F = - I \cdot l \cdot B$ (2)

(3d) Umformungen:

(2) in (1) $U \cdot I \cdot \Delta t = - I \cdot l \cdot B \cdot s$ (3)

$s = v \cdot \Delta t$ (*)

(*) in (3) $U \cdot I \cdot \Delta t = - I \cdot l \cdot B \cdot v \cdot \Delta t$

(Division durch I) $U \cdot \Delta t = - l \cdot B \cdot v \cdot \Delta t$ (4)

$\Delta\Phi = B \cdot \Delta A$

$\Delta\Phi = B \cdot \Delta(l \cdot s)$

$\Delta\Phi = B \cdot \Delta(l \cdot v \cdot t)$

$\Delta\Phi = B \cdot l \cdot v \cdot \Delta t$ (**)

(da l und v konstant)

(**) in (4) $U \cdot \Delta t = - \Delta\Phi$

$$U = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

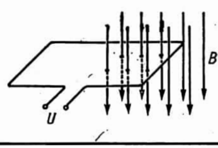
Wir fassen zusammen.

(4)

Jede Änderung des magnetischen Flusses Φ durch eine von einer Leiterschleife begrenzte Fläche erzeugt in dieser eine Induktionsspannung U. Betrag und Richtung der Induktionsspannung hängen von der Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses und von der Richtung der Änderung ab.

Für die Induktionsspannung gilt:

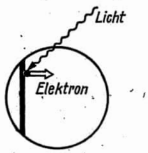
$$U = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta(B \cdot A)}{\Delta t}$$



Tafel 3.4./3: Abstraktionsreihe zur Herleitung einer Gleichung zur Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums

Wir wissen.

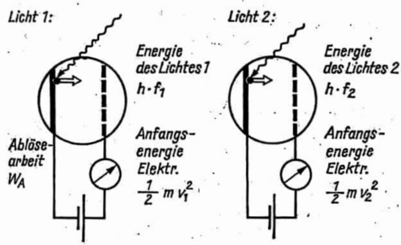
(2a)



(2b) Bei der Bestrahlung einer Photozelle mit Licht werden Elektronen aus dem Metall herausgelöst. Verwendet man nacheinander verschiedenfarbiges Licht, so ist die Energie der herausgelösten Elektronen verschieden.

Wir leiten einen physikalischen Zusammenhang her.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b/c) Ansätze:

1) Die Einsteinsche Gleichung $h \cdot f = W_A + \frac{1}{2} m \cdot v^2$ heißt

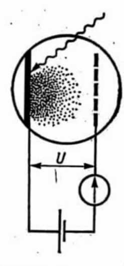
für Licht der Frequenz f_1:

(*) $h \cdot f_1 = W_A + \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$

für Licht der Frequenz f_2:

$h \cdot f_2 = W_A + \frac{1}{2} m \cdot v_2^2$

2) Umpolung der Spannungsquelle und Erhöhung der Gegenspannung bis zu einer vollständigen Abbremsung der Elektronen:



Abbremsarbeit des Gegenfeldes = Anfangsenergie der Elektronen

$e \cdot U = \frac{1}{2} m \cdot v^2$

für Licht der Frequenz f_1:

(**) $e \cdot U_1 = \frac{1}{2} m \cdot v_1^2$

für Licht der Frequenz f_2:

$e \cdot U_2 = \frac{1}{2} m \cdot v_2^2$

3) Einsteinsche Gleichung für Sonderfall der vollständigen Abbremsung der Elektronen:

für Licht der Frequenz f_1: | für Licht der Frequenz f_2:

(**) in (*) $h \cdot f_1 = W_A + e \cdot U_1$ | $h \cdot f_2 = W_A + e \cdot U_2$

4) Es wird die gleiche Photozelle benutzt. Daher ist die Ablösearbeit für ein Elektron in beiden Versuchen gleich.

W_A für Frequenz f_1 = W_A für Frequenz f_2

oder

(***) $h \cdot f_1 - e \cdot U_1 = h \cdot f_2 - e \cdot U_2$

(3d) Umformungen:

In Gleichung (***) sind außer der Größe h alle anderen bekannt oder meßbar.

Umstellung von (***) $h \cdot f_1 - h \cdot f_2 = e \cdot U_1 - e \cdot U_2$

Auflösung nach h $h(f_1 - f_2) = e(U_1 - U_2)$

$$h = e \cdot \frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2}$$

Wir fassen zusammen.

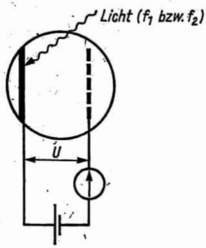
(4)

Das Plancksche Wirkungsquantum h kann experimentell nach der Gleichung bestimmt werden:

$$h = e\,\frac{U_1 - U_2}{f_1 - f_2}$$

Darin bedeuten:

e die Elementarladung des Elektrons,
U_1 und U_2 die Gegenspannungen für eine vollständige Abbremsung der Elektronen bei den zwei Lichtfarben,
f_1 und f_2 die Frequenzen der zwei Lichtfarben.



Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung. (Vgl. die Teile (3a) in den Tafeln 2.2./6 und 2.2./7 sowie in den Tafeln 3.4./1 bis 3!)

Finden eines Ansatzes. Das Finden eines Ansatzes für die Deduktion gehört in der Physik als Wissenschaft stets zu den größten schöpferischen Leistungen. Diese Ansätze werden im Unterricht von der Mehrzahl der Schüler nicht spontan in wenigen Sekunden gefunden. Ausgehend von der Idealisierung des physikalischen Zusammenhanges und ausgehend von der „positiven" Motivierung für die Deduktion, sollte der Lehrer entscheidende Impulse für die Richtung des Ansatzes vorgeben. Der eigentliche Ansatz wird dann vermut-

lich von einigen Schülern gefunden werden. Auch das stellt durchaus noch eine schöpferische Leistung dar.
Dieser Ansatz wird zunächst als Wortgleichung geschrieben und den Schülern durch den Zusatz „Ansatz“ als solcher bewußtgemacht (vgl. die Teile (3b) in den Tafeln).
Anschließend wird der theoretische Ansatz unter dem Zusatz „als Gleichung geschrieben“ in eine Größengleichung übersetzt. Es entstehen die Teile (3c) in den Tafeln. Wenn mehrere Ansätze notwendig sind, empfiehlt sich eine Numerierung der Ansätze. (Vgl. die Tafeln 2.2./6, 3.4./2 und 3.4./3!)

Erarbeiten der Gleichung durch Umformen des Ansatzes mit Hilfe logischer und mathematischer Schlüsse. Unter dem Zusatz „Umformungen“ werden mit dieser Gleichung verschiedene mathematische und logische Operationen durchgeführt (vgl. die Teile (3d) in den Tafeln). Für die Verständlichkeit dieser Umformungen ist es wichtig, daß die Abfolge der Umformungen gekennzeichnet wird und daß nur solche Operationen angewendet werden, die den Schülern physikalisch-inhaltlich als Substitution oder mathematisch als eine offensichtliche Vereinfachung der Gleichung begründet werden können. Mathematische Operationen, die die Schüler nicht kennen, dürfen nicht benutzt werden. Hierzu gehören zum Beispiel die Reihenentwicklung nach Taylor, das Rechnen mit Differentialen, das Subtrahieren zweier Gleichungen voneinander oder das Dividieren zweier Gleichungen durcheinander. Solche Umformungen tragen nicht dazu bei, die Herleitungen für die Schüler durchsichtig zu machen. Sie fördern nicht die Entwicklung physikalischer Vorstellungen und Ideen. Um ein Verständnis der Umformungen zu erreichen, muß man bei der Begründung von Substitutionen oder bei der Gleichsetzung von Termen physikalisch und nicht mathematisch argumentieren.
In einigen einfachen Fällen sind keine mathematischen Umformungen erforderlich. Das gilt zum Beispiel dann, wenn die Übersetzung des theoretischen Ansatzes in eine Größengleichung bereits die endgültige Gleichung darstellt (vgl. Tafel 2.2./7).

Interpretieren der in der Gleichung enthaltenen Größen. Es wird festgestellt, welche Größen in die Größengleichung eingehen, welche dieser Größen Veränderliche und welche Konstanten sind. Weiterhin wird durch den Lehrer auf einige Größen aufmerksam gemacht, die nicht in der Größengleichung enthalten sind und die demzufolge den in der Gleichung erfaßten Zusammenhang nicht beeinflussen.

Die Interpretation der in der Gleichung zur Berechnung der *kinetischen Energie* enthaltenen Größen beinhaltet folgende Aussagen:

— Die kinetische Energie eines Körpers ist von dessen Masse m und von dessen Geschwindigkeit v abhängig.
— Die Masse m ist im allgemeinen für einen Körper eine Konstante, die Geschwindigkeit v hingegen ist eine Veränderliche.
— In der Gleichung kommen die Größen F, s, t und a nicht vor. Das heißt: Die kinetische Energie eines Körpers ist von den Einzelheiten seiner Vorgeschichte unabhängig. Sie ist unabhängig davon, wie lange sich der Körper schon bewegt, welchen Weg er schon zurückgelegt hat, mit welcher Kraft und wie schnell er auf die gegenwärtige Geschwindigkeit beschleunigt wurde. Die kinetische Energie kennzeichnet allein den gegenwärtigen Zustand des Körpers.

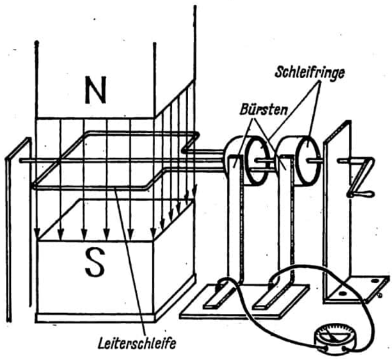
Erarbeiten einer Kurve. Das Vorgehen hierbei erläutern wir am Beispiel der Kurve für die *Erzeugung einer Induktionsspannung* (vgl. Tafel 3.4./4).

Aus dem Induktionsgesetz werden die Zeitpunkte für Maxima, Minima und Nullwerte der sich verändernden Größen bestimmt. Mit Hilfe einer willkürlichen Festlegung der Maxima und Minima können im Koordinatensystem für die ausgewählten Zeitpunkte relative Funktionswerte eingetragen werden, die anschließend wie bei der empirischen Erarbeitung von Gesetzen zu einer geschlossenen Kurve verbunden werden. Die schematischen Darstellungen der idealisierten Vorgänge und die Darstellung der Kurve im Koordinatensystem erfolgen so, daß gleiche Zeitpunkte übereinanderliegen.

Tafel 3.4./4: Abstraktionsreihe zur Erzeugung einer Wechselspannung

Wir wissen.

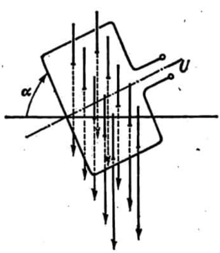
(2a)



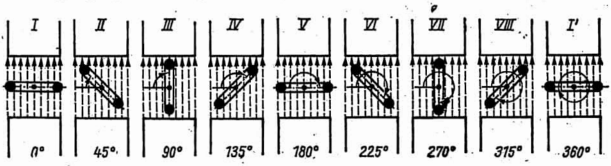
(2b) In einer Induktionsschleife wird eine Spannung induziert, wenn sich die Stärke des von der Schleife umschlossenen Magnetfeldes ändert.
Die Induktionsspannung ist um so größer, je stärker das Magnetfeld ist und je schneller sich das von der Schleife umfaßte Magnetfeld ändert.

Wir leiten ein physikalisches Gesetz her.

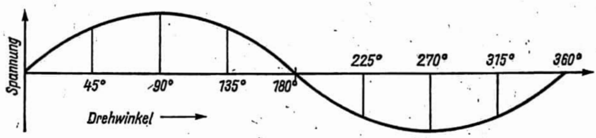
(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) **Ansatz:**
Wir untersuchen, wie schnell sich das die Schleife durchsetzende Magnetfeld bei verschiedenen Drehwinkeln der Schleife ändert. Wir schließen daraus auf die Größenordnung der induzierten Spannung.
Bedingung: gleichförmige Drehung



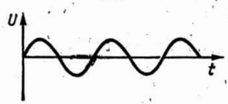
(3c) Grafische Darstellung:



Wir fassen zusammen.

(4)

Beim gleichförmigen Drehen einer Leiterschleife in einem konstanten Magnetfeld wird eine Wechselspannung induziert.



3.4.4. Beispiele zum Finden und Aufstellen des Ansatzes

Für das Verständnis der theoretischen Erarbeitung einer Gleichung ist es wichtig, daß die Schüler erkennen können, wie der Ansatz dafür aus einer physikalischen Analyse des Sachverhaltes gefunden werden kann.

Ansätze aus physikalischen Gesetzen. Für eine solche Analyse stellt der Lehrer zunächst die Frage: „Um welchen Vorgang handelt es sich hier?“ Dazu nennt der Lehrer eine Auswahl von Vorgängen, wie

— Umwandlung und Übertragung von Energie (mit bzw. ohne Wechsel der Energieform),
— gleichförmige Bewegung eines Körpers,
— Änderung der mechanischen Bewegung zweier Körper (ohne Aufhören der Bewegung),
— Interferenz von Wellen.

Hieran anschließend wird die Frage gestellt: „Welche Gesetze gelten für einen solchen Vorgang?“ Wiederum wird eine Auswahl von Gesetzen genannt, die für diesen Vorgang gelten bzw. nicht gelten. Die Schüler wählen

unter Angabe einer Begründung die gültigen Gesetze aus. Hieran schließt sich dann das bereits angeführte Aufschreiben des Ansatzes in einer Wortgleichung bzw. bei zwei Ansätzen in zwei Wortgleichungen an. Dieses Vorgehen gilt sinngemäß auch dann, wenn es sich bei der theoretischen Erarbeitung einer Gleichung nur um die Anpassung einer allgemeinen Gleichung an einen Sonderfall handelt.
Im allgemeinen gibt es für die theoretische Herleitung einer Gleichung aus Gesetzen meist mehrere Ansätze. Aus diesen sollte ein Ansatz ausgewählt werden, mit dem bei den Schülern grundlegende physikalische Erkenntnisse und Vorstellungen vertieft werden können. Die Auswahl sollte sich hingegen nicht nach der „mathematischen Eleganz" der Deduktion richten, die ein bestimmter Ansatz ermöglicht. Hierzu stellte Einstein fest: „. . . ich hielt mich gewissenhaft an die Vorschrift des genialen Theoretikers L. Boltzmann, man solle die Eleganz Sache der Schneider und Schuster sein lassen." [11; S. 3f.]
Im folgenden führen wir einige *Beispiele zum Finden des Ansatzes* an, wie sie im Unterricht häufig vorkommen:

Ansätze zur Ableitung von Gesetzen für Vorgänge, die mit einer Umwandlung und Übertragung von Energie verbunden sind.
Gesetze: Energieerhaltungssatz (in verschiedenen Formulierungen), Gleichungen zur Berechnung von Energien und von Prozeßgrößen (wie mechanische Arbeit, elektrische Arbeit und Wärme).
Fragen für den Ansatz: „Welche Energiebilanz kann aufgestellt werden?" „Wo erfolgt eine Energieabgabe, und wo erfolgt eine Energieaufnahme?" „In welcher Energieform wird die verrichtete Arbeit gespeichert?" oder „Welche Arbeit kann mit der vorhandenen Energie verrichtet werden?"
Ansatz:
Eine dem jeweiligen Vorgang angepaßte Formulierung des Energieerhaltungssatzes.

Beispiele:

a) Gleichung für die Fallgeschwindigkeit eines Körpers:

kinetische Energie in einem Punkt = potentielle Energie im Ausgangspunkt gegenüber diesem Punkt

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}}$$

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$$

b) Stromstärkeübersetzung am idealen Transformator:

Energieaufnahme in Primärspule = Energieabgabe aus Sekundärspule

$$E_{\text{el Spule 1}} = E_{\text{el Spule 2}}$$

$$U_1 \cdot I_1 \cdot t = U_2 \cdot I_2 \cdot t$$

c) Gleichung für die Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität eines festen Körpers unter Berücksichtigung der Wärmekapazität des Kalorimeters:

Wärmeabgabe heißer Körper	= Wärmaaufnahme kaltes Wasser	+	Wärmeaufnahme kaltes Kalorimeter
$Q_{\text{Körper}}$	$= Q_{\text{Wasser}}$		$+ Q_{\text{Kalorimeter}}$

$$m_K \cdot c_K \cdot (T_K - T_m) = m_w \cdot c_w \cdot (T_m - T_w) + w \cdot c_w (T_m - T_w)$$
$$= (m_w + w)\, c_w \cdot (T_m - T_w)$$

d) Einsteinsche Gleichung für den äußeren lichtelektrischen Effekt:

Energie Lichtquant	= Ablösearbeit des Elektrons	+	kinetische Energie des Elektrons
$E_{\text{Lichtquant}}$	$= W_A$		$+ E_{\text{kin}}$
$h \cdot f$	$= W_A$		$+ \frac{1}{2} m \cdot v^2$

Ansätze zur Ableitung von Gesetzen aus der gleichförmigen Bewegung eines Körpers

Gesetze: Energieerhaltungssatz, Gleichungen zur Berechnung von Energien und von mechanischen Arbeiten.

Bedingungen für geradlinige Bewegung:

a) $\sum F = 0$
b) Es muß eine beschleunigende Kraft oder ein Kraftstoß gewirkt haben.

Bedingung für Kreisbewegung:

Es muß eine Zentralkraft wirken.

Fragen für den Ansatz: „Welche mechanische Arbeit führte (von einer bestimmten Anfangsenergie des Körpers) zu der Energie des Körpers in diesem Zustand?“ „Welche Kräfte halten sich das Gleichgewicht?“ „Wie groß war der Kraftstoß?“ „Welche Kraft wirkt als Zentralkraft?“

Ansätze:

1) Ansatz zum Energieerhaltungssatz
2) Ansatz zu den Kräften

Beispiele:

a) Bestimmen der spezifischen Ladung eines Elektrons:

1) Energieerhaltungssatz:

Beschleunigungsarbeit (Feld)	= kinetische Energie (Elektron)
$W_{\text{beschl.}}$	$= E_{\text{kin}}$
$e \cdot U$	$= \frac{1}{2} m \cdot v^2$

2) Bedingung: Vorhandensein einer Zentralkraft, Lorentzkraft wirkt als Zentralkraft

$$F_L = F_z$$
$$e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

b) Induktionsgesetz (s. Tafel 3.4./2)

c) Gleichung zur Berechnung der kinetischen Energie (s. Tafel 3.4./1).

Ansätze zur Ableitung von Gesetzen für Interferenzvorgänge bei Wellen

Gesetze: Gangunterschied für Verstärkung $= n \cdot \lambda \; (n = 1, 2 \ldots)$,

Gangunterschied für Auslöschung $= (2n + 1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1, 2 \ldots)$,

Phasensprung von $\frac{\lambda}{2}$ bei Reflexion am optisch dichteren Medium.

Fragen für den Ansatz: „Welche Bedingungen gelten für den Gangunterschied zweier Wellen bei ihrer Verstärkung bzw. bei ihrer Auslöschung?“ „Unter welchen Bedingungen erfolgt ein Phasensprung?“

Ansätze:

1) Verstärkung:

zusätzlicher Lichtweg der 2. Welle gegenüber der 1. Welle	+	eventueller Phasensprung	$= n \cdot \lambda$

2) Auslöschung:

zusätzlicher Lichtweg der 2. Welle gegenüber der 1. Welle	+	eventueller Phasensprung	$= (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$

Beispiele:

Interferenz an dünnen Schichten:

a) Verstärkung:

zusätzlicher Lichtweg durch dünne Schicht (hin und zurück)	+	Phasensprung der 2. Welle bei Reflexion	$= n \cdot \lambda$
$2d$	+	$\frac{\lambda}{2}$	$= n \cdot \lambda$

b) Auslöschung:

$$2d + \frac{\lambda}{2} = (2n + 1)\frac{\lambda}{2}$$

Anpassung einer Gleichung an einen Sonderfall

Fragen für den Ansatz: „Wie ist in der Physik die ... (Größe) definiert?“ „Nach welchem Gesetz kann ... berechnet werden?“ „Welche vereinfachende Bedingung tritt hier gegenüber dem allgemeinen Fall auf?“

Ansatz:

Allgemeines Gesetz, allgemeine Definition,
Einführung der besonderen Begriffe, Formelzeichen oder Gleichungen bzw. der vereinfachenden Bedingungen in die allgemeine Gleichung

Beispiele:

a) Gewichtskraft:

allgemeines Gesetz:
$F = m \cdot a$

besondere Begriffe und Formelzeichen: Gewichtskraft G, Fallbeschleunigung g

$$G = m \cdot g$$

b) Fallgesetze:

allgemeines Gesetz: $v = a \cdot t$

besondere Begriffe und Formelzeichen: Fallbeschleunigung g

$$v = g \cdot t$$

allgemeines Gesetz: $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$

besondere Begriffe und Formelzeichen: Fallbeschleunigung g, Fallhöhe h

$$h = \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

c) Grundgleichung der Wellenlehre:

allgemeine Gleichung: $v = \frac{s}{t}$

besondere Begriffe und Formelzeichen: Wellenlänge λ, Frequenz f

$$v = \frac{\lambda}{\frac{1}{f}}$$

Ansätze aus Modellen

Bei der theoretischen Erarbeitung von Gleichungen aus Modellen treten an die Stelle von Gesetzen bestimmte Modellvorstellungen, zu denen für den Ansatz entsprechende Fragen gestellt werden.

Ansätze aus Analogiebetrachtungen

Beispiele:

a) *Elektrische Leistung*

Bei der theoretischen Herleitung der Gleichung für die elektrische Leistung wird in Analogie zu den Definitionsgleichungen der mechanischen Leistung und der thermischen Leistung der Ansatz zur Definition der elektrischen Leistung gefunden.

Es gilt: $P_{\mathrm{mech}} = \frac{W_{\mathrm{mech}}}{t}$

Es gilt: $P_{\mathrm{therm}} = \frac{Q}{t}$

Wir definieren: $P_{\mathrm{el}} = \frac{W_{\mathrm{el}}}{t}$

b) *Weg-Zeit-Gesetz der geradlinig gleichmäßig beschleunigten Bewegung*

Die Erarbeitung dieses Gesetzes mit Hilfe von Analogiebetrachtungen ist durch folgende Teilschritte charakterisiert:

- Motivieren für die Untersuchung des Zusammenhanges,
- Beobachten und Vergleichen einiger Wege im Demonstrationsexperiment,
- Idealisieren der Vorgänge,
- Motivieren für die theoretische Erarbeitung:
  Diskutieren des prinzipiellen Vorgehens, wenn man das Gesetz empirisch erarbeiten wollte,

Mitteilen, daß die Messungen viel Zeit erfordern und daß die mathematische Auswertung der Meßwerte schwierig würde,
- Finden eines Ansatzes zur theoretischen Erarbeitung (Mitteilen, daß bei der geradlinig gleichförmigen Bewegung der Weg aus dem v-t-Diagramm berechnet werden kann; Entwickeln der Idee, diese Methode auf das v-t-Diagramm der gleichmäßig beschleunigten Bewegung zu übertragen),
- Erarbeiten der Gleichung durch Berechnung der Dreiecksfläche,
- Erstes Interpretieren der Gleichung,
- Prüfen der Gleichung an einigen aufzunehmenden Meßwerten.

Geometrische Ansätze. Bei den theoretischen Herleitungen in der Geometrischen Optik können keine physikalischen Ansätze aufgestellt werden. An deren Stelle treten geometrische Ansätze (vgl. Tafel 2.2./6).

3.4.5. Physikalische Analyse der mathematischen Struktur einer Gleichung in oberen Klassen

Innerhalb des Abschnittes „Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung an einigen einfachen Beispielen" erfolgt eine physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Gleichung (vgl. Abschnitt 2.2.5.). Das Vorgehen hierbei ist für die Anfangsklassen im Abschnitt 3.3.7. dargelegt. In den oberen Klassen bestehen hierfür jedoch auf Grund des umfangreicheren Wissens der Schüler aus dem Mathematikunterricht über Potenzfunktionen und auf Grund der Erfahrungen der Schüler aus dem vorangegangenen Physikunterricht wesentlich andere Ausgangsbedingungen. Davon ist bei der physikalischen Analyse der mathematischen Struktur der Gleichungen in den oberen Klassen auszugehen. Nach der mathematischen Struktur der in der Schule erarbeiteten Gleichungen können wenige Grundformen unterschieden werden. Diese Grundformen und deren physikalische Bedeutung sind zusammen mit einigen Beispielen in Übersicht 3.4./1 dargestellt. (In dieser Übersicht befinden sich auch einige empirisch erarbeitete Gesetze.)
Ausgehend von der Untersuchung der mathematischen Struktur der Gleichung, wird die physikalische Bedeutung dieser Struktur an der konkreten Gleichung erläutert. Je nach der mathematischen Struktur der Gleichung wird mit den Schülern eine entsprechende Auswahl aus den folgenden Fragen diskutiert:

- Ist der (die/das) ... (physikalische Größe) die Summe, das Produkt oder der Quotient anderer Größen?
- Hat die Summe einen konstanten oder einen beliebigen Wert?
  Was bedeutet das physikalisch, und wo zeigt sich dieser Zusammenhang in Natur und Technik?
- Mit welchen Potenzen gehen die einzelnen Faktoren in das Ergebnis ein? Was bedeutet das physikalisch, und wo zeigt sich dieser Zusammenhang in Natur und Technik?
- Besteht in der Gleichung bei den Summanden bzw. Faktoren eine mathematische Symmetrie?
  Was bedeutet das physikalisch, und wo zeigt sich dieser Zusammenhang in Natur und Technik?

Übersicht 3.4./1: Deutung der mathematischen Struktur von Gleichungen

Mathematische Struktur der Gleichung	Physikalische Bedeutung dieser Struktur	Beispiele
$a = a_1 + a_2$ a beliebig:	Überlagerung zweier voneinander unabhängiger, gleichsinnig wirkender Eigenschaften bzw. Vorgänge	$F_1 + F_2 = F$ $R_1 + R_2 = R$ $I_1 + I_2 = I$ $E = m_0 \cdot c^2 + \frac{1}{2} m_0 \cdot v^2$
a konstant:	Aufteilung einer physikalischen Größe auf zwei Objekte bzw. Vorgänge	$U = U_1 + U_2$ $E = E_{\text{pot}} + E_{\text{kin}}$ $\Delta U = Q + W$
$a = b \cdot c \cdot d$	Gleichsinnige Abhängigkeit einer Größe von mehreren Eigenschaften eines Objektes	$P = U \cdot I$ $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ $\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$ $Q = U \cdot I \cdot t$ $F = B \cdot I \cdot l$
$a = \frac{b \cdot c}{d}$	Entgegengesetzt wirkende Abhängigkeiten einer Größe von mehreren Eigenschaften eines oder mehrerer Objekte	$R = \varrho \cdot \frac{l}{A}$ $F = \frac{m \cdot v^2}{r}$ $F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ $L = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot \frac{N^2}{l} \cdot A_0$
$a_1 : a_2 = b_1 : b_2$	Abhängigkeit des Verhältnisses zweier Werte einer Größe vom Verhältnis zweier Werte einer anderen Größe	$F_1 : F_2 = l_2 : l_1$ $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$ $U_1 : U_2 = R_1 : R_2$ $U_1 : U_2 = N_1 : N_2$ $p_1 : p_2 = V_2 : V_1$ $p_1 : p_2 = T_1 : T_2$

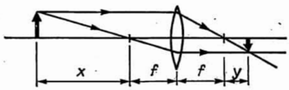
- Wie ändert sich die als abhängig angenommene Größe, wenn die als unabhängig angenommene Größe unendlich groß bzw. unendlich klein wird? Was bedeutet das physikalisch, und wo zeigt sich dieser Zusammenhang in Natur und Technik?
- Wie ändert sich die als abhängig angenommene Größe, wenn zusätzlich auch noch die in der Gleichung enthaltene Konstante verschiedene Werte annehmen kann? Was bedeutet das physikalisch, und wo zeigt sich dieser Zusammenhang in Natur und Technik?
- Existiert für die als abhängig bzw. als unabhängig angenommene Größe ein Grenzwert? Was bedeutet das physikalisch, und wo zeigt sich dieser Zusammenhang in Natur und Technik?
- Wie ändert sich die als abhängig angenommene Größe, wenn die unabhängige Größe negative Werte annimmt? Was bedeutet das physikalisch, und wo zeigt sich dieser Zusammenhang in Natur und Technik?
- Was bedeutet das Minuszeichen in der Gleichung?

Beispiele für solche Analysen sind in Tafel 3.4./5 für die Linsengleichung und im Abschnitt 3.5. für das Gravitationsgesetz dargestellt.

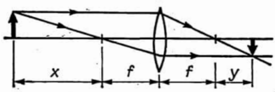
Tafel 3.4./5: Zur physikalischen Analyse der mathematischen Struktur der Linsengleichung (in der Newtonschen Formulierung)

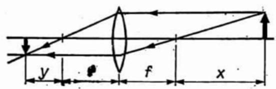
Für eine Linse gilt:

$x \cdot y = f^2$



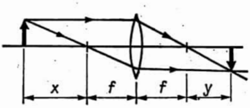
1) In einem Produkt sind die Faktoren vertauschbar.
Das bedeutet:
Gegenstandspunkt und Bildpunkt sind austauschbar.

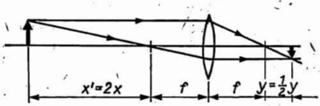




2) Aus $f^2 =$ konstant folgt $y \sim \frac{1}{x}$

Das bedeutet:
Das Bild bewegt sich im gleichen Verhältnis auf den Brennpunkt zu, wie sich der Gegenstand vom Brennpunkt entfernt (und umgekehrt).

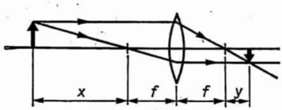


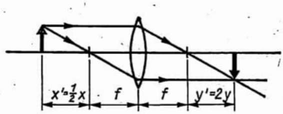


Technische Anwendung:
Einstellung der Schärfe bei Projektionsgeräten und Kameras am Objektiv und durch Verrücken der Projektionsfläche, Benutzen von Zwischenringen für Nahaufnahmen

3) Aus $f^2 =$ konstant folgt: $x \sim \frac{1}{y}$

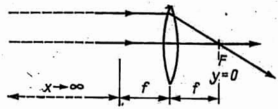
Das bedeutet:
Der Gegenstand muß sich im gleichen Verhältnis auf den Brennpunkt zu bewegen, wie sich das Bild vom Brennpunkt entfernen soll (und umgekehrt).



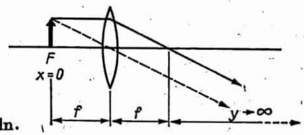


Technische Anwendung: s. 2)

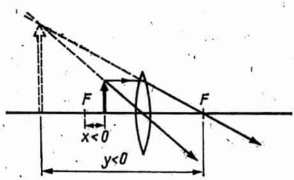
4) Aus $x \to \infty$ folgt: $y \to 0$
Das bedeutet: Als Bild eines Gegenstandes im Unendlichen entsteht ein Punkt im Brennpunkt.
Technische Bedeutung:
Die Bilder von Sternen sind Punkte.



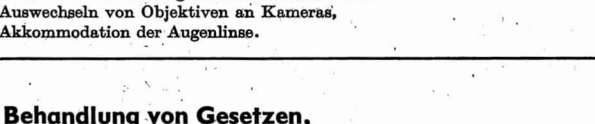
5) Aus $x \to 0$ folgt: $y \to \infty$
Das bedeutet:
Das Bild eines Gegenstandes im Brennpunkt entsteht erst im Unendlichen.
Technische Anwendung:
Erzeugung von parallelen Lichtbündeln.



6) Aus $x < 0$ folgt: $y < 0$.
Das bedeutet:
Das Bild eines Gegenstandes zwischen Linse und Brennpunkt entsteht (als virtuelles Bild) auf der der Linse zugewandten Seite des bildseitigen Brennpunktes.
Aus $|x| < f$ folgt weiterhin $|y| > f$.
Das bedeutet: Das virtuelle Bild entsteht außerhalb der Brennweite.



7) Aus $f^2 \neq$ konstant folgt:
— bei Vergrößerung von f: Vergrößerung von $x \cdot y$
— bei Verkleinerung von f: Verkleinerung von $x \cdot y$
Das bedeutet:
Beim Auswechseln von Linsen müssen der Abstand des Gegenstandes oder der Abstand des Bildes verändert werden, oder es müssen beide Abstände verändert werden, um wieder ein scharfes Bild zu erhalten.



Technische Anwendung bzw. Auftreten in Natur:
Auswechseln von Objektiven an Kameras,
Akkommodation der Augenlinse.

3.5. Behandlung von Gesetzen, deren Gleichungen und Diagramme gegeben werden

„Das vorliegende Büchlein soll solchen eine möglichst exakte Einsicht in die Relativitätstheorie vermitteln, die sich vom allgemeinwissenschaftlichen, philosophischen Standpunkt für die Theorie interessieren, ohne den mathematischen Apparat der theoretischen Physik zu beherrschen."

(A. Einstein [11; S. 3])

3.5.1. Pädagogischer Wert der Behandlung fertig gegebener Gleichungen und Diagramme

Viele physikalische Gesetze, die die Entwicklung der Physik und der wissenschaftlichen Weltanschauung tiefgreifend beeinflußt haben, können im Unterricht nicht erarbeitet werden. Zum Teil sind die Messungen in der Schule generell oder in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht durchführbar, zum Teil reichen die mathematischen Kenntnisse der Schüler oder die Unterrichtszeit nicht zur mathematischen Auswertung der Meßwerte aus. Für weitere Gesetze, die theoretisch zu erarbeiten sind, fehlen ebenfalls die mathematischen und häufig auch die physikalischen Voraussetzungen. Dennoch kann in einem an der Physik und an der wissenschaftlichen Weltanschauung orientierten Unterricht auf die Behandlung dieser Gesetze nicht verzichtet werden, sie werden „fertig" vorgegeben. Dies darf in keiner Weise als ein Notbehelf betrachtet werden. Ein solches Vorgehen besitzt über die Schulzeit hinaus einen eigenständigen pädagogischen Wert; die Schüler werden befähigt, auch später als Erwachsene an Hand von populärwissenschaftlichen Darstellungen an der Entwicklung der Physik und der wissenschaftlichen Weltanschauung teilzuhaben. Darüber hinaus folgt der pädagogische Wert der Behandlung fertig gegebener Gleichungen auch daraus, daß die überwiegende Mehrheit der Menschen im Berufsleben und in anderen Bereichen der menschlichen Tätigkeit aus gegebenen Gleichungen Schlüsse für die Bewältigung praktischer Aufgaben ziehen wird, während nur äußerst wenige Schüler jemals im Leben in die Lage eines Wissenschaftlers kommen werden, eine neue Formel zu entwickeln.
Das Geben einer fertigen Gleichung ist natürlich nur sinnvoll, wenn die Schüler bereits ausreichende Erfahrungen über die Anwendung der Mathematik in der Physik besitzen und den entsprechenden mathematischen Apparat kennen.

3.5.2. Vorschlag für die Behandlung fertig gegebener Gleichungen und Diagramme

Auch wenn die Gleichungen oder Diagramme nicht erarbeitet, sondern fertig gegeben werden, muß das Vorgehen hierbei in die zuvor dargestellten Schritte für die empirische bzw. theoretische Erarbeitung von physikalischen Gesetzen eingeordnet werden. Dabei müssen dann jedoch einige Teilschritte entfallen bzw. anders akzentuiert werden.
Bei der Behandlung fertig gegebener Gesetze bieten sich vielfältige Möglichkeiten für Lehrervorträge an. Hierbei können einige Teilschritte besonders bildungs- und erziehungswirksam gestaltet werden. So können die Schüler bei den Teilschritten „Motivieren der Untersuchung des physikalischen Zusammenhanges" und „Finden eines Ansatzes" auf dem Hintergrund der jeweiligen Zeitepoche in einige Seiten des Schaffens und der Ideenwelt großer Physiker eingeführt werden.
In den Darlegungen zu den Teilschritten „Erarbeiten der Gleichung aus den Meßwerten" bzw. „Erarbeiten der Gleichung durch Umformen des Ansatzes mit Hilfe logischer und mathematischer Schlüsse" können statt der Erarbeitung dieser Gleichungen zunächst solche Charaktereigenschaften der Forscher

in den Mittelpunkt gestellt werden, die den Forschern trotz zeitweiliger Mißerfolge dennoch zur erfolgreichen Erarbeitung der Gleichung verhalfen. Hierzu gehören vor allem Eigenschaften wie jahrelange Ausdauer, Beharrlichkeit und Zielstrebigkeit. Gleiches gilt für ihre weltanschauliche Position, von der aus sie ihr ganzes Leben in den Dienst des Sieges der von ihnen vertretenen Ideen stellten. Von besonderer Bedeutung hierbei sind die Überzeugung von der Gesetzmäßigkeit der Vorgänge in der Natur, die Überzeugung von der Erkennbarkeit derselben und die Überzeugung von der moralischen Verantwortung der Wissenschaftler für die humanistische Nutzung der Forschungsergebnisse. Bei anderen Gesetzen können wiederum bestimmte Verallgemeinerungen zur Anwendung der Mathematik beim empirischen bzw. beim theoretischen Erarbeiten von Gesetzen sowie zum Wesen physikalischer Gesetze oder zu deren Gültigkeitsbedingungen im Mittelpunkt stehen.

3.5.3. Beispiele zur Behandlung empirisch gefundener Gesetze

Das Joulesche Gesetz (Klasse 8)

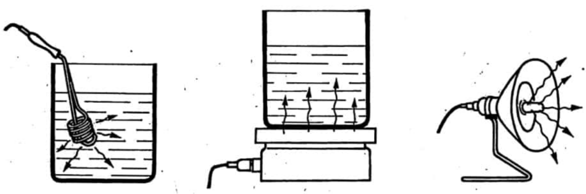
Wir beobachten und vergleichen in der Technik. und *Wir vereinfachen die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*

Hierbei entstehen in Tafel 3.5./1 die Teile (1a) bis (2b).

Tafel 3.5./1: Abstraktionsreihe zum Jouleschen Gesetz

Wir beobachten und vergleichen.

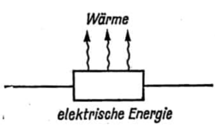
(1a)



(1b) Elektrische Heizgeräte geben Wärme ab.

Wir vereinfachen.

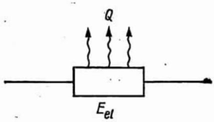
(2a)



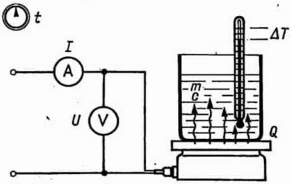
(2b) In elektrischen Heizgeräten wird die elektrische Energie des Stromes in Wärme umgewandelt.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



(3b) Meßanordnung und Meßtabelle:



Q in J	U in V	I in A	t in s

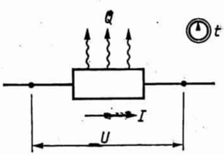
($Q = c \cdot m \cdot \Delta T$)

(3c) Aus zahlreichen Meßreihen hat Joule das später nach ihm benannte Gesetz in Form der Gleichung gefunden:

$$Q = U \cdot I \cdot t$$

Wir fassen zusammen.

(4) In einem Widerstand wird elektrische Energie in Wärme umgewandelt.



Die abgegebene Wärme Q kann nach der Gleichung berechnet werden: $Q = U \cdot I \cdot t$.

Die Wärme ist um so größer, je größer die Spannung und je größer die Stromstärke sind und je länger der Stromfluß dauert.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

Motivieren für das Durchführen von Messungen.

Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung. (Vgl. Teil (3a)!)

Entwickeln der Meßanordnung und der Meßtabelle. Es entsteht der Teil (3b). Mit den Schülern wird erarbeitet, daß die Wärme Q mit Hilfe der Gleichung $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ berechnet werden kann. Diese Größen werden aber nicht in die Meßtabelle aufgenommen.

Durchführen der Messung. Auf eine Durchführung verschiedener Messungen muß aus Zeitgründen verzichtet werden. Es wird nur eine Messung begonnen ($\Delta T = 20$ K).

Geben der Gleichung. Ohne das Ende der einen Messung abzuwarten, wird die Gleichung wie im Teil (3c) gegeben.

Wörtliches Formulieren des Gesetzes. (Vgl. Teil (4)!)

Hervorheben der Gültigkeitsbedingungen.

Wir fassen zusammen. (Vgl. Teil (4) in Tafel 3.5./1!)

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung an einigen einfachen Beispielen.

Erläutern des Inhalts der Gleichung in einer Konkretisierungsreihe.

Erstes Lösen von Aufgaben. Hierbei werden die Meßwerte aus der inzwischen beendeten Messung benutzt. (Gleichzeitig wird Q aus m, c und ΔT berechnet.)

Physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Gleichung. Aus der Gleichung folgt: Für die Abgabe einer bestimmten Wärme ist bei großer Spannung und großer Stromstärke eine kürzere Zeit erforderlich als bei niedriger Spannung und kleiner Stromstärke.

Wir können erklären und voraussagen.

Erklären und Voraussagen mit Hilfe des Gesetzes. Es kann erklärt bzw. vorausgesagt werden, warum bei Wärmegeräten mit verschiedener Betriebsspannung oder mit unterschiedlichen elektrischen Widerständen in gleichen Zeiten unterschiedlich viel elektrische Energie in Wärme umgewandelt wird.

Erläuterung des Gesetzes für die Entwicklung der Physik und für die Herausbildung des wissenschaftlichen Weltbildes. Das von Joule gefundene Gesetz war ein wichtiger Schritt zur Entdeckung des Energieerhaltungssatzes. Joule konnte zeigen, daß elektrische Energie in Wärme umgewandelt werden kann und daß bei dieser Energieumwandlung der Betrag der Energie erhalten bleibt. Als Würdigung dieser Leistung wurde die Einheit der Energie nach ihm benannt.

Resonanzkurve (Klasse 10)

Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik. und *Wir idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*

Hierbei entstehen in der Tafel 3.5./2 die Teile (1a) bis (2b).

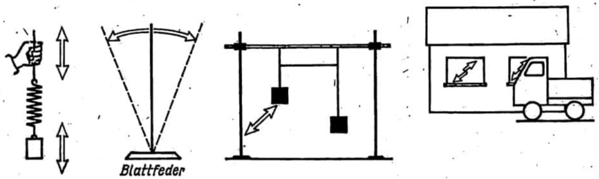
Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

Motivieren für das Durchführen von Messungen. Eine Maschine steht auf einem Fundament. Die Teile der Maschine bewegen sich gleichmäßig mit einer bestimmten Frequenz. Die hiermit verbundenen periodischen Stöße der Maschine auf das Fundament erzwingen ein Mitschwingen des Fundaments. Wenn die Amplitude der erzwungenen Schwingung des Fundaments zu groß wird, kann das Fundament zerstört und das Gebäude zum Einsturz gebracht werden. Deshalb ist eine genaue Kenntnis des Zusammen-

Tafel 3.5./2: Abstraktionsreihe zur Resonanzkurve

Wir beobachten und vergleichen.

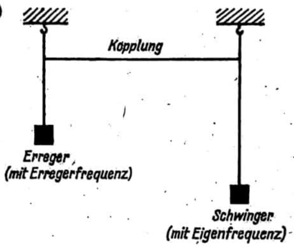
(1a)



(1b) Gebäude, Fahrzeuge und andere Gegenstände können von außen zu Schwingungen angeregt werden.

Wir idealisieren.

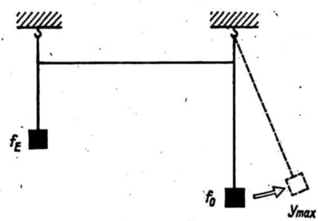
(2a)



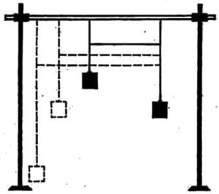
(2b) Wird einem schwingungsfähigen Körper kurzzeitig Energie zugeführt, kann der Körper eine Schwingung mit seiner Eigenfrequenz ausführen. Erfolgt die Energieübertragung periodisch durch einen anderen schwingenden Körper, so führt der angeregte Körper eine erzwungene Schwingung mit der Erregerfrequenz aus.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

(3a) Einführen der Formelzeichen:

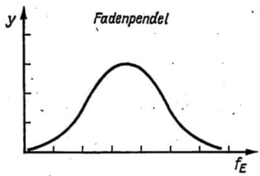


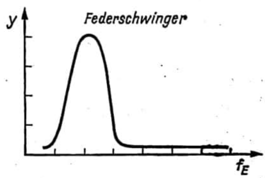
(3b) Meßanordnung und Meßtabelle:



Erregerfrequenz f_E in Hz	Amplitude y_{max} in cm

(3c) Grafische Darstellung:



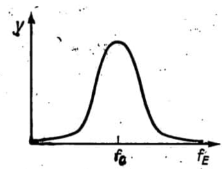


Wenn diese Messungen mit anderen Schwingern wiederholt und die Meßwerte jeweils grafisch dargestellt werden, ergeben sich immer wieder Kurven mit der gleichen typischen Form. Die Amplitude der erzwungenen Schwingung ist am größten, wenn die Erregerfrequenz mit der Eigenfrequenz übereinstimmt. Man spricht dann von Resonanz zwischen dem anregenden Körper und dem angeregten Körper. Die Kurve nennt man Resonanzkurve.

Wir fassen zusammen.

(4) Ein schwingungsfähiger Körper kann durch einen anderen schwingenden Körper zu erzwungenen Schwingungen angeregt werden.

Für alle erzwungenen Schwingungen gilt die in der Resonanzkurve dargestellte Abhängigkeit der Amplitude des angeregten Körpers von der Erregerfrequenz des anregenden Körpers. Im Resonanzfall $f_E = f_0$ ist die Energieübertragung vom Erreger zum angeregten Körper am vollkommensten und die Amplitude der erzwungenen Schwingung am größten.



hangs zwischen der Erregerfrequenz und der Amplitude der erzwungenen Schwingung in der Praxis so wichtig.

Einführen der Formelzeichen in die symbolhaft-schematische Zeichnung. (Vgl. Teil (3a) in Tafel 3.5./2!)

Entwickeln der Meßanordnung und der Tabelle für Resonanzerscheinungen am Fadenpendel. (Vgl. Teil (3b)!)

Geben der Meßwerte. Ohne die Amplituden zu messen, wird den Schülern für drei Erregerfrequenzen (z. B. $f_E < f_0$, $f_E \approx f_0$, $f_E \gg f_0$) experimentell demonstriert, daß die Amplitude der erzwungenen Schwingung von der Frequenz des erregenden Pendels abhängt. Danach gibt der Lehrer in der Tabelle etwa 7 Meßwerte vor.

Zeichnen der Kurve. Nach den gegebenen Meßwerten wird die Kurve gezeichnet. (Vgl. Teil (3c), linkes Diagramm).

Erläutern des Inhalts des Diagramms. Aus der Kurve werden einige Wertepaare abgelesen und interpretiert.

Entwickeln einer möglichen Meßanordnung für Federschwinger.

Geben der Kurve. Ohne die Amplituden zu messen, wird den Schülern in einem Freihandversuch gezeigt, daß die Amplitude der erzwungenen Schwingung des Federschwingers von der Frequenz der erregenden Hand abhängt. Unter Verweis auf das obige Vorgehen wird die Kurve gegeben. (Vgl. Teil (3c), rechtes Diagramm!)

Verallgemeinern und Geben der allgemeinen Resonanzkurve. (Vgl. Teil (4)!)

Wir fassen zusammen.

(Vgl. Teil (4)!)

Wir können erklären und voraussagen.

Beispiele hierfür sind: Ingenieure bemühen sich, die Fundamente und Fabrikhallen so zu bauen, daß deren Eigenschwingungen eine Frequenz haben, die von der Frequenz der beweglichen Teile der aufgestellten Maschinen weit entfernt ist. Bei Brücken bemüht man sich, die Frequenz ihrer Eigenschwingung von der Frequenz des militärischen Gleichschritts und des Leerlaufs von Fahrzeugmotoren (bei deren Halt auf der Brücke) sehr verschieden zu machen. Auf der Resonanz beruht die Wirkungsweise von Zungenfrequenzmessern. Weitere Resonanzerscheinungen sind die unangenehmen Eigenschwingungen verschiedener Karosserieteile in Fahrzeugen in Abhängigkeit von der Drehzahl des Motors, das Vibrieren des Kopfes bei niedrigen Frequenzen des Bohrers des Zahnarztes, das Mitschwingen des Brustkorbes bei bestimmten tiefen Tönen, das Klirren von Fensterscheiben durch vorbeifahrende Fahrzeuge. Auf der Resonanz beruht der Hörvorgang des Menschen.

Das Brechungsgesetz (Klasse 11)

Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik. und *Wir idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Phsyik.*

Hierbei entstehen in der Tafel 3.5./3 die Teile (1a) bis (2b).

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

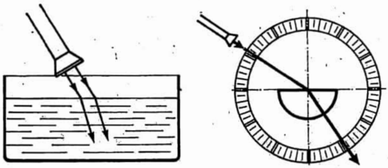
Motivieren für das Durchführen von Messungen. Bereits im 13. Jahrhundert erfand ein Italiener die Brille. Im 14. Jahrhundert gab es in Italien und in Holland vielerorts Brillenmacherzünfte. Holländische Glasschleifer entwickelten um das Jahr 1600 aus zufälligen Entdeckungen Mikroskope und Fernrohre. Zum Verständnis der Wirkungsweise von Brillen, Lupen, Mikroskopen und Fernrohren sowie für eine weitere Verbesserung dieser Geräte suchte man nach dem der Lichtbrechung zugrunde liegenden Gesetz. Die Durchführung von Messungen und die mathematische Erfassung der Gesetze der Lichtbrechung gelang erst, nachdem Kepler etwa 1610 die physikalische Idealisierung „Lichtstrahl“ eingeführt hatte.

Einführung der Formelzeichen in die schematisch-symbolhafte Zeichnung. (Vgl. Teil (3 a)!)

Tafel 3.5./3: Abstraktionsreihe zum Brechungsgesetz

Wir beobachten und vergleichen.

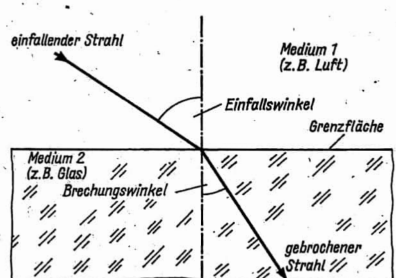
(1a)



(1b) **Trifft Licht aus der Luft auf die Grenzfläche von Wasser oder Glas, so geht der größte Teil des Lichtes in das Wasser oder Glas über. Dabei wird die Richtung des Lichtes verändert.**

Wir idealisieren.

(2a)

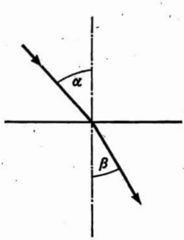


Annahme:
- Lichtstrahlen
- keine Reflexion

(2b) **Beim Übergang von einem durchsichtigen Medium in ein anderes wird die Richtung der Lichtstrahlen verändert, sie werden gebrochen.**

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

(3a) Einführen der Formelzeichen:



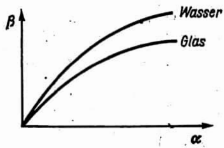
(3b) Meßtabelle:

Einfallswinkel α in Luft	Brechungswinkel β in Glas	beim Übergang in Wasser
20°	13°	15°
40°	25°	29°
60°	35°	41°
80°	40°	48°

(3c) Aus den Messungen folgt:
Der Brechungswinkel β ist stets kleiner als der Einfallswinkel α.

Als Ungleichung geschrieben: $\beta < \alpha$

als Diagramm:



Snellius fand für die Brechung die Gleichungen

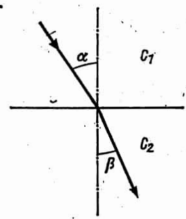
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \text{konstant} \quad \text{und} \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2}$$

Wir fassen zusammen.

(4)

Fällt Licht auf eine ebene Grenzfläche, so wird es beim Übertritt von dem einen Medium in das andere aus seiner ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. Dabei ist das Verhältnis der Sinuswerte von Einfallswinkel und Brechungswinkel gleich dem Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten in den beiden Medien.

Es gilt: $$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_1}{c_2}$$



Einfallender Strahl, gebrochener Strahl und Einfallslot liegen in einer Ebene.

In Tabellenbüchern gibt man nicht die Ausbreitungsgeschwindigkeiten c, sondern die dimensionslosen optischen Stoffkonstanten n an. Diese werden als absolute Brechungszahlen bezeichnet.
Dann lautet das Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Entwickeln der Meßanordnung und der Meßtabelle. (Vgl. Teil (3b)!)

Geben der Meßwerte. (Vgl. Teil (3b) in Tafel 3.5./3!)

Geben der Gleichung. Die vorgegebenen Meßwerte in der Tabelle zeigen, daß der Brechungswinkel stets kleiner ist als der entsprechende Einfallswinkel (vgl. Teil (3c)).

Man kann nun durch das Bilden der Ausdrücke $\alpha + \beta$, $\alpha - \beta$, $\alpha \cdot \beta$ und $\alpha : \beta$ versuchen, eine Gleichung zu finden, die von den Meßwerten erfüllt wird. Das ist erfolglos. Um für bestimmte Einfallswinkel den Brechungswinkel vorauszusagen, kann man die Meßwerte graphisch darstellen und aus den so erhaltenen Kurven die gesuchten Winkel ablesen (vgl. Teil (3c)). Da in der Technik verschiedene Stoffe und verschiedene Glassorten benutzt werden, könnte man mit solchen Diagrammen ein ganzes Buch füllen. Ein solches Verfahren ist aber nicht so bequem wie eine einzige Gleichung. Man mußte also weiter nach einer Gleichung suchen.
Erst 1618 entdeckte der Holländer Snellius nach langwierigem Suchen einen Weg, die Meßwerte in einer einzigen Gleichung zusammenzufassen. Durch systematisches Probieren entdeckte er, daß der Quotient $\sin \alpha / \sin \beta$ für alle Einfallswinkel konstant ist (vgl. Teil (3c)).
Weiterhin entdeckte er, daß der Wert dieses Quotienten allein von den beiden Stoffen abhängt, zwischen denen der Übergang des Lichtes erfolgt.
Die Brechung des Lichtes läßt sich mit dem Wellenmodell des Lichtes erklären. Dadurch erkannte man, daß der Wert des Quotienten $\sin \alpha / \sin \beta$ für den Übergang des Lichtes aus dem Medium 1 in das Medium 2 gleich den Quotienten aus den Lichtgeschwindigkeiten c_1 und c_2 in diesen Medien ist.

Wir fassen zusammen.

(Vgl. Teil (4)!)

Ablenkung von stromdurchflossenen Leitern im Magnetfeld (Klasse 12)

Das Vorgehen bei der Behandlung der zwei Proportionalitäten $F \sim l$ und $F \sim I$ ist in Tafel 3.3./4 dargestellt.
Werden die Messungen durchgeführt, so gelten für die Auswertung der Meßwerte die Darlegungen im Abschnitt 3.3.4. (Zur Zusammenfassung der zwei Proportionalitäten zu einer Gleichung siehe Abschnitt 3.3.5.)

3.5.4. Beispiele zur Behandlung theoretisch gefundener Gesetze

Das Gravitationsgesetz (Klasse 9)

Wir beobachten und vergleichen in der Natur. und *Wir idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*

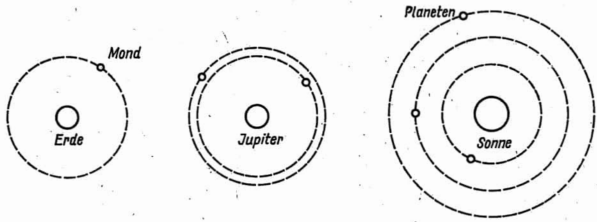
Motivieren der Untersuchung des physikalischen Zusammenhanges und empirisches Einführen in denselben. Durch die Entdeckung der Keplerschen Gesetze hatte man zu Beginn des 17. Jahrhunderts einen Einblick in den Aufbau des Planetensystems erhalten. (In Tafel 3.5./4 entstehen die Teile (1a) und (1b).)
Unter Wissenschaftlern wuchs die Überzeugung, daß es universelle, in der ganzen Welt geltende Gesetze geben müsse, nach denen sich sowohl die Körper auf der Erde als auch die himmlischen Körper bewegen. Zu jener Zeit war bereits bekannt, daß die Ursache für die Kreisbewegung eines Körpers das Vorhandensein einer zum Kreismittelpunkt gerichteten Radialkraft ist. Die Diskussionen in der Royal Society in London führten häufig zu der Frage: „Welche Art von Kraft übt die Sonne auf die Planeten aus, so daß sie gezwungen werden, sich nach den von Kepler entdeckten Gesetzen zu bewegen?“ Die Antwort auf diese Frage fand I. Newton.

Idealisieren des physikalischen Zusammenhanges. Newton betrachtete zunächst die Bahnen der Planeten und die ihrer Monde vereinfachend als Kreisbahnen. Dann führte er etwa folgende Überlegung durch: Wenn die Bewegung des Mondes eine Kreisbewegung ist, dann muß eine Radialkraft vorhanden sein, die auf die Erde gerichtet ist und den Mond in eine Kreisbahn zwingt. „Sollte das nicht vielleicht dieselbe Kraft sein, die auch einen fallenden Apfel in die Richtung zum Mittelpunkt der Erde zieht?" Dies war der große Gedanke, der zum Erfolg führte. Newton übertrug diesen Gedanken zunächst auf die Bewegung der Jupitermonde um den Jupiter und schließlich auf die Bewegung der Planeten um die Sonne. Newton entdeckte so die allgemeine Eigenschaft zweier Körper, sich gegenseitig anzuziehen. Er entdeckte, daß die irdische Schwerkraft nur ein Sonderfall der allgemeinen Massenanziehung (oder Gravitation) ist. (Es entstehen die Teile (2a) und (2b) in Tafel 3.5./4.)

Tafel 3.5./4: Abstraktionsreihe und Konkretisierungsreihe zum Gravitationsgesetz

Aus astronomischen Beobachtungen wußte man:

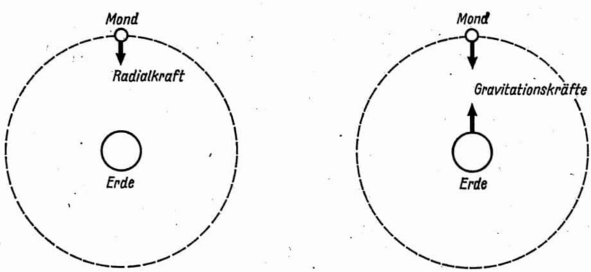
(1a)



(1b) Die Bahnen der Planeten um die Sonne und die Bahnen der Monde um einen Planeten sind Ellipsen, die annähernd Kreisform haben.

Wir idealisieren.

(2a)



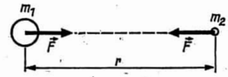
(2b) Eine Kreisbewegung wird durch eine Radialkraft hervorgerufen.
Zwischen zwei Körpern wirken Anziehungskräfte, diese nennt man Gravitationskräfte.
Die von der Sonne auf einen Planeten oder von einem Planeten auf seinen Mond ausgeübte Gravitationskraft wirkt als Radialkraft und verursacht die Kreisbewegung.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

(3/4) Newton entdeckte das später nach ihm benannte Gravitationsgesetz:

Alle Körper ziehen sich gegenseitig an. Die Gravitationskräfte, mit denen sich zwei Körper gegenseitig anziehen, wirken in Richtung der Verbindungslinie beider Körper.
Für den Betrag der Gravitationskräfte gilt die Gleichung:

$$F = \gamma \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

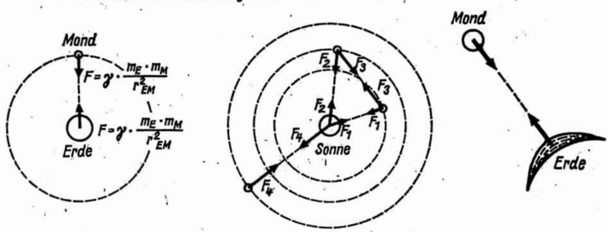


Darin bedeuten:

F den Betrag der Gravitationskraft,
m_1 die Masse des Körpers 1,
m_2 die Masse des Körpers 2,
r den Abstand der Mittelpunkte der Körper,
γ eine Konstante (universelle Gravitationskonstante).

Wir können erklären und voraussagen.

(5)



„Wägung der Erde“

Gravitationskraft zwischen Körper und Erde	=	Gewichtskraft des Körpers auf der Erde

$$F = G$$

$$\gamma \cdot \frac{m_K \cdot m_E}{r^2_{EK}} = m_K \cdot g$$

$$m_E = g \cdot \frac{r^2_{EK}}{\gamma}$$

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

Motivieren für die theoretische Erarbeitung. Newton stellte sich nun die Aufgabe, die Größe der Gravitationskraft zwischen Erde und Mond zu berechnen. Diese Kraft muß genau so groß sein, daß der Mond auf einer Kreisbahn gehalten wird. Ist sie zu groß, stürzt der Mond auf die Erde. Ist sie zu klein, entfernt sich der Mond von der Erde.

Finden eines Ansatzes. Ansätze für seine Berechnungen waren die Keplerschen Gesetze, das Newtonsche Grundgesetz, das Wechselwirkungsgesetz und die Gleichung für die Radialkraft.

Geben der Gleichung. Vgl. Teil (3/4) in Tafel 3.5./4! Ergänzend sollte man den Schülern mitteilen, daß Newton den genauen Wert der Gravitationskonstanten noch nicht kannte. Die genaue experimentelle Bestimmung dieser Konstanten gelang erst 100 Jahre später. Newton hatte den Wert der Konstanten nur annähernd abschätzen können. Bei Berechnungen konnte er das Gesetz deshalb nur in der Form $F \sim \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ anwenden.

Interpretieren der in der Gleichung enthaltenen physikalischen Größen. (Vgl. die Zeichnung im Teil (3/4) von Tafel 3.5./4!)

Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung an einigen einfachen Beispielen.

Erläutern des Inhalts der Gleichung in einer Konkretisierungsreihe. Dies kann am Beispiel der Kreisbahn des Mondes erfolgen. (Vgl. Teil (5) in Tafel 3.5./4!)

Physikalische Analyse der mathematischen Struktur der Gleichung. Aus der Gleichung folgen einige wichtige Zusammenhänge:

1) Da das Produkt $m_1 \cdot m_2$ mathematisch symmetrisch ist, kann man keine der zwei Massen als die mathematisch unabhängige bzw. abhängige Größe annehmen. Das heißt, die Gravitation ist eine gegenseitige Einwirkung zweier Körper aufeinander und nicht eine einseitige Einwirkung eines Körpers auf einen anderen.
2) Bei r = konstant gilt: $F \sim m_1 \cdot m_2$.
   Das heißt: Die zwischen zwei Körpern wirkenden Gravitationskräfte sind dem Produkt aus den Massen der beiden Körper direkt proportional.
3) Bei m_1 = konstant und m_2 = konstant gilt: $F \sim 1/r^2$.
   Das heißt: Die zwischen zwei Körpern wirkenden Gravitationskräfte sind dem Quadrat des Abstandes der Mittelpunkte der beiden Körper umgekehrt proportional.
4) Aus dem Quotienten und aus der zweiten Potenz des Abstandes folgt: Eine Verdopplung der Masse eines Körpers und eine Verdopplung des Abstandes zwischen den zwei Körpern haben eine zweifach unterschiedliche Auswirkung auf Tendenz und Größe der Veränderung der Gravitationskraft. Im ersten Fall wird die Kraft auf das Doppelte vergrößert, im zweiten Fall wird sie auf ein Viertel verkleinert.

Wir können erklären und voraussagen.

Erklären von Naturerscheinungen mit Hilfe des Gesetzes. Newton veröffentlichte sein Gesetz erst nach etwa 18jähriger Arbeit. In dieser Zeit hatte er sich überzeugt, daß er mit diesem Gesetz die damals bekannten Bahnen von Planeten, Monden und Kometen erklären konnte. Dazu gehörten auch die kleinen Störungen der Planetenbahnen infolge der Gravitation zwischen den Planeten (vgl. Teil (5) in Tafel 3.5./4). Er konnte erklären, warum die Fallbeschleunigung g den bekannten Wert 9,81 m/s^2 hat. Weiterhin konnte Newton das Entstehen von Ebbe und Flut erklären.

Bestimmen des Gültigkeitsbereiches des Gesetzes. Werten der Bedeutung des Gesetzes für die Entwicklung der Physik und des wissenschaftlichen Weltbildes.
Newton hatte bereits an den ihm zur Verfügung stehenden astronomischen Messungen nachgewiesen, daß das Gravitationsgesetz im gesamten Sonnensystem gilt. Heute wissen wir, daß es im gesamten Weltall (Universum) gilt, es ist ein universell gültiges Gesetz. Damit brach im 17. Jahrhundert die noch aus dem Altertum überlieferte Unterscheidung zwischen einer „irdischen" Mechanik, die nach physikalischen Gesetzen abläuft, und einer Himmelsmechanik, die allein durch göttliche Vorstellungen bestimmt ist, zusammen. So wurde erstmals für einen großen Kreis von Wissenschaftlern und für viele wissenschaftlich interessierte Menschen überzeugend nachgewiesen, daß alle physikalischen Vorgänge in der Welt nach einheitlichen Gesetzen ablaufen und daß diese vom Menschen erkannt werden können. Die irdische Schwerkraft wurde als Beispiel der allgemeinen Massenanziehung im Weltall erkannt.

Voraussagen mit Hilfe des Gesetzes: 100 Jahre später sagte man als Ursache für die Unregelmäßigkeiten in der Bahn des Planeten Uranus die Existenz eines weiteren Planeten voraus. Diesen Planeten, der Neptun genannt wurde, fand man dann auch an der vorherbestimmten Stelle.
Nach der genauen Bestimmung der Gravitationskonstanten konnte mit Hilfe des Gravitationsgesetzes die Masse der Himmelskörper bestimmt („gewogen") werden.

Die Radialkraft (Klasse 9)

Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik. und *Wir idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*

Das Vorgehen bei diesen Schritten kann den Teilen (1a) bis (2b) in Tafel 2.2./8 entnommen werden.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

Motivieren für die theoretische Erarbeitung. Um eine Gleichung zur Berechnung der für eine Kreisbewegung erforderlichen Radialkraft zu erhalten, könnte man Messungen vorschlagen. Dazu müßte man zunächst die physikalischen Größen finden, von denen die Radialkraft abhängig ist. (Auf eine entsprechende Frage können die Schüler die drei physikalischen Größen Masse, Geschwindigkeit und Radius nennen.) Nach einer Erörterung der dazu durchzuführenden Meßreihen und möglicher Experimentieranordnungen sowie der dabei jeweils konstant zu haltenden Größen teilt man den Schülern mit, daß solche Messungen in der Schule meist nicht ausreichend genau durchgeführt werden können.
Jetzt erfolgt die Orientierung auf eine theoretische Erarbeitung der Gleichung. Newton stellte sich die Aufgabe, die Gleichung für die Radialkraft aus physikalischen und mathematischen Überlegungen herzuleiten. Newton schrieb hierzu: „Ein in der Schleuder herumgedrehter Stein hat das Bestreben, sich von der herumtreibenden Hand zu entfernen; er spannt durch dieses Bestreben die Schleuder, und zwar desto stärker, je schneller er herumgedreht wird, und er fliegt davon, sobald man ihn losläßt ... Dasselbe findet bei allen Körpern statt, welche im Kreise herumgetrieben werden. Sie haben alle das Bestreben, sich vom Mittelpunkt ihrer Bahn zu entfernen, und wenn nicht eine jenem Bestreben entgegengesetzte Kraft da wäre, wodurch sie gebunden und in ihren Bahnen zurückgehalten werden, ... so würden sie längs einer geraden Linie mit gleichförmiger Bewegung fortgehen ..." Gleiches gilt für den Mond. „Ohne eine solche Kraft kann er nicht in derselben (Bahn — K. L.) erhalten werden. Diese Kraft würde ferner, wenn sie ... kleiner wäre, ihn nicht stark genug vom geradlinigen Wege ablenken, hingegen, wenn sie zu groß wäre, ihn mehr als hinreichend zur Erde ablenken und gegen diese hinführen. Es ist daher notwendig, daß sie gerade von der richtigen Größe sei. Aufgabe der Mathematik ist es, die Kraft zu finden, durch welche ein Körper in einer gegebenen Bahn und mit gegebener Geschwindigkeit erhalten werden könne ..." [2; S. 22f.].

Finden eines Ansatzes. Hierauf sollte in Klasse 9 verzichtet werden.

Geben der Gleichung. (Vgl. Teil (3/4) in Tafel 2.2./8!)

Wir fassen zusammen.

(Vgl. Teil (3/4) in Tafel 2.2./8!)

3.5.5. Beispiele zur Behandlung theoretisch gefundener Gesetze aus unanschaulichen physikalischen Theorien

In den gesamten bisherigen Darlegungen wurde die Mathematik ausnahmslos auf anschauliche physikalische Begriffe und Theorien angewandt. Das sind „solche physikalischen Begriffe und Theorien, die der Erfahrungswelt des täglichen Lebens entnommen oder angepaßt sind und Abbilder oder Modelle der sinnlich wahrnehmbaren Realität geben. Die Begriffe oder Theorien gehen dabei meist auf mechanische Vorstellungen zurück“ [12; S. 62]. Typisch für diese mechanischen Vorstellungen ist, daß bestimmte inhaltliche Ähnlichkeiten zwischen den Modellvorstellungen und den realen Objekten bestehen. Dieser Umstand wurde für die Zeichnungen in den Abstraktions- und Konkretisierungsreihen genutzt.
Moderne physikalische Theorien, wie die Quantentheorie und die Relativitätstheorie, beruhen auf Erfahrungen, die nicht unmittelbar durch die menschlichen Sinnesorgane, sondern nur mit Hilfe besonderer Meßapparaturen gewonnen werden können, sie werden deshalb unanschaulich genannt (vgl. [12; S. 62]). Daher ist ein empirisches Einführen der Schüler in den physikalischen Zusammenhang nicht immer in der bisherigen Weise möglich. Das Vorgehen hierbei demonstrieren wir an zwei Beispielen.

Die Einsteinsche Gleichung $E = m \cdot c^2$ (Klasse 12)

Bei der Behandlung dieser Gleichung wird in Schulbüchern nicht selten der Versuch unternommen, diese Gleichung herzuleiten. Wir empfehlen, auf eine solche Herleitung zugunsten einer Behandlung dieser Gleichung zu verzichten, bei der die Schüler einen Einblick in die Denkweise von Einstein und in das Problem der experimentellen Bestätigung dieser Gleichung erhalten können.

Motivieren für die Behandlung des Gesetzes. Albert Einstein hat seine spezielle Relativitätstheorie nicht auf einmal entwickelt. Er veröffentlichte wesentliche Teile der Theorie im September 1905 in der damaligen Zeitschrift für Physik, den „Annalen der Physik“. Im Novemberheft des gleichen Jahres veröffentlichte Einstein noch einen drei Seiten umfassenden Nachtrag, den er mit den Worten einleitete: „Die Resultate einer jüngst in diesen Annalen von mir publizierten ... Untersuchung führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll“ [13; S. 639].

Von welcher Idee ging Einstein aus?

Finden eines Ansatzes. Einstein ging von der Gültigkeit des klassischen Energieerhaltungssatzes aus. Diesen Ansatz, den die Schüler nur informativ kennenlernen sollten, formulierte Einstein folgendermaßen:
Es befinde sich im System (x, y, z) ein ruhender Körper, dessen Energie — auf das System (x, y, z) bezogen — E_0 sei. Bezogen auf ein zweites System (x', y', z'), das sich längs der x-Achse mit der Geschwindigkeit v bewegt, habe der Körper die Energie E'.
Dieser Körper sende in eine bestimmte Richtung zur x-Achse ebene Lichtwellen von der Energie $E/2$ aus und gleichzeitig eine gleich große Lichtmenge nach der entgegengesetzten Richtung. Hierbei bleibt der Körper in bezug auf das System (x, y, z) in Ruhe. Für diesen Vorgang muß das Energieprinzip gelten, und zwar (nach dem Prinzip der Relativität) in bezug auf beide Koordinatensysteme [vgl. 13; S. 640].

Hieraus fand Einstein als Ansatz zwei Gleichungen: eine Gleichung für die Energiebilanz im ruhenden System und eine Gleichung für die Energiebilanz im bewegten System.

Erarbeiten der Gleichung durch Umformen des Ansatzes mit Hilfe mathematischer und logischer Schlüsse. Durch mathematische und physikalische Umformungen erhielt Einstein die Gleichung

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

Physikalische Analyse der Gleichung. Der physikalische Inhalt der Gleichung bedeutet mit den Worten von Einstein:
„Gibt ein Körper die Energie E in Form von Strahlung ab, so verkleinert sich seine Masse um E/c^2. Hierbei ist es offenbar unwesentlich, daß die dem Körper entzogene Energie gerade in Energie der Strahlung übergeht, so daß wir zu der allgemeineren Folgerung geführt werden:
Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energieinhalt; ändert sich die Energie um E, so ändert sich die Masse in demselben Sinne um E/c^2 . . ." [13; S. 641].
Dies bedeutet: Jeder Form von Energie entspricht eine Masse $m = E/c^2$. Das heißt: Man muß auch Lichtwellen der Energie E eine Masse $m = E/c^2$ zuordnen.
Schreibt man die Gleichung in der Form $E = m \cdot c^2$, so bedeutet dies: Jeder Masse m entspricht eine Energie $E = m \cdot c^2$.

Wir fassen zusammen.

Durch die Anwendung des Energieerhaltungssatzes auf Lichtquellen im ruhenden und im bewegten Koordinatensystem erhielt Einstein die Gleichung

$$m = E/c^2 \text{ oder } E = m \cdot c^2 .$$

Dies bedeutet:
Jeder Form von Energie entspricht eine Masse $m = E/c^2$.
Jeder Masse entspricht eine Energie $E = m \cdot c^2$.
Ändert sich die Energie um ΔE, so ändert sich die Masse in demselben Sinne um $\Delta m = \Delta E/c^2$.
Ändert sich die Masse um Δm, so ändert sich die Energie in demselben Sinne um $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$.
Energie und Masse entsprechen einander, sie sind äquivalent.

Experimentelle Bestätigung der Gleichung. Zur Zeit der Entdeckung dieses Gesetzes gab es noch keine Möglichkeit der experimentellen Überprüfung der Gleichung, zu jener Zeit war noch nicht einmal die Existenz von Elektronen bewiesen! Doch Einstein sah bereits für die Zukunft eine solche Möglichkeit: „Es ist nicht ausgeschlossen, daß bei Körpern, deren Energieinhalt in hohem Maße veränderlich ist (z. B. bei den Radiumsalzen), eine Prüfung der Theorie gelingen wird" [13; S. 641].
Das Problem der experimentellen Bestätigung der Gleichung bestand darin, daß man zunächst nur mit makroskopischen Körpern und mit Licht experimentieren konnte. An makroskopischen Körpern treten aber bei Energieänderungen keine praktisch meßbaren Masseänderungen auf. Dies wird am Beispiel der Energiefreisetzung bei chemischen Prozessen verdeutlicht.
Beim Licht war die Situation nicht wesentlich besser. Lichtwellen der Energie E muß man eine Masse E/c^2 zuordnen. Die Masse vom Licht könnte man im Prinzip messen, wenn man Licht in einem Kasten mit ideal reflektierenden Wänden einfängt. Enthält der Kasten Licht, dann würde er mehr wiegen als sonst. Die Masse ist jedoch zu klein und kann selbst mit den empfindlichsten Meßmethoden nicht nachgewiesen werden. Es gibt jedoch einen durch die Masse des Lichtes hervorgerufenen Effekt, der meßbar ist. Infolge ihrer Masse sollten Lichtwellen von der Sonne durch Gravitation angezogen wer-

den. Die Krümmung von Lichtstrahlen durch die Sonne ergibt eine beobachtbare Verschiebung in der scheinbaren Position von Sternen, wenn sich diese in der Nähe der Sonne befinden. Dieser Effekt wurde 1919 während einer Sonnenfinsternis nachgewiesen. Das war nach 15 Jahren die historisch erste experimentelle Bestätigung der Gleichung.
Mit der Entdeckung von Elementarteilchen entstanden neue Möglichkeiten für die experimentelle Bestätigung der Einsteinschen Gleichung. In den Jahren 1932 und 1938 gab es durch den experimentellen Nachweis der Paarzerstrahlung bzw. der Kernspaltung überzeugende experimentelle Bestätigungen der Gleichung.
Im Ergebnis der Behandlung der Paarzerstrahlung eines Elektron-Positron-Paares werden die Begriffe Ruh- und Gesamtenergie eingeführt und herausgearbeitet, daß bei Elementarteilchenprozessen kein Erhaltungssatz der Ruhenergie, sondern nur ein Erhaltungssatz der Gesamtenergie gilt.

Die Plancksche Beziehung $E = h \cdot f$ (Klasse 11)

Für eine bildungs- und erziehungswirksame Behandlung der Planckschen Beziehung stehen das Verständnis des physikalischen Inhalts derselben sowie ein Bewußtmachen der historischen Bedeutung dieser Entdeckung für die Entwicklung der Physik im Vordergrund. Hierfür ist zunächst eine historische Entwicklung der Problemsituation unerläßlich. Daraus ergeben sich für die Behandlung der Gleichung drei Abschnitte:

1) Informatives Bekanntmachen mit einigen empirischen Ergebnissen der Forschungen mit strahlenden Körpern.

Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik. und *Wir idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*

Jeder Körper sendet in Abhängigkeit von seiner Temperatur eine Strahlung aus. Diese nennt man Temperaturstrahlung. Hierbei handelt es sich um eine Form der Energieübertragung. Aus der Erfahrung ist bekannt, daß es sichtbare und infrarote Strahlung gibt. Das heißt, die Temperaturstrahlen besitzen verschiedene Wellenlängen.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

In der Physik wurden Methoden entwickelt, mit der man die Energie der Temperaturstrahlung messen kann. Mit Hilfe dieser Meßmethoden konnte man an die Untersuchung folgender Fragen herangehen:

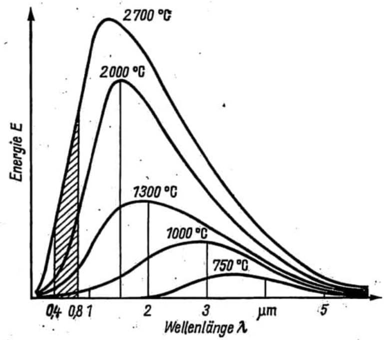
- Wie hängt die ausgesandte gesamte Strahlungsenergie bei einer bestimmten Temperatur von der Oberflächenbeschaffenheit des strahlenden Körpers ab?
- Wie verteilt sich die Energie auf die einzelnen Wellenlängen, wenn wir die Strahlung durch ein Prisma spektral zerlegen?
- Welcher mathematische Zusammenhang besteht zwischen der gesamten ausgestrahlten Energie und der Temperatur des strahlenden Körpers?

In mühevollen, langwierigen Auswertungen der Messungen erhielt man ein Strahlungsgesetz in Form einer Kurvenschar (vgl. Tafel 3.5./5).

Wir können erklären und voraussagen.

Aus diesen Kurven erkennt man:
- Die gesamte abgestrahlte Energie ist um so größer, je höher die Temperatur des strahlenden Körpers ist.
- Bei jeder Temperatur tritt in der Strahlung eine Wellenlänge mit maximaler Energie auf; daneben strahlt der Körper auch andere Wellenlängen aus, die jedoch

Tafel 3.5./5: Energieverteilung im Spektrum des schwarzen Körpers



Das Gebiet des sichtbaren Lichtes ist schraffiert.

schwächer vertreten sind. (Hieraus kann man die Temperatur der Sonne und anderer Sterne bestimmen.)

- Die Wellenlänge der maximalen Strahlung (λ_{max}) rückt mit steigender Temperatur in das Gebiet kleinerer Wellenlängen, das heißt in das Gebiet des sichtbaren Lichtes. Daher wäre für Glühlampen die günstigste Temperatur 5700 K, man erreicht jedoch nur etwa 3000 K. Das heißt: Nur wenige Prozent der gesamten von einer Glühlampe ausgestrahlten Energie entfallen auf das sichtbare Licht. Die Oberfläche der Sonne hat eine Temperatur von etwa 5800 °C. Bei dieser Temperatur liegt die Wellenlänge der maximalen Strahlung im sichtbaren Bereich.
  Das heißt, das menschliche Auge spricht gerade auf die Wellenlängen an, für die die Sonne ihr Strahlungsmaximum hat.

2) Informatives Bekanntmachen mit einigen theoretischen Ergebnissen der Forschungen mit strahlenden Körpern.

Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik. und *Wir idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*

Diese Schritte sind bereits durch den Teil 1) realisiert.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

Man suchte jetzt theoretisch eine Gleichung herzuleiten, aus der sich die empirisch erhaltenen Kurven erklären lassen und aus der man für alle möglichen Temperaturen die Werte für die Strahlungsenergie vorausberechnen kann. Ansätze für die theoretische Herleitung einer solchen Gleichung waren neben dem Energieerhaltungssatz einige grundlegende Vorstellungen der klassischen Physik. (Auf das Nennen der Gleichung wird verzichtet.)

Wir können erklären und voraussagen.

Die so von verschiedenen Physikern erhaltenen Gleichungen stimmten jeweils nur in einem bestimmten Teil mit den empirischen Messungen überein.

3) Bekanntmachen mit der Planckschen Beziehung.

Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik. und *Wir idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik.*

Diese Schritte werden von den vorangegangenen Teilen 1) und 2) übernommen.

Wir lernen ein physikalisches Gesetz kennen.

Finden eines Ansatzes. In dieser Situation begann sich auch der deutsche Physiker Max Planck mit der Theorie der Wärmestrahlen zu beschäftigen. Bei seinem Versuch, ein besseres Gesetz zu finden, kam er zu der Erkenntnis, daß jede theoretische Ableitung, die von den damals als unumstößlich richtig geltenden Prinzipien und Gesetzen der Physik ausging, unbedingt zu der Gleichung führen muß, die schon vor ihm abgeleitet worden war. Da diese Gleichung aber den Meßwerten nicht entsprach, ergab sich für die Physik eine kritische Lage. Aus dieser kritischen Lage fand Max Planck den Ausweg, indem er im Jahre 1900 nach vielen Irrwegen eine Strahlungsgleichung aufstellte, die mit den Messungen übereinstimmte. Diese Gleichung selbst soll uns nicht interessieren.
Max Planck charakterisierte die Entdeckung dieser Gleichung in einem zwanzig Jahre später gehaltenen Vortrag zur Verleihung des Nobelpreises mit den Worten: „Blicke ich zurück auf die schon zwanzig Jahre zurückliegende Zeit und auf den langen, vielfach verschlungenen Weg, der schließlich zu seiner Enthüllung führte, so will mir heute diese ganze Entwicklung bisweilen vorkommen als eine neue Illustration zu dem altbewährten Goetheschen Wort, daß der Mensch irrt, solange er strebt. Und es möchte die ganze angestrengte Geistesarbeit eines emsig Forschenden im Grunde genommen vergeblich und hoffnungslos erscheinen, wenn er nicht manchmal durch auffallende Tatsachen den unumstößlichen Beweis dafür in die Hand bekäme, daß er am Ende aller seiner Kreuz- und Querfahrten schließlich doch der Wahrheit wenigstens um einen Schritt wirklich endgültig nähergekommen ist. Unumgängliche Voraussetzung, wenn auch noch lange nicht die Gewähr für einen Erfolg ist freilich die Verfolgung eines bestimmten Zieles, dessen Leuchtkraft auch durch anfängliche Mißerfolge nicht gestört wird" [14; S. 3f.].
Auf das Nennen der Planckschen Strahlungsgleichung wird verzichtet.

Interpretieren der in dem Gesetz enthaltenen physikalischen Größen. Die Interpretation der von ihm erhaltenen Gleichung bereitete anfänglich selbst Planck Schwierigkeiten. Er sagte hierzu: „Aber selbst wenn die Strahlungsformel sich als absolut genau bewähren sollte, so würde sie, lediglich in der Bedeutung einer glücklich erratenen Interpolationsformel, doch nur einen recht beschränkten Wert besitzen. Daher war ich von dem Tage ihrer Aufstellung an mit der Aufgabe beschäftigt, ihr einen wirklichen physikalischen Sinn zu verschaffen, und diese Frage führte mich von selbst auf Boltzmannsche Ideengänge; bis sich nach einigen Wochen der angespanntesten Arbeit meines Lebens das Dunkel lichtete und eine neue ungeahnte Fernsicht aufzudämmern begann" [14; S. 12].
In der Planckschen Strahlungsgleichung waren zwei Konstanten enthalten. Die eine Konstante erkannte Planck bald als die Boltzmannsche Konstante. „Sehr viel unbequemer war die Deutung der zweiten universellen Konstanten des Strahlungsgesetzes, welche ich ... als elementares Wirkungsquantum bezeichnete ... (Sie erwies) sich gegenüber allen Versuchen, sie in irgendeiner angemessenen Form dem Rahmen der klassischen Theorie einzupassen, als sperrig und widerspenstig ... Das Scheitern aller Versuche ... ließ bald keinen Zweifel mehr übrig: entweder war das Wirkungsquantum nur eine fiktive Größe, dann war die ganze Deduktion des Strahlungsgesetzes prinzipiell illusorisch und stellte weiter nichts vor als eine inhaltsleere Formelspielerei, oder aber der Ableitung des Strahlungsgesetzes lag ein wirklich physikalischer Gedanke zugrunde; dann mußte das Wirkungsquantum in der Physik eine

fundamentale Rolle spielen, dann kündigte sich mit ihm etwas ganz Neues, bis dahin Unerhörtes an, das berufen schien, unser physikalisches Denken, welches seit der Begründung der Infinitesimalrechnung durch Leibniz und Newton sich auf der Annahme der Stetigkeit aller ursächlichen Zusammenhänge aufbaut, von Grund aus umzugestalten. Die Erfahrung hat für die zweite Alternative entschieden" [14; S. 16f].

Was hatte Planck entdeckt? Er konnte die Strahlungsgleichung physikalisch nur interpretieren, wenn er folgende Annahmen machte:

1. Die Atome eines strahlenden Körpers geben die Strahlungsenergie nicht stetig, sondern nur in Portionen bestimmter Größe ab. Dasselbe gilt für die Aufnahme von Strahlung. Die Energieportionen, die von den Atomen der Körper abgegeben oder aufgenommen werden, bezeichnet man als Energiequanten.
2. Die in einer Strahlung enthaltenen Energiequanten besitzen aber nicht alle den gleichen Energiebetrag. Sie haben eine Energie, die der Frequenz der entsprechenden Strahlung proportional ist. Die Energie E eines Energiequants kann nach der Formel berechnet werden: $E = h \cdot f$.
   Darin bedeuten h das Plancksche Wirkungsquantum und f die Frequenz der Strahlung.

Wir können erklären und voraussagen.

Erklärungen und Voraussagen. Planck konnte mit diesen Annahmen nicht nur seine Strahlungsgleichung interpretieren. Die Planckschen Annahmen und insbesondere die Beziehung $E = h \cdot f$ ermöglichten die Erklärung und Vorausberechnung weiterer physikalischer Erscheinungen. Einen großen Anteil daran hatten Physiker wie Einstein, Bohr, Franck, Hertz u. a. Deren Forschungen werden wir noch kennenlernen.

Wertung der Bedeutung der Planckschen Beziehung für die Entwicklung der Physik. Mit der Entdeckung dieser Beziehung begann die sogenannte moderne Physik. Mit dieser Beziehung mußte eine der Grundannahmen der klassischen Physik aufgegeben werden. Diese lautete: Die Natur macht keine Sprünge. Nach den klassischen Vorstellungen kann sich eine physikalische Größe, wie zum Beispiel die Geschwindigkeit, nicht sprunghaft ändern. Jetzt hatte man eine physikalische Größe gefunden, die Energie, die sich im atomaren Bereich nur sprunghaft ändern konnte. Diese Umwälzung im Denken der Physiker kann man heute nicht mehr nachempfinden. Bekannt ist nur, daß Max Planck selbst Jahrzehnte brauchte, bis er alle Zweifel überwunden hatte.

3.6. Lösen von Anwendungsaufgaben

„Die Sorge um den Menschen selbst und sein Schicksal muß stets das Hauptanliegen aller fachwissenschaftlichen Bestrebungen bilden ... Das sollte man unter seinen Diagrammen und Gleichungen nie vergessen."

(A. Einstein [15; S. 481])

3.6.1. Auswahl des Inhalts der Aufgaben zur Erklärung und zur Voraussage physikalischer Erscheinungen

Das Lösen von Anwendungsaufgaben ordnet sich in die im Abschnitt 2.1. dargestellten Schritte zur Anwendung der Mathematik ein. Im Schritt „Wir verdeutlichen uns den Inhalt der Gleichung (bzw. des Diagrammes) an einigen

einfachen Beispielen“ dominieren *formale Aufgaben*. Ihre Funktion im Erkenntnisprozeß ist im Abschnitt 2.2.5. erläutert. Beispiele für solche Aufgaben befinden sich in den Teilen (5a) und (5c) der Abstraktions- und Konkretisierungsreihen. Formale Aufgaben sind dadurch gekennzeichnet, daß sie weder bei der Praxis beginnen noch zu dieser hinführen. Das gilt auch für formale Aufgaben, die textlich eingekleidet sind, wie „Berechne den Weg, den ein Körper bei einer Geschwindigkeit von $340\ \mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ in einer Zeit von 2 Sekunden zurücklegt!“ Solche formalen Textaufgaben beginnen und enden bereits bei der physikalischen Idealisierung und verlangen von den Schülern nicht die Isolierung und Idealisierung eines realen physikalischen Vorganges. Selbstverständlich haben formale Aufgaben ihre Funktion im Lernprozeß. Aber wenn das Lösen von Aufgaben häufig auf solche Aufgaben beschränkt bleibt, dann werden die Ziele der Anwendung der Mathematik im Physikunterricht falsch verstanden, dann können die Schüler nicht erkennen, wie die Physik zur Beherrschung von Natur und Technik zum Wohle des Menschen angewendet werden kann.
Im Schritt „Wir können berechnen, erklären und voraussagen“ müssen deshalb *Anwendungsaufgaben* gestellt werden. Anwendungsaufgaben sind dadurch gekennzeichnet, daß sie bei der Praxis beginnen und auch wieder zu ihr hinführen. Sie erfordern vor dem Rechnen die physikalische Idealisierung, das heißt, die inhaltliche Analyse eines praktischen Sachverhaltes. Eine inhaltliche Analyse erfordert die eben genannte Aufgabe erst bei der Aufgabenstellung: „Wie weit ist man ungefähr von einem Berghang entfernt, wenn das Echo nach etwa 4 Sekunden zu hören ist?“
Da bei den Anwendungsaufgaben die inhaltliche Analyse eines praktischen Sachverhaltes im Vordergrund steht, kann bei einzelnen Aufgaben das Durchführen der Rechnung von der Unterrichtsstunde auf die Hausaufgaben verlegt werden, oder es kann auf die Durchführung der Rechnung auch ganz verzichtet werden. Statt dessen wird das Ergebnis der Berechnung gegeben und dessen physikalische und praktische Bedeutung diskutiert. Aus dieser Sicht sollte das Lösen von Anwendungsaufgaben oft damit begonnen werden, daß die Schüler aufgefordert werden, bei der Behandlung einer Größengleichung selbst die Größen zu erkennen, an deren Berechnung in der Praxis ein Interesse bestehen könnte (vgl. Abschnitt 2.2.6.).
Im folgenden werden einige Ziele des Aufgabenlösens dargestellt, auf die der Inhalt von Anwendungsaufgaben gerichtet werden soll. Dabei ist es jedoch nicht möglich, bei jeder Größengleichung (oder bei jedem Diagramm) alle Möglichkeiten zu nutzen. Es kommt vielmehr darauf an, im Verlaufe des gesamten Unterrichts alle diese Ziele zu berücksichtigen.
Für alle Anwendungsaufgaben gilt jedoch: Besonders bildungs- und erziehungswirksam werden Anwendungsaufgaben meist erst dann, wenn das Lösen der Aufgaben nicht mit dem Berechnen eines Zahlenwertes endet, sondern wenn sich hieran eine physikalische, ökonomische und manchmal auch biologische, geografische oder astronomische Diskussion dieses Ergebnisses anschließt.

Entwicklung der wissenschaftlichen Weltanschauung. Um das Lösen von Aufgaben erzieherisch wirksam gestalten zu können, müssen die Aufgaben auf interessante physikalische Fragestellungen in der Natur und in der Technik gerichtet sein. Diese sind im allgemeinen unmittelbar mit weltanschaulichen Komponenten verbunden. So beeindruckt es die Schüler, wenn ihnen gezeigt wird, wie mit Hilfe des Gravitationsgesetzes die Massen der Erde, des Mondes und anderer Himmelskörper berechnet werden können. Dadurch wird ihnen die universelle Gültigkeit dieses Gesetzes gezeigt, und es wird die weltanschauliche Einsicht in die Einheit der materiellen Welt vorbereitet. Diese erzieherischen Möglichkeiten werden jedoch verschenkt, wenn statt dessen im Mittelpunkt der Aufgaben zum Gravitationsgesetz Berechnungen der Gravitationskräfte zwischen zwei Körpern auf der Erdoberfläche stehen. Es ist für die Schüler in Klasse 9 auch nicht mehr interessant, die Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrzeugen zu berechnen. Die Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne trägt dagegen — verbunden mit einigen erklärenden Worten des Lehrers — unmittelbar zur Entwicklung des wissenschaftlichen Weltbildes bei. In der Diskussion des Ergebnisses kann den Schülern dann auch das Prinzip der Vorausberechnung von Mond- und Sonnenfinsternissen dargelegt werden.

Verständnis der Bedeutung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts. Erziehung zur wissenschaftlichen Weltanschauung erfordert auch die Begeisterung der Schüler für den wissenschaftlich-technischen Fortschritt und ihre Vorbereitung auf die Teilnahme an diesem Prozeß. Daher sollten einige physikalische Aufgaben mit technischem Inhalt so formuliert werden, daß sie mit aktuellen Fragen des wissenschaftlich-technischen Fortschritts verbunden sind.

Ein Beispiel hierfür ist die folgende Aufgabe:

„Schwarz-weiß-Fernsehgeräte hatten früher eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 180 W. Durch den Übergang zu volltransistorisierten Geräten beträgt die Leistungsaufnahme heute nur noch etwa 70 W.

a) Welche Einsparung würde das für die Energieversorgung ergeben, wenn in den kommenden Jahren in den etwa sechs Millionen Haushalten der DDR nur solche neuen Fernsehgeräte in Betrieb genommen würden?

b) Vergleiche das Ergebnis mit der Leistung eines Großkraftwerkes!“

Eine wissenschaftliche Diskussion der Ergebnisse dieser Aufgabe erfordert einen direkten Bezug zur Energiepolitik unseres Landes. An dieser Aufgabe kann auch den Schülern der Klasse 8 schon ein Aspekt der Entwicklung der Mikroelektronik nahegebracht werden.

Verstehen physikalischer Abhängigkeiten in praktischen Sachverhalten. Für das Verständnis der in der Natur und in der Technik ablaufenden Prozesse ist es wesentlich, diese Prozesse in ihrer Dynamik, Wechselwirkung und gegenseitigen Abhängigkeit zu verstehen. Dazu sind Betrachtungen physikalischer Abhängigkeiten — verbunden mit einer experimentellen Bestätigung derselben — besonders geeignet. Sie sind auf Grund der Fragestellungen „Wie ändert sich ..., wenn ...?“ oder „Warum ändert sich ..., wenn ...?“ meistens mit einer Analyse des Verlaufs physikalischer Prozesse verbunden.

Für den Inhalt solcher qualitativen Aufgaben gibt es mehrere Möglichkeiten.

a) Untersuchen der physikalischen Abhängigkeit bei der Veränderung der äußeren Bedingungen

Die Untersuchung der in einer Größengleichung enthaltenen physikalischen Abhängigkeiten wird hierbei von dem Standpunkt aus durchgeführt, daß allein die

„äußeren" Bedingungen der physikalischen Vorgänge veränderlich sind. Als solche äußeren Bedingungen werden verstanden: die auf einen bestimmten Körper einwirkende Kraft, die Zeitdauer dieser Einwirkung, die an ein elektrisches Gerät angelegte elektrische Spannung, der Abstand eines bestimmten Gegenstandes von einer Linse u. ä.

Beispiel:

Wie hängt bei konstanter Masse die von einem Körper erreichte Beschleunigung von der auf ihn einwirkenden Kraft ab?

b) Untersuchung der physikalischen Abhängigkeit bei der Veränderung der inneren Bedingungen

An Hand einer Variierung der konkreten Einzelobjekte (verschiedene Fahrzeugtypen, verschiedene Glühlampen) werden allein die „inneren" Bedingungen der Objekte als veränderlich angenommen. Als solche innere Bedingungen werden verstanden: die Masse oder die Geschwindigkeit und die Beschleunigung von Körpern, der elektrische Widerstand von Geräten, die spezifische Wärmekapazität von Stoffen oder die Brennweite von Linsen.

Beispiele:

Verschiedene Körper werden mit gleichen Kräften beschleunigt. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der erreichten Beschleunigung und der Masse der Körper?
Verschiedene Körper gleicher Masse sollen beschleunigt werden. Welcher Zusammenhang besteht zwischen den angreifenden Kräften und den erreichten Beschleunigungen?

c) Untersuchung zur gleichzeitigen Veränderung mehrerer Bedingungen

Schließlich können sich in der entsprechenden Größengleichung mehrere physikalische Größen gleichzeitig ändern. Dazu werden parallel zu einer Variierung von „äußeren" Bedingungen auch noch „innere" Bedingungen verändert.
Als Beispiel hierzu sei eine Aufgabe zum Ohmschen Gesetz angeführt, die in entsprechender Weise bei vielen Gesetzen gestellt werden kann:

Beispiel:

Von einem Stromkreis ist nur der Strommesser zu sehen. Alle anderen Teile des Stromkreises sollen sich hinter einer Wand befinden. Nachdem in dem Stromkreis eine oder mehrere nicht sichtbare Änderungen erfolgten, zeigt der Strommesser im Vergleich zu vorher

a) eine kleinere Stromstärke,
b) eine größere Stromstärke,
c) die gleiche Stromstärke

wie ursprünglich an.
Welche Änderungen können in jedem der drei Fälle vorgenommen worden sein?
(Vgl. hierzu auch weitere Beispiele in den Teilen (5d) der Tafeln!)

d) Verbindung von qualitativen und quantitativen Aufgaben

Quantitative Aufgaben erfordern die Berechnung einer Größe des Prozesses unter bestimmten, aus der Dynamik des Prozesses herausgelösten konstanten Bedingungen. Beschränkt sich das Aufgabenlösen auf derartige Aufgaben, kann die Dynamik der Prozesse in Natur und Technik in den meisten Fällen nicht erkannt werden. Deshalb empfiehlt es sich, eine quantitative Aufgabe möglichst oft durch eine qualitative Aufgabe zu ergänzen, in welcher der Schüler das erhaltene Resultat in den Ablauf

eines Prozesses oder in einen neuen Zusammenhang einordnen muß. Umgekehrt können quantitative Aufgaben auch als Ergänzung zu vorangegangenen qualitativen Aufgaben zu einer wesentlichen Vertiefung des Verständnisses für eine physikalische Abhängigkeit beitragen.
Die Aufgaben können so gestaltet werden, daß sie eine Lösung in Gruppenarbeit ermöglichen oder wegen ihres Umfanges geradezu erfordern. Die angeführten Beispiele können wiederum für viele Gesetze abgewandelt werden.

Beispiele:

Aufgabe zum *Widerstandsgesetz*:

Berechne den elektrischen Widerstand folgender Drähte:

	a	b	c	d	e	f
Werkstoff	Al	Al	Al	Cu	Cu	Cu
Länge	200 m	200 m	1 km	200 m	200 m	1 km
Querschnitt	4 mm²	2 mm²	2 mm²	4 mm²	2 mm²	2 mm²
(Widerstand	...	...	...	...	...	...)

Nach der Berechnung der Widerstände werden zu den an der Tafel oder auf einer Folie notierten Ergebnissen vom Lehrer folgende Fragen gestellt:
Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Widerständen der Drähte a und b sowie d und e?
Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Widerständen der Drähte b und c sowie e und f?
Welcher Zusammenhang besteht zwischen den Widerständen der Drähte a und d, b und e sowie c und f?

Aufgabe zum *Pendelgesetz*:

a) Berechnen Sie die Länge eines Sekundenpendels!
b) Wie würde sich die Schwingungsdauer des Pendels ändern, wenn bei der experimentellen Überprüfung des berechneten Wertes die Länge des Pendels durch ungenaues Arbeiten größer als die errechnete Länge wäre?
c) Ist es richtig, daß bei einer Verdopplung der Pendellänge auch die Schwingungsdauer doppelt so groß wird?

Beachtung des Gültigkeitsbereiches physikalischer Gesetze. Durch den Inhalt einzelner Aufgaben kann den Schülern die Notwendigkeit der Beachtung des Gültigkeitsbereiches ausgewählter Gleichungen bewußtgemacht werden. Auch bei dieser Empfehlung kommt es nicht darauf an, ihr bei jeder im Physikunterricht behandelten Gleichung zu folgen. Es kommt vielmehr auf eine bewußte, langfristig geplante Auswahl an.

Als Beispiel führen wir eine Aufgabe zur Berechnung des *Luftdrucks* an:

a) Wie hoch muß eine Wassersäule sein, damit am Boden ein Druck von 100 kPa entsteht?
b) In Höhe des Meeresspiegels beträgt der Luftdruck angenähert 100 kPa. Berechne nach derselben Methode wie bei Aufgabe a) die Höhe der Lufthülle der Erde!
c) Vergleiche dein Ergebnis mit dem höchsten Berg der Erde und der Flughöhe von Flugzeugen! Warum ist es falsch, die Methode zur Lösung der Aufgabe a) auf die Lösung der Aufgabe b) zu übertragen?

An Hand dieser Aufgabe kann den Schülern nochmals bewußtgemacht werden, daß die Gleichung zur Berechnung des Schweredrucks nur gilt, wenn die Dichte der Flüssigkeit oder des Gases als konstant angesehen werden darf. Während bei Wasser die Dichteschwankungen selbst bei großen Höhenunterschieden wegen der geringen Kompressibilität des Wassers meist vernachlässigt werden können, ist die Dichteänderung der Luft schon bei Höhenänderungen in der Größenordnung von einigen hundert bzw. tausend Metern zu berücksichtigen.

Entsprechende Aufgaben können zu allen Gleichungen formuliert werden. Besonders einprägsam sind solche Aufgaben dann, wenn die berechneten Ergebnisse im Experiment überprüft werden können.

Beispiele hierfür sind:

- die Anwendung des Newtonschen Grundgesetzes auf einen Experimentierwagen, an dem senkrecht ein großes Stück Pappe zur Erhöhung des Luftwiderstandes befestigt wird,
- die Anwendung des Pendelgesetzes auf eine große und leichte Kugel aus Holzwolle, die an einem kurzen Faden befestigt wird,
- die Anwendung des Pendelgesetzes auf einen Hakenkörper, der an einem dicken Seil befestigt ist.

Obgleich die diesen Gesetzen zugrunde liegenden Idealisierungen Massenpunkt und mathematisches Pendel von realen Körpern grundsätzlich nur angenähert erfüllt werden können, sind die entsprechenden Annahmen dieser Idealisierungen in diesen Beispielen auch nicht annähernd erfüllt.

Entwicklung schöpferischer Fähigkeiten. Mit dem Inhalt einiger Aufgaben müssen auch die schöpferischen Fähigkeiten der Schüler entwickelt werden. Dazu sollten die Schüler auf der Grundlage der behandelten Gesetze Ideen für den Aufbau bzw. für die Veränderung von Geräten und Anlagen entwickeln und experimentell die Funktionstüchtigkeit der von ihnen erfundenen Anlagen bzw. die prinzipielle Richtigkeit ihrer Lösungsidee nachweisen können. Durch das Stellen und Lösen solcher Aufgaben wird infolge der emotionalen Wirkung des Erfolges die Vermittlung eines anwendungsbereiten physikalischen Wissens und Könnens zugleich mit der Entwicklung schöpferischer Fähigkeiten und mit der Herausbildung der Überzeugung über die Möglichkeiten der Beherrschung und der praktischen Umgestaltung von Natur und Technik durch den Menschen verbunden. So bietet sich im Anschluß an die Behandlung des *Widerstandsgesetzes* folgende *Hausaufgabe* an:

„In Filmtheatern wird das Licht nicht einfach ein- oder ausgeschaltet. Es ist eine langsame Zunahme bzw. Abnahme der Helligkeit festzustellen. Entwerft eine Schaltung, mit der sich eine solche Anlage bauen läßt!“
In der nachfolgenden Stunde kann die Funktionstüchtigkeit der von den Schülern vorgeschlagenen Anlage in einem Schülerdemonstrationsexperiment überprüft werden.

Bei einer *größeren Wiederholung* kann in den Klassen 10 bis 12 die Aufgabe gestellt werden:

„Für eine Glühlampe mit den Anschlußwerten 12 V/50 W steht
a) nur eine Gleichspannung von 20 V und
b) nur eine Wechselspannung von 25 V zur Verfügung.
Beschreiben Sie mehrere verschiedene Möglichkeiten zum Betrieb der Glühlampe unter den gegebenen Voraussetzungen!
Fertigen Sie dazu die entsprechenden Schaltpläne an und erläutern Sie die zugrunde liegenden physikalischen Gesetze!
Berechnen Sie die physikalischen Größen der Bauteile, und bauen Sie je einen dieser Stromkreise für den Betrieb dieser Glühlampe auf!“
Den Aufbau der Stromkreise können einige Schüler bis zur nächsten Stunde vorbereiten.

3.6.2. Vorschlag für das Vorgehen beim Lösen von quantitativen Aufgaben

Für das Lösen von quantitativen Aufgaben empfehlen wir, in bestimmten Schritten vorzugehen, die auf den bereits dargestellten Schritten zur Anwendung der Mathematik im Physikunterricht beruhen.

Formulieren der Aufgabe. Das Vorgeben des praktischen Sachverhaltes entspricht dem Schritt „Wir beobachten und vergleichen in Natur und Technik."

Analyse des physikalischen Sachverhaltes. Die Analyse beginnt entsprechend dem Schritt „Wir vereinfachen/idealisieren die Erscheinungen und Vorgänge aus der Sicht der Physik." mit Hilfe einer Zeichnung des physikalischen Sachverhaltes. Je nach Klassenstufe und je nach der Kompliziertheit des Sachverhaltes kann eine bildlich-anschauliche oder eine symbolhaft-schematische Zeichnung bevorzugt werden. Hieran schließt sich der Schritt an „Wir berechnen die Erscheinungen und Vorgänge." Dazu werden in der Zeichnung die Formelzeichen eingeführt. Schließlich werden an Hand der Zeichnung die physikalischen Größen nach der gesuchten Größe und nach den gegebenen Größen geordnet zusammengestellt. Hierbei werden die Werte sofort in die jeweilige erforderliche Einheit umgerechnet. (Vgl. hierzu aber die Einschränkungen zur physikalischen Größe Kraft in Klasse 7 im Abschnitt 2.2.5.!)
Beim Schreiben der Zahlen wird hier und in allen weiteren Teilschritten darauf geachtet, mehrstellige Zahlen in Dreiergruppen zu schreiben.

Aufstellen des Planes zur Lösung der Aufgabe. Das Aufstellen dieses Planes entspricht dem Suchen eines Ansatzes für eine Gleichung zur Berechnung der gesuchten Größe. Bei komplexen Aufgaben, zu deren Lösung mehrere Gleichungen benötigt werden, kann dieser Plan (oder Ansatz) auf zwei Wegen erarbeitet werden: *synthetisch* von den gegebenen Größen zur gesuchten Größe vorwärts schreitend oder *analytisch* von der gesuchten Größe zu den gegebenen Größen rückwärts schreitend. Für die Schüler lassen sich viele komplexe Aufgaben leichter lösen, wenn man mit der in der Aufgabe gestellten Frage beginnt, das heißt, wenn man analytisch vorgeht. Dabei kann man in der Gleichung, mit der die gesuchte Größe berechnet werden soll, die gegebenen Größen mit einem Kreis oder einer Unterstreichung oder farbig hervorheben, um den Schülern zu helfen, die in einem Zwischenschritt erst noch zu berechnende(n) Größe(n) zu erkennen. Insgesamt entspricht dieses Vorgehen dem natürlichen Gang der Aufgabenanalyse. Bei dieser fragt man zuerst „Was ist gesucht?", dann fragt man „Nach welcher Gleichung kann die gesuchte Größe berechnet werden?". Schließlich fragt man: „Sind die Größen zur Durchführung der Berechnung gegeben?", „Wie können die noch fehlenden Größen ermittelt werden?" und „Sind die Bedingungen zur Anwendung der Gleichungen erfüllt?".

Berechnen der gesuchten Größe. Vor der genauen Berechnung der gesuchten Größe wird zunächst durch das Rechnen mit groben Näherungswerten ein Überschlagswert oder ein Intervall für den Wert der gesuchten Größe be-

stimmt. Dies kann durch Kopfrechnen oder durch schriftliches Rechnen erfolgen. Der nachfolgend durch schriftliche Berechnung ermittelte Wert der gesuchten Größe wird dann mit diesem Überschlagswert verglichen. Weiterhin wird vor dem Berechnen geprüft, welche Rechengenauigkeit sinnvoll ist (vgl. Abschnitt 3.6.4.).
Bei einzelnen Aufgaben kann auf die Durchführung der Berechnung verzichtet und das Ergebnis gegeben werden, um mehr Zeit für die physikalisch und mathematisch interessanten und anspruchsvollen Schritte beim Lösen der Aufgabe zu haben.
Bei dem Berechnen der gesuchten Größe kann man zwischen einem kalkülmäßigen Berechnen und einem inhaltlichen Berechnen unterscheiden. Von einem *kalkülmäßigen Berechnen* sprechen wir, wenn die gesuchte Größe durch das Einsetzen der Zahlenwerte und Einheiten der Größen in eine Gleichung berechnet wird, wobei diese Gleichung ggf. vorher noch umgestellt worden ist. Demgegenüber sprechen wir von einem *inhaltlichen Berechnen* der gesuchten Größe, wenn die Schüler diese Größe durch Nutzung der in der Ausgangsgleichung enthaltenen inhaltlichen Zusammenhänge berechnen. Hierzu kann vor allem das Anwenden von Proportionalitäten oder das logische Schließen von einer Einheit auf eine Vielheit dienen.

Formulieren des Ergebnisses. Mit dem Formulieren eines Ergebnisses erfolgt die physikalische Interpretation des berechneten Wertes. Im Unterrichtsgespräch wird dabei auch ein Bezug zu der Ausgangszeichnung hergestellt. Zum Formulieren des Ergebnisses gehört es auch, daß der berechnete Wert auf dessen sinnvolle Größenordnung geprüft wird. Dazu können im Unterricht anhand von Übersichten über einige in Natur und Technik vorkommende Werte physikalischer Größen entsprechende Vergleiche durchgeführt werden. (Vgl. Übersicht 3.1./2!) Abschließend wird hervorgehoben, wie in diesem Beispiel die Anwendung der Mathematik zur Beherrschung von Natur und Technik dient.

3.6.3. Niederschrift des Lösungsweges von quantitativen Aufgaben

Für die Niederschrift des Lösungsweges beim kalkülmäßigen Berechnen ist das folgende Schema empfehlenswert:

Aufgabe:
. . .
Analyse:

(Zeichnung)	ges.:	geg.:
	. . . .	. . . .
	. . . .	. . . .

Plan zur Lösung:
(zum Beispiel:

1. Berechnen von . . . aus . . .
2. Bestimmen von . . . aus Tafelwerk
3. Berechnen von . . . aus . . .)

Lösung:

(Hauptrechnung

zu 1. (Überschlag: . . .)

zu 2.

zu 3.)

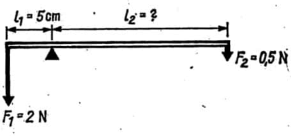
Ergebnis: (Antwortsatz)

Wichtig ist, daß das schriftliche Lösen quantitativer Aufgaben unter Beibehaltung einer äußeren Form ausgeführt wird, mit der die Schüler zu bestimmten Gewohnheiten, insbesondere zu einer inhaltlichen und nicht nur mathematisch-formalen Analyse der Aufgabe erzogen werden können.
Im Rahmen dieses Schemas kann der Lösungsweg aller einfachen und komplexen Aufgaben aufgeschrieben werden. Dabei können die einzelnen Abschnitte je nach dem Charakter der Aufgaben variiert werden; so kann zum Beispiel bei einfachen Aufgaben, die keine Umstellung einer Gleichung erfordern, der Plan zur Lösung entfallen. In den Schülerheften kann bei der Niederschrift von Aufgaben bei bestimmten Anforderungen an die zeichnerischen Fähigkeiten der Schüler auch auf die Übernahme des Bildes verzichtet werden. An der Tafel sollte das jedoch die Ausnahme sein.
Weiterhin kann bei inhaltlichen Berechnungen das Aufschreiben des Lösungsplans entfallen, da dieser — wie das folgende Beispiel zum Hebelgesetz zeigt — mit der Lösung weitgehend zusammenfällt.

Aufgabe:

An einem zweiseitigen Hebel greift die Kraft $F_1 = 2$ N in einem Abstand $l_1 = 5$ cm vom Drehpunkt aus an. In welchem Abstand vom Drehpunkt hält eine Kraft $F_2 = 0{,}5$ N an der Gegenseite das Gleichgewicht zu F_1?

Analyse:



Lösung:

(Überlegungen: Für das Gleichgewicht am Hebel gilt $F_1 : F_2 = l_2 : l_1$. Die Kräfte F_1 und F_2 verhalten sich wie 4:1. Dann müssen sich die Kraftarme l_2 und l_1 auch wie 4:1 verhalten. Das heißt: Der Kraftarm l_2 muß viermal so groß sein wie der Kraftarm l_1. Also muß $l_2 = 20$ cm sein.)
Mögliche Niederschrift:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1}$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{4}{1} \curvearrowright \frac{l_2}{l_1} = \frac{4}{1} \curvearrowright l_2 = 4 \cdot l_1$$

$$\underline{\underline{l_2 = 20 \text{ cm}}}$$

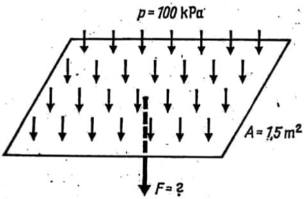
Ergebnis: Damit die Kraft F_2 der Kraft F_1 das Gleichgewicht hält, muß sie an der Gegenseite in einem Abstand $l_2 = 20$ cm vom Drehpunkt aus angreifen.

In dem folgenden Beispiel stellen wir das Vorgehen und die Niederschrift beim kalkülmäßigen bzw. beim inhaltlichen Berechnen einer Aufgabe zum Druck gegenüber.

Aufgabe:

Der Luftdruck beträgt etwa 100 kPa. Wie groß ist die Kraft, mit der die Luft auf eine Fläche von 1,5 m² drückt?

Analyse:



ges.: F (in N)

geg.: $p = 100$ kPa
$p = 100\,000$ Pa
$A = 1{,}5$ m²

Lösung (kalkülmäßig):

$$p = \frac{F}{A} \quad | \cdot A$$

$$p \cdot A = F$$

$$F = p \cdot A$$

$$F = 100\,000 \text{ Pa} \cdot 1{,}5 \text{ m}^2$$

$$F = 100\,000 \, \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 1{,}5 \text{ m}^2$$

$$F = 100\,000 \cdot 1{,}5 \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^2$$

$$\underline{\underline{F = 150\,000 \text{ N}}}$$

Lösung (inhaltlich):

$p = 100\,000$ Pa

d. h. 1 m² $\mathrel{\hat{=}}$ 100 000 N
1,5 m² $\mathrel{\hat{=}}$ 150 000 N

Ergebnis: Die Luft drückt auf eine Fläche von 1,5 m² mit einer Kraft von 150 000 N.

Diese Gegenüberstellung zeigt, daß das inhaltliche Berechnen in Klasse 7 bei solchen Aufgaben gegenüber dem kalkülmäßigen Berechnen mindestens drei Vorzüge hat: Es entfällt das Problem der Umstellung der Gleichung, es entfällt das Problem der Einheitenrechnung, es wird neben einem logisch-funktionalen Denken der physikalische Inhalt des Begriffs Druck vertieft. Ein solches Vorgehen setzt jedoch Zahlenwerte voraus, mit denen die Schüler im Kopf rechnen können.

3.6.4. Regeln für das Rechnen mit sinnvoller Genauigkeit

In der Physik wird mit Meßwerten für Größen gerechnet, die ihrem Wesen nach Näherungswerte sind. Dies muß man den Schülern bereits bei den ersten Messungen bewußtmachen. (Vgl. Abschnitt 3.3.9.!)

Werden bei der Auswertung von Meßwerten oder beim Lösen von Aufgaben mit Meßwerten Summen, Differenzen, Produkte oder Quotienten berechnet, so sind hierfür die Regeln für das Rechnen mit Näherungswerten einzuhalten.

1. Bei der Addition und Subtraktion von Näherungswerten ist im Ergebnis höchstens noch die Stelle zuverlässig, die in allen Eingangswerten mit einer zuverlässigen Ziffer besetzt ist.
2. Bei der Multiplikation und Division von Näherungswerten sind im Ergebnis nicht mehr Ziffern zuverlässig als im Eingangswert mit der geringsten Anzahl von zuverlässigen Ziffern.

Beispiel: Berechnung der mechanischen Arbeit

$W = F \cdot s$

$W = 23\,250\ \mathrm{N} \cdot 4\ \mathrm{m}$

$\underline{\underline{W = 90\,000\ \mathrm{J}}}$

3. Es empfiehlt sich, die genaueren Eingangswerte derart zu runden, daß sie nur eine zusätzliche Ziffer gegenüber dem ungenauesten Eingangswert besitzen.

   Außerdem empfiehlt sich, keine Zahlen zu benutzen, die nur eine zuverlässige Ziffer haben. Ansonsten erübrigt sich jede ausführliche Rechnung, weil man das Ergebnis bereits durch Überschlag mit der dann nur möglichen Genauigkeit erhält.

Beispiel: Die obigen Werte sollten folgendermaßen gegeben werden:

$F = 23\,300\ \mathrm{N}$ und $s = 4{,}0\ \mathrm{m}$. Dann ist $\underline{\underline{W = 93\,000\ \mathrm{J}}}$.

4. In allen Zwischenergebnissen empfiehlt es sich, jeweils eine Ziffer mehr beizubehalten.

Beispiel: Berechnung der mechanischen Leistung

mechanische Arbeit	Zeitdauer	mechanische Leistung
$F = 23300\ \mathrm{N}$	$t = 25\ \mathrm{s}$	$P = \dfrac{93\,200\ \mathrm{J}}{25\ \mathrm{s}}$
$s = 4{,}0\ \mathrm{m}$		
$\underline{\underline{W = 93\,200\ \mathrm{J}}}$		$\underline{\underline{P = 3\,700\ \mathrm{W}}}$

Eine Erhöhung der Genauigkeit des Ergebnisses erfordert eine Erhöhung der Genauigkeit der Eingangswerte (z. B. $s = 4{,}05$ m oder $t = 25{,}6$ s). Diese sollte jedoch stets dem praktischen Sachverhalt angemessen sein. Hieraus folgt auch, daß man bei der Angabe von Meßwerten, die in eine Rechnung eingehen, stets eine etwa gleiche Genauigkeit anstrebt. So sollte man die Entfernung zweier Bahnhöfe in vollen Kilometern und die Fahrzeit des Zuges in ganzen Minuten angeben. Eine Angabe des Weges in Kilometern und der Zeit in Sekunden oder des Weges in Metern und der Zeit in Minuten wäre praxisfremd.

Für die Verwendung der Zeichen „=“ und „≈“ im Zusammenhang mit Näherungswerten gibt es keine festen Regeln. Wenn man ausdrücken will, daß gerundet oder geschätzt wurde, so verwendet man das Zeichen „≈“. Bei Meßwerten und bei Rechnungen mit diesen ist es üblich, das Gleichheitszeichen zu setzen.

Die Schüler können nur allmählich verstehen, daß in der Physik nicht mit Zahlen, sondern mit Meßwerten gerechnet wird, deshalb sollten die Schüler mit Geduld — aber beharrlich — immer wieder darauf hingewiesen werden. Für den Unterricht empfiehlt sich hier eine enge Zusammenarbeit mit dem Mathematiklehrer. Ihn sollte der Physiklehrer bitten, zur gegebenen Zeit diese Regeln nochmals zu wiederholen, und mit ihm sollte genau verabredet werden, bei welchen Aufgaben in beiden Fächern mit sinnvoller Genauigkeit gerechnet wird. Ein einheitliches Vorgehen im Mathematik- und im Physikunterricht ist die Voraussetzung dafür, daß die Schüler sicher wissen, wann sie „genau" und wann sie mit Näherungswerten rechnen sollen.

3.6.5. Lösen von qualitativen Erklärungsaufgaben

Das Lösen von qualitativen Aufgaben zur Erklärung bzw. zur Voraussage physikalischer Sachverhalte sollte in folgenden Schritten erfolgen:

— Nennen des physikalischen Gesetzes, das für den physikalischen Vorgang gilt,
— Nennen der konkreten physikalischen Bedingungen des Sachverhaltes, der erklärt werden soll,
— logisches bzw. mathematisches Ableiten einer Schlußfolgerung aus dem Gesetz und aus den Bedingungen.

Damit den Schülern das Vorgehen bei der Erklärung von Sachverhalten allmählich bewußt wird, empfiehlt es sich, die Aufgabe möglichst oft in entsprechenden Teilaufgaben zu stellen.

Aufgabe:

An einer Straßenkreuzung stehen zwei gleiche Motorräder. Auf dem einen sitzt nur der Fahrer, auf dem anderen sitzt noch ein Mitfahrer. Erkläre, warum das erste Motorrad schneller anfahren kann als das zweite!

a) Nenne das zugrunde liegende Gesetz!
b) Nenne die konkreten physikalischen Bedingungen!
c) Leite aus dem Gesetz und aus den Bedingungen die obige Aussage ab!

Für die Niederschrift der Lösung gibt es an der Tafel und im Heft vielfältige Möglichkeiten. Mögliche Formen sind zum Beispiel:

Lösung:

a) Für den Vorgang gilt das Newtonsche Grundgesetz: $a = \frac{F}{m}$.

b) Es gelten folgende Bedingungen: $F_1 = F_2 = F$
$m_1 < m_2$

c) Aus $a_1 = \frac{F}{m_1}$ und $a_2 = \frac{F}{m^2}$ folgt wegen $m_1 < m_2$ für die Beschleunigungen $a_1 > a_2$,

oder

c) aus $a = \frac{F}{m}$ und $F =$ konstant folgt $a \sim \frac{1}{m}$.

Aus $a \sim \frac{1}{m}$ und $m_1 < m_2$ folgt $a_1 > a_2$.

Man kann diese Schritte auch verkürzt angeben lassen:

a) Gesetz: ... b) Bedingungen: ... c) Schlußfolgerung: ...

4. Zur Koordinierung des Physikunterrichts und des Mathematikunterrichts

Für die Gestaltung des Unterrichtsprozesses bei der Anwendung der Mathematik ist die Koordinierung des Physikunterrichts und des Mathematikunterrichts von großer Bedeutung. Hierfür gilt der Grundsatz:
Mathematische Begriffe und Verfahren sind in beiden Unterrichtsfächern übereinstimmend anzuwenden.
Trotz einer allgemeinen Anerkennung dieses Grundsatzes wird im Unterricht und in den Lehrbüchern beider Fächer noch nicht konsequent danach gehandelt. Am deutlichsten zeigt sich das im unterschiedlichen Umgang mit Größenwerten und mit Größengleichungen beim Lösen von Anwendungsaufgaben. Unter einem solchen Auseinandergehen beider Fächer leiden vor allem die Schüler. Darunter leidet aber auch die Achtung der Schüler vor ihren Lehrern. Und selbstverständlich wird hierdurch in beiden Fächern auch die Entwicklung von Fertigkeiten beim Lösen von Aufgaben behindert. Daher ist es an jeder Schule erforderlich, zwischen den Lehrern beider Fächer solche Probleme zu diskutieren und dabei nach Lösungen zu suchen, die von den Lehrern beider Fächer anerkannt werden. Diese Vereinbarungen sind dann gemeinsam zu verwirklichen.

Zu diesen Problemen gehören vor allem:
- die Niederschrift der Lösung von Anwendungsaufgaben,
- das Rechnen mit Größen und Einheiten,
- das Darstellen von Meßwerten in Meßtabellen,
- die Anlage von Diagrammen,
- das Rechnen mit Rechenhilfsmitteln,
- das Durchführen einer Überschlagsrechnung,
- das Einhalten einer sinnvollen Rechengenauigkeit,
- die Schreibweise von sehr kleinen und sehr großen Zahlen,
- das Umformen von Gleichungen,
- die Benutzung der Begriffe Abhängigkeit und Funktion.

Der Inhalt solcher Absprachen zwischen den Lehrern beider Fächer sollte aber nicht auf Fragen der formalen Übereinstimmung beider Fächer bei der Nutzung mathematischer Mittel und Verfahren beschränkt bleiben. Diese Absprachen sind auch auf die Auswahl des Inhaltes für Übungen im Mathematikunterricht zu übertragen.

Beispiele hierfür sind:
- Die Auswahl des physikalischen Inhalts für Übungsaufgaben zu den im Mathematikunterricht behandelten Gleichungen, zur Prozentrechnung sowie zu Flächen- und Volumenberechnungen,
- die Auswahl von Beispielen für das Auftreten von linearen Funktionen, quadratischen Funktionen, Exponentialfunktionen, Logarithmusfunktionen und Winkelfunktionen in der Physik,
- die Auswahl des physikalischen Inhalts von Übungsaufgaben zur Darstellung von Funktionsdiagrammen sowie von Streifen- und Kreisdiagrammen,
- die Auswahl der Größengleichungen für Übungsaufgaben zum Umformen von Gleichungen und die Auswahl der Größen, nach denen die Gleichungen umgeformt werden,
- die Auswahl des Inhalts der täglichen Übungen im Mathematikunterricht bzw. im Physikunterricht für bestimmte Unterrichtsstunden (vgl. Abschnitt 2.2.7.).

An verschiedenen Stellen dieses Buches wurde bereits dargelegt, daß neben der Erkenntnisgewinnung das Bestimmende im Physikunterricht — ebenso wie in der Physik als Wissenschaft — die Entwicklung physikalischer Vorstellungen und Denkweisen ist. Wie die folgenden Beispiele zeigen, ist mit deren Entwicklung manchmal auch eine propädeutische Entwicklung neuer mathematischer Denkweisen verbunden. Hierzu vertreten wir nach den vorangegangenen Darlegungen die folgende Position:

Im Physikunterricht werden die Schüler bei der Entwicklung bestimmter physikalischer Vorstellungen und Denkweisen zugleich auch propädeutisch mit grundlegenden mathematischen Denkweisen neuer mathematischer Mittel und Verfahren bekannt gemacht, falls diese im Mathematikunterricht noch nicht behandelt wurden. Die entsprechenden Begriffe, Zeichen und Operationen mit den Zeichen gehören jedoch nicht zum Unterrichtsstoff des Physiklehrganges.

Dies soll an einigen Beispielen erläutert werden. Wenn wir die Schüler im Physikunterricht zur Erkenntnis führen wollen, daß die Vorgänge in der Natur nach objektiven Gesetzen verlaufen, dann erfordert dies, die Schüler zu einem Verständnis physikalischer Zustände und Erscheinungen, ihrer Zusammenhänge und Veränderungen zu führen. Die Veränderung physikalischer Zustände, der Ablauf physikalischer Prozesse ist aber untrennbar mit Abhängigkeiten zwischen physikalischen Größen verbunden. Daher werden die Schüler bei der Entwicklung des Verständnisses der Abhängigkeit zwischen physikalischen Größen zugleich auch auf mathematische Fragen der Abhängigkeit zwischen Variablen oder der Zuordnung der Elemente zweier Mengen vorbereitet. An keiner Stelle werden die physikalischen Überlegungen aber durch von der Physik isolierte, eigenständige mathematische Darlegungen unterbrochen. Die Einführung der Begriffe „Funktion", „Wertebereich" und „Definitionsbereich", des Zeichens „$\ldots = f(\ldots)$" zur Darstellung von Abhängigkeiten usw. ist Unterrichtsstoff der Mathematik, der, sobald er dort erarbeitet wurde, im Physikunterricht genutzt wird.
Entsprechendes gilt für die Behandlung von Augenblickszuständen physikalischer Größen. Die einer solchen Behandlung zugrunde liegende physikalische Denkweise beinhaltet ihrem Wesen nach die mathematische Vorstellung von der stetigen Änderung und damit der Existenz eines Grenzwertes von Funktionen. Mit dieser mathematischen Denkweise sind die Schüler bekannt zu machen. Die entsprechenden Begriffe „Differenzenquotient" und „Differentialquotient" oder die Regeln der Differentialrechnung gehören — aus der Sicht ihrer Erstbehandlung — wiederum zum Unterrichtsstoff der Mathematik.
Das Entscheidende ist die Vermittlung der physikalischen Denkweise: Um den Augenblickswert einer Größe zu bestimmen, müssen die zu messenden Intervalle immer kleiner gewählt werden. Dem sind meßtechnisch und mathematisch im Rahmen der üblichen Algebra Grenzen gesetzt. Zur Untersuchung und mathematischen Erfassung von Augenblickswerten bedarf es eines neuen mathematischen Apparates, der Differentialrechnung.

In gleicher Weise — immer die physikalische Denkweise als Leitstern benutzend — können die Schüler bei Temperaturmessungen mit negativen Zahlen, beim Aufbau der Stoffe aus Teilchen mit der Darstellung von Körpermodellen in der Kavalierperspektive, bei der Einführung der physikalischen Größe Kraft mit Elementen der Vektorrechnung, bei der Behandlung der Wärmelehre und der Elektrizitätslehre mit Elementen des stochastischen Denkens und — wenn in der Abiturstufe notwendig — bei der Bestimmung der Arbeit veränderlicher Kräfte oder bei adiabatischen und isochoren Zustandsänderungen mit dem Grenzübergang zum bestimmten Integral vertraut gemacht werden.

Diese propädeutische Entwicklung neuer mathematischer Denkweisen ist auch erzieherisch zu nutzen, indem bei den Schülern die Erkenntnis gefördert wird, daß die Entstehung und die Entwicklung der Mathematik letztlich aus praktischen Bedürfnissen der Menschen resultieren und daß die mathematischen Theorien auf eine umfassende Beherrschung von Prozessen in der Natur und in der Gesellschaft gerichtet sind. Die Erstvermittlung der neuen mathematischen Mittel und Verfahren ist hingegen Aufgabe des Mathematikunterrichts. Das schließt nicht aus, daß im Physikunterricht an bestimmten Stellen notwendige mathematische Unterrichtsstoffe im Sinne der Sicherung des Ausgangsniveaus gesondert wiederholt werden.

5. Anhang

Literatur

[1] Planck, M.: Einführung in die Allgemeine Mechanik. Verlag von S. Hirzel, Leipzig 1928.
[2] Sir Isaac Newton's Mathematische Principien der Naturlehre. Hrsg. von J. Ph. Wolfers. Verlag von Robert Oppenheim, Berlin 1872.
[3] Einstein, A.: Aus meinen späten Jahren. Stuttgart 1952.
[4] Broda, E.: Ludwig Boltzmann. Mensch, Physiker, Philosoph. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1957.
[5] Lenin, W. I.: Werke, Band 38 (Philosophische Hefte). Dietz Verlag, Berlin 1964.
[6] Planck, M.: Einführung in die Mechanik deformierbarer Körper. Verlag von S. Hirzel, Leipzig 1922.
[7] Lenin, W. I.: Materialismus und Empiriokritizismus. Dietz Verlag, Berlin 1964.
[8] Feynmann, H.: Der Charakter physikalischer Gesetze. (Übersetzung aus dem Englischen ins Russische). Verlag Mir, Moskau 1968.
[9] Born, M.: Symbol und Wirklichkeit. Physikalische Blätter 2 u. 3/1965.
[10] Engels, F.: Die Dialektik der Natur. Dietz Verlag, Berlin 1962.
[11] Einstein, A.: Über die spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. Akademie-Verlag, Berlin; Pergamon Press, Oxford; Vieweg & Sohn, Braunschweig 1969.
[12] Brockhaus ABC Physik. 2 Bände. VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig 1973.
[13] Einstein, A.: Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? Leipzig: Annalen der Physik. Vierte Folge. Band 18, 1905.
[14] Planck, M.: Die Entstehung und bisherige Entwicklung der Quantentheorie (Vortrag). Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1920.
[15] Schilpp, F. A. (Hrsg.): Albert Einstein als Philosoph und Naturforscher. Stuttgart 1951.

Sachwörter