

Das Erhaltungsprinzip in der Physik und seine Anwendung im Physikunterricht

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Pädagogik

vorgelegt von
Eduard Krause

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen

Siegen 2013

Tag der mündlichen Prüfung: 19.11.2013

Gutachter:

Prof. Dr. Jochen Kuhn,
Prof. Dr. Oliver Schwarz,
Prof. Dr. Alfred Ziegler

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
0 Überblick	2
1 Einleitung	4
1.1 Das zugrundeliegende Verständnis von Physikdidaktik	4
1.2 Zielsetzung der Arbeit	8
1.3 Aufbau der Arbeit	14
2 Grundlagen	16
2.1 Einige wissenschaftstheoretische Sichtweisen auf die Physik	16
2.1.1 Der Falsifikationismus von Karl Popper	16
2.1.2 Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen nach Thomas S. Kuhn	18
2.1.3 Gerald Holton und die thematische Analyse der Wissenschaft	19
2.1.4 Imre Lakatos und die wissenschaftlichen Forschungspro- gramme	21
2.1.5 Der Begriff des „Denkstils“ bei Ludwik Fleck	22
2.1.6 Gemeinsamkeit aller Sichtweisen	22
2.2 Festlegung grundlegender Begriffe	23
2.2.1 Definition des Begriffes Gesetz	24
2.2.2 Definition des Begriffes Gesetzmäßigkeit	24
2.2.3 Definition des Begriffes Denkprinzip	27
2.3 Formulierung der Forschungsfragen der vorliegenden Untersuchungen	30
3 Die Rolle des Erhaltungsgedankens in den einzelnen Teilgebieten der Physik	33
3.1 Mechanik	35
3.1.1 Die Erhaltung als Gesetz in der Mechanik	35
3.1.1.1 Der Massenerhaltungssatz	35
3.1.1.2 Der Energieerhaltungssatz der Mechanik	36
3.1.1.3 Der Impulserhaltungssatz	36
3.1.1.4 Der Drehimpulserhaltungssatz	36
3.1.1.5 Der Schwerpunkterhaltungssatz	37
3.1.2 Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Mechanik	37
3.1.2.1 Die Massen- und Energieerhaltung als Grundlage der Hydrodynamik	37
3.1.2.2 Der Energieerhaltungssatz bei einfachen Maschi- nen der Mechanik	39
3.1.2.3 Energieerhaltung zur Beschreibung des mathema- tischen Pendels	40

INHALTSVERZEICHNIS

3.1.3	Die Erhaltung als Denkprinzip in der Mechanik	42
3.1.3.1	Die Untersuchung von Stoßvorgängen als Beitrag zur Genesis des Energieerhaltungssatzes der Mechanik	42
3.1.3.2	Untersuchung inelastischer Stöße zur Findung neuer Energieformen	45
3.2	Astronomie	46
3.2.1	Die Erhaltung als Gesetz in der Astronomie	46
3.2.2	Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Astronomie	46
3.2.2.1	Das erste keplersche Gesetz und die Energieerhaltung	46
3.2.2.2	Das zweite keplersche Gesetz und die Drehimpulserhaltung	48
3.2.2.3	Das Swing-by-Manöver	50
3.2.3	Die Erhaltung als Denkprinzip in der Astronomie	51
3.2.3.1	Die Entdeckung des Neptun	51
3.2.3.2	Helmholtz zur Abschätzung der Lebensdauer der Sonne	52
3.3	Thermodynamik	55
3.3.1	Die Erhaltung als Gesetz in der Thermodynamik: Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik	55
3.3.2	Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Thermodynamik: Die Erhaltung in der kinetischen Gastheorie	56
3.3.3	Die Erhaltung als Denkprinzip in der Thermodynamik	57
3.3.3.1	Aus der Geschichte der Thermodynamik: Carnot zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Dampfmaschinen	57
3.3.3.2	Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik	58
3.4	Elektrodynamik	60
3.4.1	Die Erhaltung als Gesetz in der Elektrodynamik	60
3.4.1.1	Der Ladungserhaltungssatz	60
3.4.1.2	Der Energieerhaltungssatz der Elektrodynamik: Der Satz von Poynting	61
3.4.2	Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Elektrodynamik	63
3.4.2.1	Der Energieumsatz bei der elektromagnetischen Induktion	63
3.4.2.2	Der Energieumsatz im elektrischen Stromkreis	64
3.4.2.3	Energieerhaltung beim Transformator	69
3.4.3	Die Erhaltung als Denkprinzip in der Elektrodynamik: Die Idee des elektrischen Feldes	69
3.5	Moderne Physik	72
3.5.1	Die Erhaltung als Gesetz in der modernen Physik	72
3.5.1.1	Die Verschmelzung der Erhaltungssätze der Mechanik durch die Relativitätstheorie	72
3.5.1.2	Der Energieerhaltungssatz der Quantentheorie	74

INHALTSVERZEICHNIS

3.5.2	Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der modernen Physik: Der Teilchencharakter des Lichts - Die Erhaltung als Erklärungsgrundlage des lichtelektrischen Effekts und des Compton-Effekts	76
3.5.3	Die Erhaltung als Denkwerkzeug in der modernen Physik	78
3.5.3.1	Atommodelle und das Erhaltungsprinzip	78
3.5.3.2	Der β -Zerfall	84
3.6	Zusammenfassung	84
3.6.1	Die Erhaltung als Gesetz	84
3.6.2	Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit	86
3.6.3	Die Erhaltung als Denkprinzip	88
4	Zum didaktischen Potential des Erhaltungsgedankens	91
4.1	Das didaktische Potential der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit	91
4.1.1	Die Lerntheorie Ausubels	92
4.1.1.1	Lernpsychologische Aspekte des sinnvollen Lernens	92
4.1.1.2	Die Bedingungen des sinnvollen Lernens	95
4.1.2	Die Rolle von Analogien im Physikunterricht	96
4.1.2.1	Allgemeines zu Analogien	97
4.1.2.2	Der allgemeine didaktische Nutzen von Analogiebetrachtungen im Physikunterricht	98
4.1.2.3	Die Gefahren von Analogiebetrachtungen im Physikunterricht	98
4.1.3	Die Erhaltung als Grundlage für Analogien	99
4.1.4	Der spezielle Nutzen von Analogien zur Vermittlung der Erhaltung als Denkprinzip	103
4.1.5	Unterrichtsbeispiel zum elektrischen Feld	104
4.1.5.1	Zur didaktischen Schwerpunktsetzung der Unterrichtsreihe	104
4.1.5.2	Zu den Voraussetzungen und Vorgaben der Unterrichtsreihe	106
4.1.5.3	Skizze der Unterrichtsreihe	108
4.2	Das didaktische Potential der Erhaltung als Denkprinzip	119
4.2.1	Zur Aufgabenkultur im Physikunterricht	120
4.2.2	Fermiaufgaben als Vorschlag zur Verbesserung der Aufgabenkultur	122
4.2.3	Wissenszentriertes Problemlösen in der Physik	124
4.2.4	Die Erhaltung als Problemlöswerkzeug	126
4.2.5	Beispiele zum Problemlösecharakter der Erhaltung als Denkprinzip	128
4.2.5.1	Wieviele Sklaven waren zum Bau der Cheops-Pyramide nötig?	128
4.2.5.2	Wie weit kommt man mit einem vollgetankten Auto?	130
4.2.5.3	Wie tief ist ein Krater, den ein Meteorit beim Aufprall auf einen Planeten schlägt?	132
4.2.5.4	Ist das Szenario aus dem Film „Amageddon“ (1999) realistisch ?	133

INHALTSVERZEICHNIS

4.2.5.5	Kann sich Nordkorea im Falle eines totalen Wirtschaftsembargos selbst versorgen?	134
4.2.5.6	Schlussfolgerung aus den Beispielen zur Nutzung der Erhaltung als Denkprinzip	136
5	Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes	137
5.1	Allgemeines zur Schulbuchanalyse und die Zielsetzung in dieser Arbeit	137
5.2	Die verwendete Methode	138
5.3	Analyse der Schulbücher	142
5.3.1	Auswahl der Schulbücher	142
5.3.2	Bestimmung der Analyseeinheit (1.Schritt der StIA)	144
5.3.3	Bestimmung der Hauptkategorien und Kategorien (2.und 3.Schritt der StIA)	144
5.3.4	Formulierung von Ankerbeispielen und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien (4. Schritt der StIA)	148
5.3.5	Materialdurchlauf (5. und 6. Schritt der StIA)	149
5.3.5.1	Der Erhaltungsgedanke im Metzler (01)	149
5.3.5.2	Der Erhaltungsgedanke in Impulse Physik (02)	152
5.3.5.3	Der Erhaltungsgedanke im Cornelsen Gesamtband (03)	155
5.3.5.4	Der Erhaltungsgedanke im Duden (04)	158
5.3.5.5	Der Erhaltungsgedanke im Dorn Bader (05)	161
5.3.5.6	Der Erhaltungsgedanke in Kuhn Physik 2 (06)	164
5.3.6	Überarbeitung und Revision des Kategoriensystems und der Kategoriedefinition (7. Schritt der StIA)	167
5.3.7	Ergebnisinterpretation (8. Schritt der StIA)	167
5.3.7.1	Die Rolle der Erhaltung als Gesetz in den Schulbüchern	167
5.3.7.2	Die Rolle der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Schulbüchern	169
5.3.7.3	Die Rolle der Erhaltung als Denkprinzip in den Schulbüchern	171
5.3.7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	173
5.4	Analyse der Lösungsbücher	173
5.4.1	Allgemeines zu den Lösungsbüchern	173
5.4.2	Bestimmung der Analyseeinheit (1.Schritt der StIA)	176
5.4.3	Bestimmung der Hauptkategorien und Kategorien (2.und 3.Schritt der StIA)	176
5.4.4	Formulierung von Ankerbeispielen und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien (4. Schritt der StIA)	176
5.4.5	Materialdurchlauf (5. und 6. Schritt der StIA)	177
5.4.5.1	Der Erhaltungsgedanke im Metzler (01)	177
5.4.5.2	Der Erhaltungsgedanke in Impulse Physik (02)	184
5.4.5.3	Der Erhaltungsgedanke im Cornelsen Gesamtband (03)	188
5.4.5.4	Der Erhaltungsgedanke im Duden (04)	195
5.4.5.5	Der Erhaltungsgedanke im Dorn Bader (05)	198

INHALTSVERZEICHNIS

5.4.5.6	Der Erhaltungsgedanke in Kuhn Physik 2 (06) . . .	201
5.4.6	Überarbeitung und Revision des Kategoriensystems und der Kategoriedefinition (7. Schritt der StIA)	204
5.4.7	Ergebnisinterpretation (8. Schritt der StIA)	205
5.4.7.1	Die Rolle der Erhaltung als Gesetz in den Lö- sungsbüchern	205
5.4.7.2	Die Rolle der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Lösungsbüchern	207
5.4.7.3	Die Rolle der Erhaltung als Denkprinzip in den Lösungsbüchern	209
5.4.7.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	211
6	Ergebnisse und Empfehlungen	212
	Abbildungsverzeichnis	218
	Tabellenverzeichnis	220
	Literaturverzeichnis	222

Vorwort

Vorab möchte ich allen danken, die mir bei der Entstehung dieser Arbeit zur Seite gestanden haben.

Dabei geht ein besonderer Dank an meine liebe Frau Ina, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nie entstanden wäre. Meinen Eltern bin ich auch für ihren Zuspruch zum Dank verpflichtet.

Herrn Prof. Dr. O. Schwarz bin ich für die ausführliche Betreuung dieser Arbeit recht herzlich dankbar. Auch allen weiteren Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe, Dr. Henrik Bernshausen, Ina Militschenko, Adrian Weber, Christian Deitersen, Chat Tran, Simon Kraus, Sabine Schirm-Springob und Christoph Springob sowie den studentischen Hilfskräften Kira Domnowski und Miguel Meckel danke ich für die zahlreichen Unterstützungen.

Der Schulleitung des Johanneum Gymnasiums in Herborn danke ich für die Möglichkeit, die konzipierte Unterrichtsreihe (Abschnitt 4.1.5) erproben zu können. Über aller an Menschen gerichteten Danksagung gilt jedoch:

soli deo gloria!

Diese Arbeit wurde in L^AT_EX unter der Verwendung des LaTeX Editors (LEd) geschrieben. Die Zeichnungen und Skizzen entstanden mit CorelDRAW X5. Die Diagramme wurden mit Microsoft Excel 2010 angefertigt.

Kapitel 0

Überblick

Diese Arbeit will Lehrenden der Physik eine Möglichkeit aufzeigen, wie beim Vermitteln von Physik beim Lernenden auch das konzeptionelle Verständnis für Physik zu fördern ist. Dieses baut auf der Kenntnis der Gesetze, Phänomene und Methoden der Physik auf, beinhaltet darüberhinaus aber noch das Verständnis der grundlegenden Prinzipien der Physik, die einem helfen, das komplexe Theoriegeflecht der Physik zu strukturieren und zu systematisieren. Ein strukturiertes und systematisiertes Verständnis allein macht aber noch nicht das konzeptionelle Verständnis der Physik aus. Es gilt auf den grundlegenden Prinzipien aufbauend noch die Leitideen der Physik zu verinnerlichen, die einem helfen, selbständig und kreativ physikalisch zu denken. Physikalisches Denken meint dabei das einfallsreiche Abschätzen, das sinnvolle Interpretieren, sowie das effektive Problemlösen in der Physik mit physikalischen Denkprinzipien und nicht nur mit allgemeinen heuristischen Prinzipien.

In dieser Arbeit wird durch eine wissenschaftstheoretische und wissenschaftshistorische Sicht auf die Physik die Erhaltung als ein strukturierendes und systematisierendes Grundprinzip vorgestellt. Des Weiteren fungiert das Erhaltungsprinzip auch als ein Denkprinzip, das in der Geschichte der Physik immer wieder effektiv genutzt wurde und auch heute im Schulunterricht als Problemlöseswerkzeug nützliche Dienste erweist.

Darauf aufbauend wird gezeigt, wie die Erhaltung in diesen zwei Rollen - als Basiskonzept und Problemlöseswerkzeug - für den Unterricht genutzt werden kann. Dabei stehen ein klar strukturierter und mit bekanntem Wissen verwobener Un-

Kapitel 0 Überblick

terricht, sowie die Vermittlung physikalischer Denkprinzipien zum Lösen offener Aufgaben im Fokus dieser didaktischen Betrachtungen. Zur möglichen Umsetzung ist eine Unterrichtsreihe zum elektrischen Feld konzipiert worden, die auch in einer zwölften Klasse erprobt wurde.

Welche Bedeutung der Erhaltung bisher im Physikunterricht beigemessen wird, wird durch eine Schulbuchanalyse gezeigt. Dabei werden sechs gängige Schulbücher der gymnasialen Oberstufe, sowie deren Lösungsbücher untersucht. Dabei wird deutlich, dass die Förderung des konzeptionellen Verständnisses der Physik in den Schulbüchern noch ausbaufähig ist.

Kapitel 1

Einleitung

Die Forschungsfragen, die in der vorliegenden Arbeit behandelt werden, können nur in einem angemessenen, teilweise speziell für die Belange dieser Untersuchung definierten Begriffsrahmen sinnvoll gestellt werden (siehe Abschnitt 2.3).

Grundsätzlich geht es aber im Kern um die Frage, aus welchen Elementen sich die Fähigkeit physikalisch zu denken konstituiert und wie sich bei Lernenden Kompetenzen - insbesondere die Problemlösekompetenz - im eigenständigem Denken entwickeln können.

Dem konkreten Anliegen dieser Arbeit gehen folglich ganz allgemeine Erwägungen voran.

1.1 Das zugrundeliegende Verständnis von Physikdidaktik

Die Didaktik der Physik ist die Wissenschaft des Lehrens von Physik. Sie versucht u.a. folgende Fragen zu beantworten:

- Wie soll eine Unterrichtsreihe konzipiert sein?
- Welche Rolle spielt das Experiment im Physikunterricht?
- Wie sind Aufgaben im Unterricht einzusetzen?
- Wie geht man mit Schülervorstellungen um?
- usw.

Physikdidaktik ist eine Kombination aus der Physik als Fachwissenschaft und der allgemeinen Didaktik - nicht nur vom Begriff her, sondern auch ihrem Wesen nach. Dem Verständlichmachen geht das Verstehen voraus, deshalb sollte der Fachdidaktiker auch fachlich bewandert sein. Außerdem muss der Physikdidaktik ein fundamentales Verständnis vom Lehren und Lernen allgemein zugrundeliegen. Deshalb spielen auch Psychologie, Pädagogik und Soziologie in die Physikdidaktik mit ein.

Im Hinblick auf den Zusammenhang zwischen der Physik als Fachwissenschaft und ihrer Didaktik sei aber betont, dass sich der Physikdidaktiker deutlich vom Fachphysiker unterscheidet. Der Physiker ist weit mehr Experte in seinem Teilgebiet der Physik als der Physikdidaktiker, wo hingegen der Physikdidaktiker eine umfassendere Draufsicht auf die Physik vorweisen sollte, als der Physiker. Der Physikdidaktiker sollte in allen Teilgebieten der Physik zu Hause sein, ein ausgeprägtes physikalisches Allgemeinwissen an den Tag legen, sowie zahlreiche Querverbindungen zwischen den Teilgebieten der Physik sehen. Darüber hinaus kann sich der Physikdidaktiker von dem Fachwissenschaftler in seinem methodischen und konzeptionellen Verständnis der Physik unterscheiden. Dem Fachwissenschaftler mag ein solcher Mangel an methodischem Verständnis der Physik noch verziehen werden, da er in seinem Teilgebiet erfolgreich forschen kann, doch beim Physikdidaktiker hat mangelndes wissenschaftstheoretisches Verständnis schwerwiegendere Folgen. In seinem Vortrag zum Thema „Wissenschaftstheorie und Physikdidaktik“ (Kuhn, 1984) legt W. Kuhn nahe, aus welchem Grund sich die Didaktik der Physik mit Wissenschaftstheorie befassen sollte. Die Notwendigkeit der Wissenschaftstheorie für die Didaktik wird an Fragestellungen deutlich, wie sie im Folgenden exemplarisch erwähnt sind:

Welche Rolle spielt das Experiment in der Physik?

Das Experiment erfreut sich zahlreicher Anwendungen im Physikunterricht. Doch nicht selten sind Physiklehrer dem Irrtum erlegen, das Experiment sei für die Theoriebildung hinreichend. Es mangelt Lehrenden oft an wissenschaftstheoretischem Verständnis, um die experimentelle Methode im Unterricht korrekt anzu-

wenden und zu vermitteln¹.

Wie entsteht eine physikalische Theorie?

Würde diese Frage überhaupt gestellt werden, wäre dies für manch einen Physikunterricht schon ein großer Fortschritt. Die Theorie wird in ihrer bekannten Form mit ihren Begriffen und Gesetzen oft als „vom Himmel gefallen“ vorausgesetzt. Welches Ringen von genialen Köpfen hinter dem Entstehen dieser so runden und scheinbar abgeschlossenen Theorie standen, wird nicht betont. Dabei birgt die Frage nach dem Entstehungsprozess physikalischer Theorie einiges an methodischem und konzeptionellem Verständnis.

Wie sieht der Wirklichkeitsbezug physikalischer Theorien aus?

Wer als Lehrender nicht zwischen Naturphänomen, Modell und mathematischer Beschreibung des Modells unterscheiden kann, wird zwangsläufig Fehlvorstellungen bei seinen Schülern schüren. Um die Frage zu beantworten, wie Gesetze im Physiklehrbuch die Wirklichkeit abbilden, muss ein Physiklehrer über ein wissenschaftstheoretisches Verständnis verfügen. Nicht selten werden extreme Positionen vertreten, wonach die Gesetze der Physik die Natur im Verhältnis 1:1 abbilden, oder dass die Gesetze nur Konsens zwischen den Physikern sind und scheinbar nichts mit der Wirklichkeit zu tun haben.

Damit eng verbunden ist auch die Frage:

Welchen Einfluss hat die Metaphysik auf die Theoriebildung?

Ist das Verständnis von Physik wirklich so, wie es Robert Hook (1635-1702) einmal als Aufgabe der Royal Society formuliert hat:

„Aufgabe der Royal Society ist es, die Kenntnisse der Natur zu erweitern [...] sich aber nicht mit Theologie, Metaphysik, Moral, Politik, Grammatik, Rhetorik oder Logik zu beschäftigen.“ (Holton, 1984, S. 2)

Belegt nicht die Geschichte der Physik vielfach, dass gerade die metaphysische Überzeugung maßgeblich zur Theoriebildung beigetragen hat?

¹Mehr dazu kann in dem Artikel „Die Theorie des Experiments“ von O. Schwarz nachgelesen werden (Schwarz, 2009).

Wissenschaftstheoretisch orientierte Fragen dieser Art lassen sich aber erst mit Hilfe der Physikgeschichte hinreichend beantworten. In seinen zahlreichen Publikationen wies W. Kuhn darauf hin, dass die Beziehung zwischen Physikdidaktik und Wissenschaftstheorie allein für die Belange der Vermittlung physikalischen Wissens noch nicht vollständig ist. Hinzu kommt noch die Geschichte der Physik, da diese mit der Wissenschaftstheorie eng verflochten ist. Erst aus der historischen Analyse lassen sich die Fragen, die die Didaktik an die Wissenschaftstheorie stellt, hinreichend beantworten². Wörtlich meint er:

„Die Herausbildung der physikalischen Methode lässt sich als geistesgeschichtliches Ereignis ersten Ranges nur im Rahmen einer didaktisch intendierten historischen Analyse voll verstehen.“ (Kuhn, 2000, S. 31)

Somit sollte der Didaktiker die Physik in ihrer gegenwärtigen Form nicht als „vom Himmel gefallen“ verstehen, sondern als Momentaufnahme eines geschichtlichen Entstehungsprozesses. Auf diesem historischen Verständnis basiert die wissenschaftstheoretische Sicht auf die Physik. Dasselbe betonen auch weitere Physikhistoriker wie etwa Friedrich Hund:

„Man lernt Physik meist aus einem Lehrbuch, das auf kurzem Weg das für richtig gehaltene Wissen plausibel macht oder nur systematisch darstellt. Der Leser gewöhnt sich so an die Begriffe und an die Sätze [...]. So haben sich zum Beispiel die Physiker daran gewöhnt, dass das Licht auf elektromagnetischen Wellen beruht, dass die Wärme eine Energieform ist [...]. Die Gründe dafür, die Zweifel daran und viele Schwierigkeiten, die eine solche Vorstellung bot, werden nicht mehr diskutiert. So werden auch die grundlegenden Begriffe der Physik nicht mehr voll verstanden.“ (Hund, 1972, S. 11)

Oder auch Max Jammer:

²Andererseits macht eine historische Analyse für den Didaktiker erst dann Sinn, wenn sie unter wissenschaftstheoretischer Fragestellung geschieht (Kuhn, 2000). Physikdidaktik, Wissenschaftstheorie und Physikgeschichte stehen also in einer wechselseitigen Beziehung.

„Was Physik eigentlich ist, lässt sich nur im historischen Kontext verstehen.“ (Jammer, 1964)

Den Zusammenhang zwischen Wissenschaftstheorie und Wissenschaftshistorie kann man wie folgt zusammenfassen:

„Wissenschaftstheorie ohne Wissenschaftsgeschichte ist leer.
Wissenschaftsgeschichte ohne Wissenschaftstheorie ist blind.“ (Hübner, 1978)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Verständnis von Physikdidaktik, welches dieser Arbeit zugrunde liegt, auf einer wissenschaftstheoretischen, historischen und fachlichen Grundlage basiert. In Abbildung 1.1 ist dies nochmal verdeutlicht: Das Gebäude der Physikdidaktik steht auf einem Fundament, das sich zum (größeren) Teil aus der Physik als Fachwissenschaft und zum anderen Teil aus der allgemeinen Didaktik zusammensetzt. Der fachliche Teil des Fundamentes wiederum gründet sich auf einem wissenschaftstheoretischen Verständnis der Physik. Gute Physikdidaktik nimmt zusätzlich wahr, dass der gegenwärtige Kenntnisstand in einen geschichtlichen Prozess eingebettet ist, in dem er sich entwickelt hat und noch weiter entwickeln wird.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll eine Möglichkeit zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses der Physik bei ihrer Vermittlung beschreiben³. Ein gewisses Maß an konzeptionellem Verständnis ist für das Verständnis der Physik allgemein unabdingbar. Physikalisches Verständnis beinhaltet mehr als enzyklopädische Physikkenntnis. So soll sich die Schulphysik bekanntlich auch nicht nur auf die Vermittlung physikalischer Gesetze beschränken, sondern die Kernlehrpläne für die Sekundarstufe und die einheitlichen Prüfungsanforderungen in der Abiturstufe (EPA) umspannen neben der fachlichen auch noch weitere Kompetenzen. Doch

³Ob der in dieser Arbeit aufgewiesene Weg signifikant zur Verbesserung des konzeptionellen Verständnisses der Physik beiträgt, müsste noch empirisch untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll lediglich das Konzept dargestellt werden.

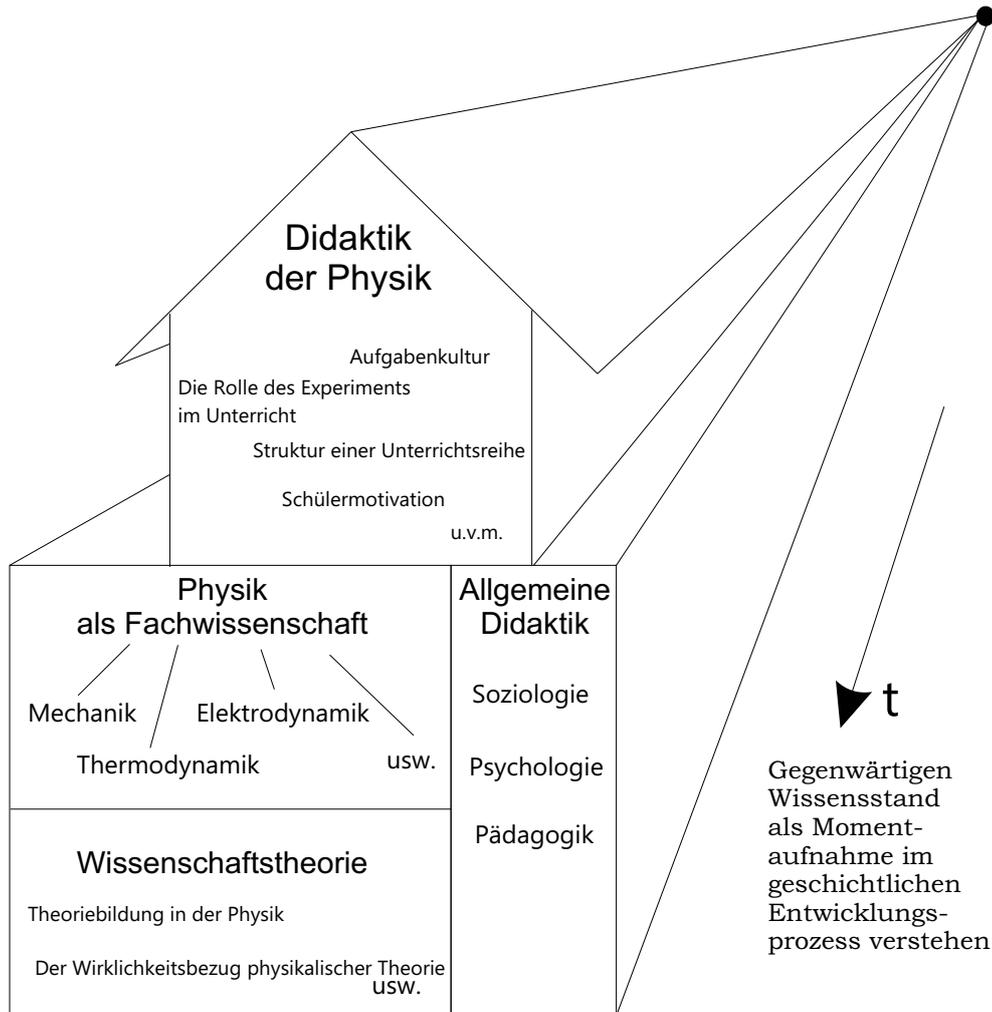


Abbildung 1.1: Das zugrundeliegende Verständnis von Didaktik der Physik

was macht konzeptionelles Verständnis der Physik aus?

Das Kompetenzmodell, wie es in den Kernlehrplänen für die Sekundarstufe vorgestellt wird, beinhaltet die Kompetenzbereiche „Fachwissen“, „Erkenntnisgewinnung“, „Kommunikation“, „Bewertung“ (Kernlehrplan, 12.03.2007). Desweiteren sehen die Vorgaben eine Strukturierung des Wissens gemäß sogenannter „Basiskonzepte“ vor. Es lassen sich demnach im Kompetenzmodell die Dimensionen „Kompetenzbereich“ (Fachwissen, Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung), „Anforderungsniveau“ (Wiedergabe, Anwendung und Transfer) und „Basiskonzept“ (Energie, Materie, Wechselwirkung und System) unterscheiden (siehe Abbildung 1.2). Basiskonzepte haben zum Ziel den Wissensaufbau zu

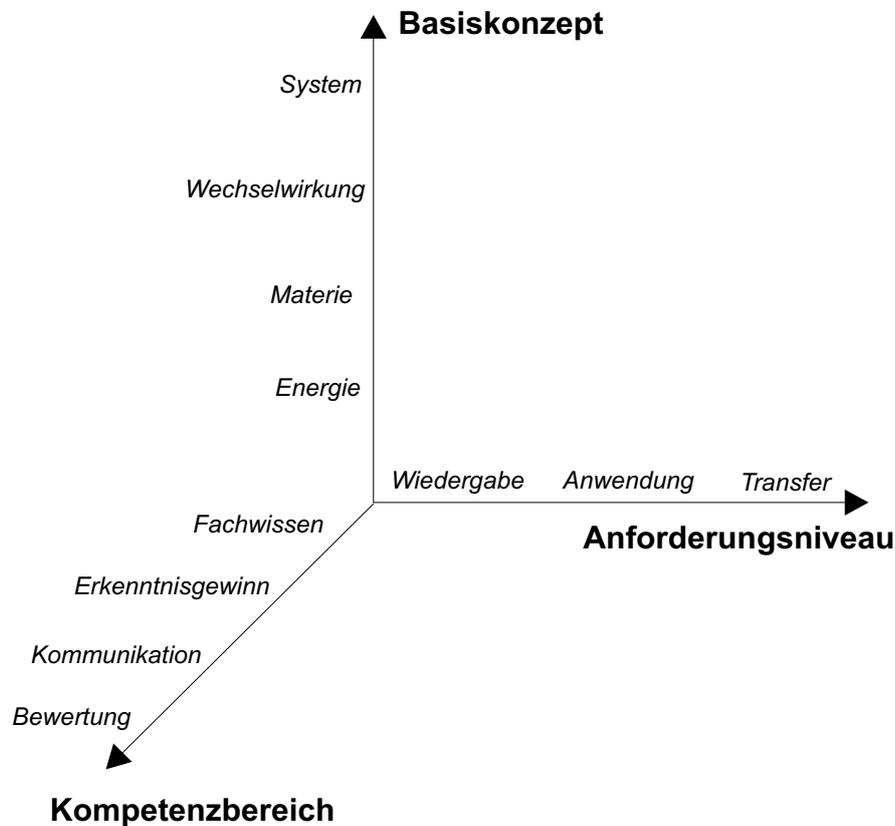


Abbildung 1.2: Die Dimensionen des Kompetenzmodells (Schecker, 2010)

systematisieren. Wörtlich heißt es in der Entwurfsversion der Kernlehrpläne für Realschulen in Nordrhein-Westfalen:

„Basiskonzepte sind grundlegende, für den Unterricht eingegrenzte und für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbare Ausschnitte fachlicher Konzepte und Leitideen. Sie stellen elementare Prozesse, Gesetz-

Kapitel 1 Einleitung

mäßigkeiten und Theorien der naturwissenschaftlichen Fächer strukturiert und vernetzt dar. Sie beinhalten zentrale, aufeinander bezogene naturwissenschaftliche Begriffe, erklärende Modellvorstellungen und Theorien, die sich in dem jeweiligen Fach zur Beschreibung elementarer Phänomene und Prozesse als relevant herausgebildet haben. Dabei erheben sie nicht den Anspruch, jeweils das gesamte Fach vollständig abzubilden. Die besondere Bedeutung der Basiskonzepte für das Lernen besteht darin, dass mit ihrer Hilfe schulische Inhalte der einzelnen naturwissenschaftlichen Fächer sinnvoll strukturiert werden und die fachlichen Beziehungen durch den Konzeptgedanken über die gesamte Lernzeit miteinander verbunden werden können. Basiskonzepte bilden als strukturierte Wissensbestände den Rahmen, in dem neue Erfahrungen mit schon erworbenen Kenntnissen verbunden werden. Sie erleichtern so den kontinuierlichen Aufbau von fachlichen Kompetenzen im Sinne kumulativen Lernens und den Erwerb eines grundlegenden, vernetzten Wissens. Sie helfen, Vorgänge in der Natur zu verstehen, bei neuen Phänomenen und Fragestellungen bekannte Zusammenhänge sowie Strukturen zu erkennen und zur Erklärung heranzuziehen. Sie werden Schritt für Schritt entwickelt und in unterschiedlichen Kontexten erweitert. Dadurch, dass Basiskonzepte durch alle Jahrgangsstufen hindurch in Kontexten erkenntniswirksam immer wieder aufgegriffen, thematisiert und weiter ausdifferenziert werden, bilden sie übergeordnete Strukturen im Entstehungsprozess eines vielseitig verknüpften Wissensnetzes. Fachinhalte können dabei aus unterschiedlichen Konzeptperspektiven betrachtet und aus der Sicht des jeweiligen Basiskonzepts strukturiert vernetzt werden.“ (Kernlehrplan, 12.03.2007, S. 9)

Konkret werden für die Sekundarstufe die Basiskonzepte „Energie“, „Materie“, „Wechselwirkung“ und „System“ genannt. Das, was in den Bildungsstandards mit Basiskonzept betitelt ist, entspricht in gewisser Weise dem, was in der vorliegenden Arbeit „Gesetzmäßigkeit“ genannt wird (siehe dazu Abschnitt 2.2.2). Die Erhaltung spielt bei den in den Kernlehrplänen für die Sekundarstufe an-

geführten Basiskonzepten eine eher untergeordnete Rolle. Genannt wird sie vor allem beim Basiskonzept Energie, wobei explizit darauf hingewiesen wird, dass das Verständnis der Energieerhaltung bei den Schülerinnen und Schülern in der Mittelstufe noch nicht entwickelt ist.

Die vorliegende Arbeit will den Gedanken des Basiskonzepts in gewisser Weise aufgreifen (allerdings unter dem Namen Gesetzmäßigkeit). Es sei darauf hingewiesen, dass Basiskonzepte nicht exakt mit dem in dieser Arbeit verwendeten Begriff der Gesetzmäßigkeit gleichgesetzt werden können, sondern dass nur gewisse Ähnlichkeiten bestehen. Es soll auch keine vollständige Liste solcher Gesetzmäßigkeiten erstellt werden, sondern es soll exemplarisch an der Erhaltung aufgezeigt werden, wie eine solche Gesetzmäßigkeit zum strukturierten und vernetzten Lehren bzw. Lernen von Physik fruchtbar gemacht werden kann.

Darüberhinaus soll in dieser Arbeit darauf eingegangen werden, dass Basiskonzepte (oder Gesetzmäßigkeiten) für das konzeptionelle Verständnis von Physik noch nicht hinreichend sind. Wohl leisten sie durch die Strukturierung und Vernetzung physikalischen Wissens notwendige didaktische Dienste, für das eigenständige, kreative physikalische Denken reicht eine gute Struktur des Wissens aber noch nicht aus. Beim Herleiten neuer Formeln oder beim Bearbeiten offener Fragestellungen sind Denkprinzipien gefragt. Solche Fähigkeiten werden von unseren Schülern erwartet. So heißt es beispielsweise in den EPA:

(Prüflinge...) „haben Erfahrungen mit Strategien der Erkenntnisgewinnung und Problemlösung (z.B. Beobachten, intuitiv-spekulatives Entdecken, Hypothesen formulieren, induktives, deduktives Vorgehen, analoges Übertragen, Modellbilden).“ (Kultusministerkonferenz, 1989, i.d.F.v. 05.02.2004, S. 3)

Leider beschreiben die Vorgaben des Kultusministeriums nicht, wie diese Problemlösekompetenz zu vermitteln ist. So beschränkt sich der Physikunterricht beim Bearbeiten von Problemen meist auf allgemeine heuristische Prinzipien. Dem Fach entsprechende Denkschemata werden als solche im Unterricht nicht betont, dabei macht ein Vorgehen entsprechend der fachspezifischen Denkschemata die höchste Form des anfangs erwähnten konzeptionellen Verständnisses von Physik aus (siehe Abbildung 1.3). Erst ein solches physikalisches Denken befähigt

neue Fragestellungen physikalisch anzugehen, bei offenen Fragen geschickt abzuschätzen oder Resultate physikalisch zu interpretieren. Der Weg zu solch einem physikalischen Denken besteht einerseits darin, die Leitideen der Physik aus einer wissenschaftstheoretischen Analyse der Physikgeschichte zu lernen, andererseits generieren bestimmte Vorgehensweisen durch vielfaches Bearbeiten physikalischer Probleme feste Denkschemata. In dieser Arbeit soll die Erhaltung als eine solche

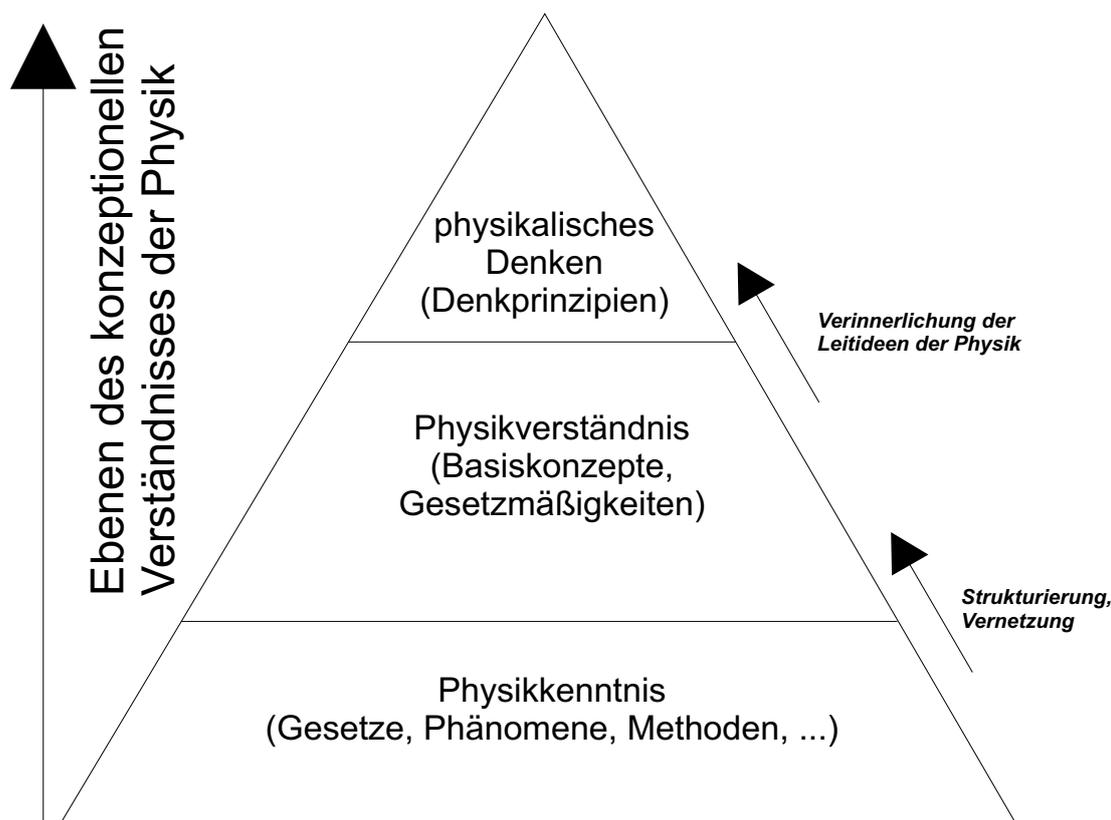


Abbildung 1.3: Hierarchie des konzeptionellen Verständnisses von Physik

Leitidee der Physik vorgestellt werden. Die Rolle der Erhaltung als Denkprinzip in der Physik wird aus der wissenschaftstheoretischen Analyse der Physik erkannt. Darauf aufbauend sollen Vorschläge formuliert werden, wie die Erhaltung als Denkprinzip im Physikunterricht vermittelt und genutzt werden kann. Das Ziel besteht darin, physikalisches Denken, und damit konzeptionelles Verständnis, bei den Schülerinnen und Schülern zu fördern.

Zusammenfassend kann man sagen, dass diese Arbeit die Zielsetzung verfolgt, die Rolle der Erhaltung als strukturierende Gesetzmäßigkeit der Physik und als Denkprinzip beim Betreiben von Physik vorzustellen und auf den Physikunterricht anzuwenden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit entspricht dem in Abschnitt 1.1 dargestellten Verständnis von Physikdidaktik. Den didaktischen Überlegungen dieser Arbeit geht eine fachliche Untersuchung der Physik voraus, die wiederum auf wissenschaftstheoretischen Überlegungen fußt.

Bevor die eben beschriebene Zielsetzung der Arbeit in konkrete Forschungsfragen übersetzt werden kann, müssen einige Grundlagen elaboriert werden (Kapitel 2). Da der Begriff des Denkprinzips auf einer wissenschaftstheoretischen Betrachtung der Physik fußt, müssen einleitend einige wissenschaftstheoretische Sichtweisen auf die Physik erörtert werden (Abschnitt 2.1). Auf dieser Grundlage werden dann die Begriffe „Gesetz“, „Gesetzmäßigkeit“ und „Denkprinzip“ definiert und erläutert (Abschnitt 2.2). Diese Begriffe sind für die vorliegende Arbeit von elementarer Bedeutung. Erst auf dieser Grundlage können die Forschungsfragen der Arbeit ausformuliert werden (Abschnitt 2.3).

An diese grundlegenden Überlegungen schließen sich Überlegungen aus rein fachphysikalischer Sicht an (Kapitel 3). Dabei wird die Rolle der Erhaltung in allen physikalischen Teilgebieten reflektiert. Das Niveau dieser Betrachtungen liegt etwas über dem Niveau der Schule, ist aber an diesem orientiert. Dieses Kapitel verfolgt nicht nur das Ziel, diverse Nennungen der Erhaltung als wohlvertraute Gesetze aufzulisten, sondern soll auch die strukturierende Eigenschaft der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit ersichtlich machen, sowie die Effektivität der Erhaltung als Denkprinzip aufzeigen. Letzteres wird vor allem aus historischen Betrachtungen deutlich.

In Kapitel 4 wird auf die aus der Bedeutung des Erhaltungsgedankens für die Physik resultierenden didaktischen Möglichkeiten für den Physikunterricht hingewiesen. In diesem Kapitel wird zwischen dem didaktischen Potential das sich aus der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit ergibt (Abschnitt 4.1) und dem aus der Eigenschaft eines Denkprinzips (Abschnitt 4.2) differenziert. Im ersten Abschnitt wird dabei auf den Zweck der Vernetzung und Strukturierung der Wissens Elemente beim Lernen von Physik eingegangen. Wie eine mögliche Umsetzung dieses didaktischen Potentials aussehen kann, die zudem noch die Erhaltung als Denk-

Kapitel 1 Einleitung

prinzip vermittelt, ist in einer exemplarischen Unterrichtsreihe zum elektrischen Feld vorgestellt (Abschnitt 4.1.5). Die didaktischen Möglichkeiten der Erhaltung als Denkprinzip, die im zweiten Abschnitt des Kapitels 4 vorgestellt werden, ergeben sich vor allem aus dem Problemlöswerkzeug-Charakter der Erhaltung. Nach allgemeinen didaktischen Erwägungen, werden verschiedene Aufgabenbeispiele angefügt, die das Potential der Erhaltung als Denkprinzip demonstrieren. In Kapitel 5 wird der Frage nachgegangen, ob und wie dieses Potential in der Schulpraxis ausgeschöpft wird. Zur Beantwortung dieser Frage wird die Methode der Schulbuchanalyse eingesetzt. Der Autor ist sich darüber im Klaren, dass diese Vorgehensweise konkreten Unterricht im Einzelnen nicht abbildet. Hier geht es aber um ein generelles Problem des Physikunterrichts, quasi um eine mittlere Aussage über den Physikunterricht schlechthin. In Kapitel 6 sind die Ergebnisse der Arbeit nochmal zusammengefasst und mögliche Ausblicke formuliert.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Einige wissenschaftstheoretische Sichtweisen auf die Physik

Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht möglich, eine vollständige, wissenschaftstheoretische Darstellung der Physik darzustellen. Es sollen einige der bekanntesten Wissenschaftstheoretiker genannt und ihre Theorien nur überblicksartig dargestellt werden. Der Zweck dieses Abschnittes ist die Betonung der Tatsache, dass es sich bei der Physik um Prinzipienwissenschaft handelt.

2.1.1 Der Falsifikationismus von Karl Popper

Die wissenschaftstheoretische Sicht Karl Poppers (1902-1994), die er vor allem in dem Werk „Logik der Forschung“ (Popper, 1994) dargestellt hat, basiert vorwiegend auf der Kritik der induktiven Methode. Das Problem bezüglich der induktiven Methode ist erstmals von Immanuel Kant (1724-1804) formuliert worden, als dieser sich mit der newtonschen Gravitationstheorie befasst hat¹. Wie Kant darstellt, kann es aufgrund der Regeln der Logik nicht stimmen, dass Newton seine Gravitationstheorie nur aus der Beobachtung heraus entdeckt hat, wie dies von den Empiristen behauptet wurde. Diese empiristische Sicht auf die physikalische Theoriebildung kritisiert Popper, auf Kants Werken aufbauend, in drei

¹Besonders deutlich hat Popper diesen Ursprung seiner Kritik an der induktiven Methode in dem Kapitel „Über die Stellung der Erfahrungswissenschaft und der Metaphysik“ in seinem Buch „Vermutungen und Widerlegungen“ (Popper, 2009) dargestellt.

Punkten (Popper, 2009, S. 287): Erstens sei diese Behauptung unglaubwürdig, da eine Theorie einen anderen Charakter als Beobachtungssätze² trage, zweitens weil die Behauptung historisch nicht der Wahrheit entspreche und drittens, weil die Behauptung vom Standpunkt der Logik gesehen unmöglich sei.

Popper merkt an, dass bereits Kant auf das Problem der induktiven Methode aufmerksam gemacht habe, aber noch keine befriedigende Lösung formuliert habe. Diese Lösung sei Popper selbst gelungen, weil er in einer günstigeren Zeit lebte als Kant. Zur Zeit Poppers wurde die newtonsche Mechanik durch Einsteins Relativitätstheorie revidiert und damit im gewissen Sinne falsifiziert. Dieser Umstand regte Popper an, den sogenannten Falsifikationismus zu begründen. Dieser besagt, dass die Induktion nicht nur falsch sei, sondern dass es so etwas wie Induktion gar nicht gibt. Jeder Forscher ist voreingenommen, oder wie Popper es nennt: „theoriegeladen“. Damit kann nicht vom Konkreten auf die Allgemeinheit geschlossen werden, da die allgemeingültige Aussage schon existiert, bevor man sich dem Konkreten widmet. Wörtlich heißt es etwa in dem Buch „Alles Leben ist Problemlösen“:

„... , daß die Naturwissenschaft, historisch gesehen, als eine Art Niederschlag von metaphysischen entstanden ist.“ (Popper, 1994, S. 149)

Oder auch:

„Historisch betrachtet, sind ja alle empirischen Wissenschaften aus der nichtempirischen, der spekulativ-philosophischen „Metaphysik“ hervorgegangen.“ (Popper und Hansen, 1979, S. 348)

Dabei stellt sich die Frage, wie empirisch- wissenschaftliche Sätze und Metaphysik voneinander abzugrenzen sind. Diese Frage nennt Popper das Abgrenzungsproblem, welches, zusammen mit dem Induktionsproblem, die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie darstellt, wie er sie in dem gleichnamigen Buch (Popper und Hansen, 1979) vorstellt. Dieses Abgrenzungsproblem löst er mit dem sogenannten Abgrenzungskriterium, welches besagt, dass ein empirisch-wissenschaftliches System an Erfahrungen scheitern können muss. Ist eine Aussage nicht falsifizier-

²Beobachtungssätze meint hier die Beschreibung empirischer Befunde.

bar³, so ist sie nicht empirisch-wissenschaftlich und damit metaphysisch. Es sei aber nochmal betont, dass der metaphysische Einfluss in der Theoriebildung als kreativer Prozess nicht ausgeklammert wird, wie dies die Empiristen sahen, sondern sogar erwünscht ist, solange die Theorie als Ergebnis falsifizierbar bleibt. Nach Popper ist die Verifizierbarkeit einer Aussage nicht möglich. Ihre Wissenschaftlichkeit steht und fällt mit der Falsifizierbarkeit.

2.1.2 Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen nach

Thomas S. Kuhn

Die wissenschaftstheoretische Sicht Poppers wurde von Thomas S. Kuhn (1922-1996), einem weiteren bedeutenden Wissenschaftstheoretiker und Wissenschaftshistoriker des 20. Jahrhunderts, der vor allem durch sein Buch „Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen“ (Kuhn, 1996) bekannt wurde, scharf kritisiert. Konkret kritisierte Kuhn an Popper, dass seine Wissenschaftstheorie dem geschichtlichen Werdegang einer Theorie nicht gerecht werde. Kuhn sieht die Entwicklung einer Theorie in ihrer Geschichte diskontinuierlich. Diese beschreibt er durch den Wechsel sogenannter Paradigmen. Im normalen Wissenschaftsbetrieb herrschen von allen akzeptierte Paradigmen vor. In diesem Rahmen wird Normalwissenschaft betrieben. Wenn nun durch gewonnene Erkenntnisse oder rätselhafte Fragestellungen die Gültigkeit dieser Paradigmen angezweifelt wird, gerät die Wissenschaft in eine Krise, die dann in einem Paradigmenwechsel, einer wissenschaftlichen Revolution, gipfelt. Dieser Paradigmenwechsel kann mit einer religiösen Bekehrung verglichen werden. Die neuen Paradigmen sind mit den alten inkommensurabel.

Diese Inkommensurabilität wurde von vielen Wissenschaftstheoretikern kritisiert. Ferner wurde angemerkt, dass der Begriff des Paradigmas nicht klar definiert sei⁴.

³Man denke da z.B. an die nicht falsifizierbare Bauernregel: „Wenn der Hahn kräht auf dem Mist, ändert sich das Wetter oder es bleibt wie es ist“.

⁴Wie Kuhn in einem seiner späteren Werke (Kuhn, 1977, S. 389) selber schreibt, seien in seinem Werk über die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen dem Begriff des Paradigmas 22 verschiedene Bedeutungen zuzuordnen.

Unter anderem lässt sich ein Paradigma als metaphysische Festlegung (Kuhn, 1977, S. 389) verstehen.

2.1.3 Gerald Holton und die thematische Analyse der Wissenschaft

Eine weitere wissenschaftstheoretische Sicht auf die Physik hat Gerald Holton (*1922) in seinem Werk „Thematische Analyse der Wissenschaften“ (Holton, 1981) formuliert, die auch von W. Kuhn in seinem Aufsatz „Wissenschaftstheorie und Physikdidaktik“ (Kuhn, 1984) in der Beschreibung von TEM-Diagrammen (siehe Abbildung 2.1) aufgegriffen wurde. Die sogenannte TEM-Darstellung setzt sich aus drei Dimensionen zusammen, die im Diagramm durch die T- E- und M-Achse symbolisiert werden. Dabei bezeichnet E die Empirie, sodass die Punkte auf dieser Achse empirischen Daten entsprechen. Die mathematische Beschreibung dieser Daten wird durch die M-Achse dargestellt. Jede mathematische Beschreibung eines Phänomens der Physik macht einen Punkt in der Ebene, die von diesen beiden Achsen aufgespannt wird, aus und hat damit eine analytische und eine empirische Komponente. Holton bezeichnet dies als den Bereich der öffentlichen Wissenschaft, der dem entspricht, was Hooke als Aufgabe der Royal Society formuliert hat (siehe Zitat im Abschnitt 1.1). Die vorangegangenen Betrachtungen haben aber schon deutlich gemacht, dass in der Theoriebildung mehr als nur die Empirie und die Deduktion eine Rolle spielten - einen wesentlichen Beitrag leisten auch die historischen, psychologischen, religiösen und metaphysischen Hintergrundüberzeugungen. Dieser Einfluss, der von Holton als Themata bezeichnet wird und in den Bereich der sogenannten privaten Wissenschaft fällt, wird durch die T-Achse dargestellt. Diese steht orthogonal zu der E-M-Ebene und spannt damit einen Raum auf.

W. Kuhn verdeutlicht diese Darstellung am Beispiel der Entstehung der speziellen Relativitätstheorie (Kuhn, 1984, S. 13ff). Relativ bald nach der Publikation der maxwellschen Theorie des Lichts stieß man auf einen Widerspruch mit der klassischen Forderung nach der Gleichberechtigung aller Inertialsysteme, denn nach der maxwellschen Theorie muss die Lichtgeschwindigkeit immer gleich blei-

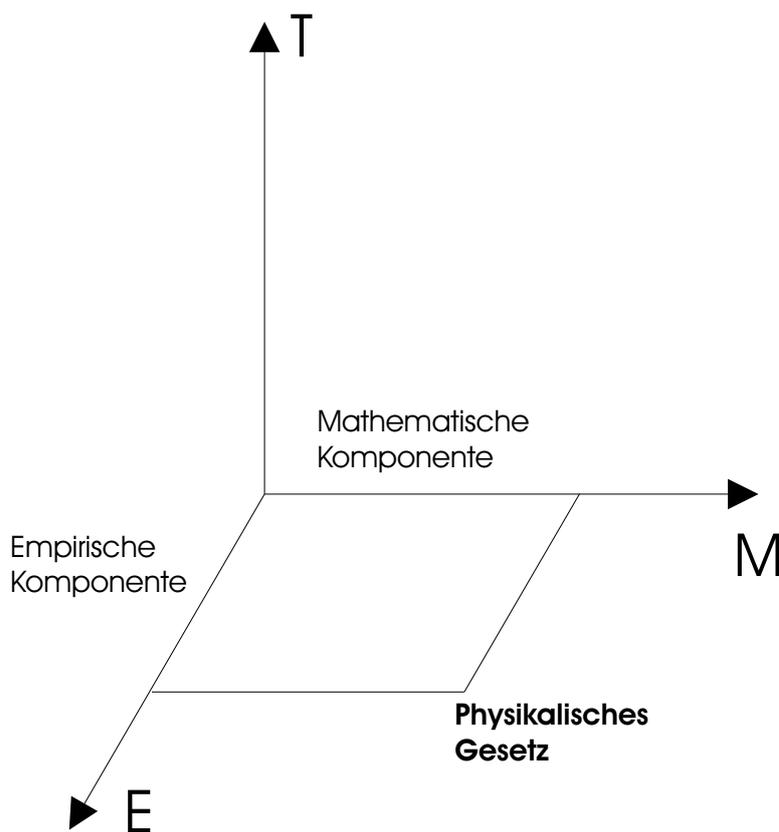


Abbildung 2.1: Das T-E-M-Diagramm nach Holton

ben. In bewegten Inertialsystemen fällt die Lichtgeschwindigkeit nach klassischer Sicht aber unterschiedlich aus, abhängig vom Bewegungszustand des Beobachters. Als Lösung dieses Widerspruches wurden zwei Konzepte vorgeschlagen, das von Hendrik Lorentz (1853-1928) und das von Albert Einstein (1879-1955). Diese beiden Theorien unterscheiden sich, im T-E-M-Diagramm formuliert, nur in der Dimension der Themata. Auf der E-Achse basieren beide Theorien auf dem Befund, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen konstant ist, was auch experimentell durch das Michelson-Morley-Experiment bestätigt wurde. In der deduktiven Schlussfolgerung, wie etwa die Längenkontraktion, waren sich Lorentz und Einstein gleichermaßen einig. In der Erklärung unterscheiden sich diese beiden Theorien jedoch aufgrund unterschiedlicher Hintergrundüberzeugungen. Lorentz hielt an der Idee des idealen Raumes und der absoluten Zeit fest und erklärte die Längenkontraktion durch Ätherwinde, die die Maßstäbe in Bewegungsrichtung real kontrahieren. Einstein hielt kein Inertialsystem für ausgezeichnet und erklärte den Effekt mit der Forderung nach der Gleichberechtigung aller Inertialsysteme durch eine unterschiedliche Raum-Zeit-Struktur in verschiedenen

Inertialsystemen. An sich stehen beide Theorien gleichwertig nebeneinander und können durch kein „experimentum crucis“ als wahr oder falsch ausgezeichnet werden. Einsteins Theorie hat sich, wie W. Kuhn bemerkt, vor allem aufgrund ihrer explanativen Kohärenz hinsichtlich der Erfassung der physikalischen Wirklichkeit als Ganzes von der Mikrophysik bis zur Kosmologie durchgesetzt (Kuhn, 1984, S. 17)⁵.

2.1.4 Imre Lakatos und die wissenschaftlichen Forschungsprogramme

Die Ansichten Poppers und Kuhns wurden vom ungarischen Wissenschaftstheoretiker Imre Lakatos (1922-1974) kritisiert⁶. Den Falsifikationismus Poppers bezeichnet er als naiv, da ein experimenteller Befund noch nicht zur Widerlegung einer ganzen Theorie führt. Er schlägt vor, den „naiven Falsifikationismus“ durch einen von ihm formulierten „raffinierten Falsifikationismus“ zu ersetzen. Dieser sieht vor, dass eine Theorie aus einem harten Kern und einer Schutzzone aus Hilfhypothesen zusammengesetzt ist. Die Hilfhypothesen der Schutzzone können falsifiziert werden, aber nicht die Inhalte des Kerns⁷.

Eine besondere Bedeutung spielt bei ihm der Begriff der „Forschungsprogramme“. Diese meinen Methodenregeln über die im Kreise der Wissenschaftler Konsens besteht. Solche Forschungsprogramme bestehen aus einer negativen Heuristik, die den Kern einer Theorie schützen soll, und einer positiven Heuristik, die die Hilfhypothesen des Kerns verbessern soll. Im Gegensatz zu Kuhns Inkommensurabilitäts-Hypothese lassen sich aber unterschiedliche Forschungsprogramme miteinander vergleichen.

⁵Diese Aussage Kuhns ist sicherlich diskutabel, da auch gewisse inhaltliche Unterschiede zwischen beiden Theorien bestehen.

⁶Die Sichtweise Lakatos' ist etwa in (Lakatos u. a., 1982) nachzulesen.

⁷Die Unmöglichkeit der Falsifikation der Kerninhalte einer Theorie macht Lakatos schön an seinem Beispiel des Newtonianer deutlich, das in der vorliegenden Arbeit im Abschnitt 2.2.3 angeführt ist.

2.1.5 Der Begriff des „Denkstils“ bei Ludwik Fleck

Die Theorie Ludwik Flecks (1896-1961) wird vor allem durch die beiden Begriffe „Denkkollektiv“ und „Denkstil“ geprägt. Der Begriff des Denkkollektivs kommt dem nahe, was bei Kuhn Paradigma heißt. Es meint das akzeptierte Wissen innerhalb einer (Forschungs-)Gemeinschaft. Der Begriff des Denkstils gibt die Richtung vor, in die innerhalb einer Gemeinschaft gedacht wird, etwa was als Problem verstanden wird, oder welche Methoden legitimiert sind. Wörtlich definiert er Denkstil als ...

... „gerichtetes Wahrnehmen, mit entsprechendem gedanklichem und sachlichem Verarbeiten des Wahrgenommenen“ (Fleck, 1980, S. 130)

2.1.6 Gemeinsamkeit aller Sichtweisen

Wenn sich die genannten wissenschaftstheoretischen Sichtweisen auch in einigen Aspekten unterscheiden, so bilden doch alle erwähnten Wissenschaftstheoretiker die Tatsache ab, dass das vorsichtige Herantasten hin zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen niemals voraussetzungslos erfolgt. Ohne das Festhalten an wissenschaftlichen Grundüberzeugungen gleicht die Suche nach Erkenntnis einem Tappen im Nebel. Nachfolgend werden wir die Leitideen im Prozess der Erkenntnisgewinnung als Denkprinzipien bezeichnen. Damit sind keine allgemeinen heuristischen Prinzipien gemeint, sondern Denkschemata, die die a priori Überzeugung des Physikers ausmachen. Bei Popper schlägt sich dieser Aspekt in der Betonung des metaphysischen Einflusses nieder, bei T. Kuhn im Begriff des Paradigmas⁸, bei Holton in der Dimension der Themata, bei Lakatos in dem Begriff der Forschungsprogramme und bei Fleck in dem des Denkstils. Damit soll nicht gesagt sein, dass diese Begriffe exakt das Gleiche meinen (z.B. ist der Begriff des Themas bei Holton nicht gleichzusetzen mit dem Begriff des Paradigmas bei Kuhn), es soll lediglich betont werden, dass das Denken in Prinzipien in allen diesen Formulierungen beinhaltet ist. In der Tabelle 2.1 sind die Gemeinsamkeiten nochmal übersichtlich dargestellt.

⁸Bei T. Kuhn ist auch die Rede von sogenannten Metaparadigmen. Dies sind Paradigmen, die eine wissenschaftliche Revolution überdauern.

Wissenschaftstheoretiker	Bezeichnung erkenntnisleitender Ideen
Karl Popper	Metaphysischer Einfluss
Thomas Kuhn	(Meta-) Paradigma
Imre Lakatos	Forschungsprogramme
Gerald Holton	Themata
Ludwik Fleck	Denkstil
in dieser Arbeit	Denkprinzip

Tabelle 2.1: Erkenntnisleitende Ideen als Gemeinsamkeit aller wissenschaftstheoretischen Sichtweisen auf die Physik

Didaktisch gesehen liegt es auf der Hand, dass „Themata“, „Denkstil“ oder „Paradigma“ auch für Lernende, die in gewisser Weise immer wieder vor „Neuentdeckungen“ stehen, von großer Bedeutung sind. Das selbstständige Lösen von physikalischen Aufgaben oder das Erfassen von physikalischen Problemen, sowie das Erlernen von bislang unbekanntem Teilgebieten der Physik gleichen in abgewandelter und abgeschwächter Form dem Erkenntnisgewinn in der physikalischen Forschung. Folglich sollten Denkprinzipien beim Lernen (und damit auch beim Lehren) von Physik ebenso von fundamentaler Bedeutung sein, wie sie es beim allgemeinen Prozess physikalischer Erkenntnisgewinnung sind.

Bevor aber didaktisch auf die Rolle von Denkprinzipien eingegangen wird, sollen der Begriff des Denkprinzips überhaupt und zwei weitere grundlegende Begriffe dieser Arbeit im nächsten Abschnitt genauer definiert werden.

2.2 Festlegung grundlegender Begriffe

Mit den angeführten wissenschaftstheoretischen Überlegungen lassen sich die eingangs erwähnten Fragestellungen, die dieser Arbeit zugrunde liegen, etwas genauer formulieren. Dazu muss zunächst Konsens über bestimmte Begriffe hergestellt werden. Dabei sei gesagt, dass die folgenden Definitionen nicht den Anspruch der Allgemeingültigkeit erheben, sondern lediglich eine Grundlage für den einheitlichen Sprachgebrauch in dieser Arbeit darstellen.

2.2.1 Definition des Begriffes Gesetz

Das Geschehen in der Natur verläuft nach gewissen Regelmäßigkeiten. Die Physik modelliert die Wirklichkeit und beschreibt sie durch Modelle. Die relativ komplexen Zusammenhänge in der Natur können so mit wenigen mathematischen Gleichungen und Ausdrücken abgebildet werden, die als Gesetze der Natur bezeichnet werden können. In diesem Sinne wird der Begriff des Naturgesetzes üblicherweise definiert. Schlägt man beispielsweise in einem Lexikon der Physik den Begriff „Naturgesetz“ nach, so wird dieses als Schema beschrieben, welches Phänomene der Natur in eine mathematisch formulierbare Beziehung bringt (z.B. in Kilian und Weber, 2000, Band 4, S. 68). Dieser Bedeutung von Gesetz werden wir in dieser Arbeit folgen. Es muss besonders betont werden, dass Gesetze in diesem definierten Sinne nur einen sehr begrenzten Gültigkeitsbereich haben, da es sich um Beschreibungen konkreter Phänomene in der Natur handelt. Also:

Unter dem Begriff Gesetz soll eine physikalische Beschreibung eines Naturphänomens mit begrenztem Gültigkeitsbereich verstanden werden.

Beispiel: Die Abbildungsgleichung einer Linse

Ein Gesetz in diesem definierten Sinn ist etwa die Abbildungsgleichung einer Linse:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} + \frac{1}{g} \quad (2.1)$$

Durch dieses Gesetz kann, bei bekannter Bildweite b und Gegenstandsweite g , die Brennweite f einer Linse bestimmt werden. Doch außerhalb dieses Kontextes ist das Gesetz nicht brauchbar. Gilt es etwa, ein Problem aus dem Bereich der Elektrodynamik zu bearbeiten, ist dieses Gesetz nicht nützlich.

2.2.2 Definition des Begriffes Gesetzmäßigkeit

Wie schon betont, sind Gesetze hinsichtlich des Allgemeinheitsgrades ihrer Gültigkeit zu differenzieren. Gelegentlich wird zwischen allgemeinen Gesetzen und spezifischen Gesetzen unterschieden (z.B. bei Lenk und Gellert, 1974, S. 1029). Über den spezifischen Gesetzen stehen allgemeingültige Gesetze, die in allen oder zumindest in vielen Bereichen der Physik ihre Anwendung finden. Diese allgemei-

nen Gesetze sollen nachfolgend als Gesetzmäßigkeit definiert werden und stehen nicht neben den spezifischen Gesetzen, sondern beinhalten diese. Viele spezifische Gesetze lassen sich auf eine Gesetzmäßigkeit zurückführen (siehe Abbildung 2.2). Folglich ist die Zahl der Gesetzmäßigkeiten weit geringer als die der Gesetze. Gesetzmäßigkeiten stellen die Grundregeln der Natur dar, die für alle Bereiche der Physik relevant sind. Also:

Unter dem Begriff der Gesetzmäßigkeit soll eine allgemeingültige Regelmäßigkeit der Physik verstanden werden, die weniger explizit erwähnt wird, sondern deren Existenz die Grundlage vieler Gesetze darstellt.

Die Abbildung 2.2 soll diese Aussage nochmals verdeutlichen. Viele Gesetze aus unterschiedlichen Teilgebieten der Physik lassen sich auf eine allgemeingültige Gesetzmäßigkeit zurückführen⁹.

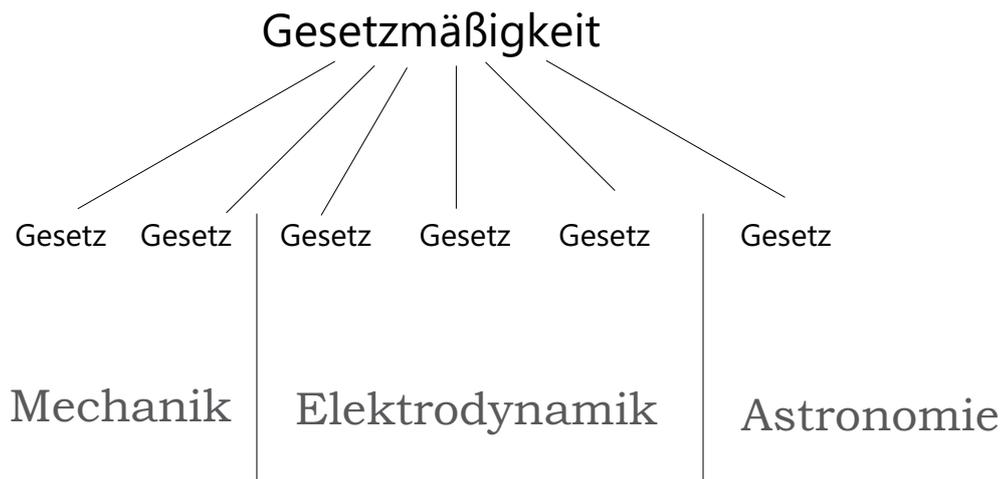


Abbildung 2.2: Zur Verdeutlichung der Definition von Gesetzmäßigkeit

Beispiel: Das Extremalprinzip

Das, was wir heute als Extremalprinzip bezeichnen, ist als metaphysischer Gedanke schon seit der Antike bekannt. Dahinter steht die Idee eines sparsamen Schöpfers, der die Natur auch sehr sparsam konzipiert hat. Mit geringstem Aufwand wird in der Natur die maximale Wirkung erzielt (Näheres in Kuhn, 2001, S. 255ff).

⁹An späterer Stelle wird diese Abbildung am Beispiel der Energieerhaltung konkretisiert. Siehe dazu Abbildung 3.8.

Kapitel 2 Grundlagen

Pierre de Fermat (1601-1665) hat auf dieser Denkweise aufbauend das Reflexionsgesetz und das Brechungsgesetz der Strahlenoptik hergeleitet. Das nach ihm benannte Prinzip besagt, dass das Licht den Weg wählt, für den es die extremalste Zeit benötigt. In der heute geläufigen Schreibweise der Variationsrechnung kann man das so ausdrücken:

$$\delta \int dt = 0 \quad (2.2)$$

Pierre-Louis Moreau de Maupertis (1698-1759) hat das fermatsche Prinzip allgemeiner verstanden und auf mechanische Probleme erweitert, indem er das Prinzip der kleinsten Wirkungen formulierte. Wörtlich meint er:

„Der Pfad der Fortpflanzung ist jener, zu dem die kleinste Wirkungs-
menge gehört.“ (zitiert nach Kuhn, 2001, S. 256)

Mit dem mathematischen Formalismus zur Beschreibung der Mechanik, der sich in diesem Jahrhundert vor allem unter den Händen Eulers und Lagranges entwickelt hat, kann man es so ausdrücken:

$$\delta \int m \vec{v} d\vec{s} = 0 \quad (2.3)$$

Maupertius erkannte die Bedeutung dieses Prinzips für die Mechanik und er behauptete:

„Nach so vielen großen Geistern, die an diesem Problem arbeiteten, wage ich es kaum kund zu tun, dass ich ein Prinzip entdeckt habe, das als Grundlage aller Bewegungsgesetze dienen kann.“ (Kuhn, 2001, S. 257).

Bald wurde erkannt, dass dieses Prinzip nicht nur in der Mechanik, sondern in der ganzen Physik grundlegend ist. Es dient beispielsweise auch zur Beschreibung von Feldern und ist damit fundamental für die maxwellschen Gleichungen und für die einsteinschen Feldgleichungen. Die Allgemeingültigkeit dieses Prinzips hat schon Max Planck erkannt, indem er sagte:

„Unter den mehr oder weniger allgemeinen Gesetzen, welche die Er-
rungenschaften der physikalischen Wissenschaften in der Entwicklung
der letzten Jahrhunderte bezeichnen, ist gegenwärtig das Prinzip der

kleinsten Wirkung (Action) wohl dasjenige, welches nach Form und Inhalt den Anspruch erheben darf, jenem idealen Endziel der theoretischen Forschung am nächsten kommt. Seine Bedeutung in gehöriger Allgemeinheit aufgefasst, erstreckt sich nicht allein auf mechanische, sondern auch thermische und elektrodynamische Erscheinungen, und in allen seinen Anwendungsgebieten gibt es nicht nur Aufschluss über gewisse Eigenschaften der betreffenden physikalischen Vorgänge, sondern es regelt auch ihren räumlichen und zeitlichen Ablauf eindeutig.“ (Planck, 1958, S. 91).

Viele Gesetze, im eben definierten Sinne, wie etwa das Brechungsgesetz oder auch die maxwellschen Gleichungen, lassen sich auf ein allgemeingültiges Extremalprinzip zurückführen, welches nach unserer Definition als Gesetzmäßigkeit zu verstehen ist.

2.2.3 Definition des Begriffes Denkprinzip

Wenn man die Allgemeingültigkeit der Gesetzmäßigkeiten verstanden hat, etabliert sich im Denken die Überzeugung, dass man ihre Gültigkeit unter vielen Umständen als gegeben voraussetzen kann. Damit wandelt sich - im Denken! - die Gesetzmäßigkeit von der Naturgegebenheit hin zu einem erklärenden, konkrete Sachverhalte deutenden Denkwerkzeug. Wir gebrauchen die Gesetzmäßigkeit dann als Denkwerkzeug, mit dessen Hilfe wir Probleme lösen und komplizierte Zusammenhänge auflösen können. Aus der Gesetzmäßigkeit wird schließlich ein Denkprinzip. Der Begriff des Denkprinzips soll in dieser Arbeit als ebenso allgemeingültig wie der Begriff der Gesetzmäßigkeit verstanden werden. Das Denkprinzip unterscheidet sich, wie soeben erläutert, von den Begriffen Gesetz und Gesetzmäßigkeit dadurch, dass es nicht in den Lehrbüchern der Physik lokalisiert ist, sondern eher in den Köpfen derjenigen, die Physik betreiben.

Um es in den T-E-M-Diagrammen Holtons auszudrücken (vgl.2.1.3): Eine Gesetzmäßigkeit ist in der Ebene der öffentlichen Wissenschaft (E-M-Ebene) zu verorten, das Denkprinzip meint seine thematische Dimension. Der Physiker, der beim Erforschen der Natur immer wieder auf diese Grundregel stößt, verinnerlicht diese in der Weise, dass sie sich zu festen Denkschemata generieren und

damit in gewisser Weise als zündender Funke bei neuen Fragestellungen oder als wissenschaftliches Gewissen zur Bewertung von Hypothesen fungieren. Solche zu Denkmaximen erhobene Grundregeln sollen im Folgenden als Denkprinzipien bezeichnet werden. Diese Denkprinzipien entsprechen in gewisser Weise dem, was in dem Kapitel zur wissenschaftstheoretischen Sicht auf die Physik als metaphysische Komponente (Popper), Themata (Holton) oder auch Metaparadigma (Kuhn) bezeichnet wurde (vgl. Tabelle 2.1). Das Besondere dieser Denkprinzipien ist, dass die Wissenschaftler an ihnen festhalten und sie keiner Falsifikation durch die Erfahrung aussetzen. Das Festhalten an diesen Prinzipien macht Lakatos in seiner hypothetischen Geschichte vom „Newtonianer“ deutlich:

„Die Geschichte betrifft einen imaginären Fall planetarischer Unart. Ein Physiker in der Zeit vor Einstein nimmt Newtons Mechanik und sein Gravitationsgesetz N sowie die akzeptierten Randbedingungen A und berechnet mit ihrer Hilfe die Bahn eines eben entdeckten kleinen Planeten p . Aber der Planet weicht von der berechneten Bahn ab. Glaucht unser Newtonianer, dass die Abweichung von Newtons Theorie verboten war und dass ihr Beweis die Theorie N widerlegt? - Keineswegs. Er nimmt an, dass es einen bisher unbekanntem Planeten p' gibt, der die Bahn von p stört. Er berechnet Masse, Bahn etc. dieses hypothetischen Planeten und er sucht dann einen Experimentalastronomen, um seine Hypothese zu überprüfen. Aber der Planet p' ist so klein, dass selbst das größte vorhandene Teleskop ihn nicht beobachten kann: Der Experimentalastronom beantragt einen Forschungszuschuss, um ein noch größeres Teleskop zu bauen. In drei Jahren ist das neue Instrument fertig. Wird der neue Planet p' entdeckt, so feiert man diese Tatsache als einen neuen Sieg der Newton'schen Wissenschaft. - Aber man findet ihn nicht. Gibt unser Wissenschaftler Newtons Theorie und seine Idee des störenden Planeten auf? - Nicht im mindesten! Er mutmaßt nun, dass der gesuchte Planet durch eine kosmische Staubwolke vor unseren Augen verborgen wird. Er berechnet Ort und Eigenschaften dieser Wolke und beantragt ein Forschungsstipendium, um einen Satelliten zur Überprüfung seiner

Kapitel 2 Grundlagen

Berechnungen abzusenden. Vermögen die Instrumente des Satelliten (darunter völlig neue, die auf wenig geprüften Theorien beruhen) die Existenz der vermuteten Wolke zu registrieren, dann erblickt man in diesem Ergebnis einen glänzenden Sieg der newtonschen Wissenschaft. Aber die Wolke wird nicht gefunden. Gibt unser Wissenschaftler Newtons Theorie, seine Idee des störenden Planeten und die Idee der Wolke, die ihn verbirgt, auf? - Nein! Er schlägt vor, dass es im betreffenden Gebiet des Universums ein magnetisches Feld gibt, das die Instrumente im Satelliten gestört hat. Ein neuer Satellit wird ausgesandt. Wird das magnetische Feld gefunden, so feiern Newtons Anhänger einen sensationellen Sieg. - Aber das Resultat ist negativ. Gilt dies als eine Widerlegung der Newton'schen Wissenschaft? - Nein. Man schlägt entweder eine neue noch spitzfinderische Hilfhypothese vor, oder ... die ganze Geschichte wird in den staubigen Bänden der wissenschaftlichen Annalen begraben, vergessen und nie wieder erwähnt.“ (Lakatos u. a., 1982, S. 15)

Denkprinzipien sind a priori Grundsätze, die dem Denken von Physikern den Rahmen und die Richtung weisen. Also:

Unter dem Begriff des Denkprinzips sollen in dieser Arbeit erkenntnisleitende Ideen oder auch Problemlöswerkzeuge bezeichnet werden, die sich beim Betreiben von Physik immer wieder als effektiv erwiesen haben und erweisen.

Da die Lehrbücher der Physik (der Bereich der öffentlichen Wissenschaften) meist nur die Begriffe und Gesetze der Physik darstellen und nicht die Ideen und Gedanken, sprich die Denkprinzipien, werden solche Denkprinzipien meist nur aus der historischen Analyse der Physik offenbar¹⁰. Dazu folgendes Beispiel:

¹⁰Der Begriff des Denkprinzips beschränkt sich aber nicht nur auf die Historie allein. Er spielt eine wichtige Rolle beim Betreiben von Physik und zwar in der Grundlagenforschung als auch in der Lehre (wie dies die vorliegende Arbeit zeigen will).

Beispiel: Das Symmetrieprinzip bei Faraday

Das Induktionsgesetz ist sicherlich eines der wichtigsten in der Elektrodynamik. Zahlreiche Anwendungen der Elektrotechnik basieren darauf. Entdeckt wurde es in der Mitte des 19. Jahrhunderts von Michael Faraday (1791-1867). Ausgangspunkt war die Entdeckung Hans Christian Oerstedes (1777-1851) aus dem Jahre 1820, wonach ein Fluss elektrischer Ladungen eine magnetische Wirkung verursacht. Michael Faraday war der Überzeugung, dass die Natur symmetrisch funktioniert und es deshalb auch eine Umkehrung geben müsse. Aus einem Magneten müsse sich demnach auch ein Fluss elektrischer Ladungen erzeugen lassen. Seine ersten experimentellen Befunde bestätigten dies jedoch nicht. Das Festhalten an dieser Idee und sein experimentelles Geschick brachten ihn schließlich zu der Erkenntnis, dass nicht ein Magnetfeld an sich eine elektrische Spannung erzeugt, sondern erst die Änderung eines solchen (Kuhn, 2001, S. 324ff).

Das Symmetrieprinzip ist keine allgemeingültige Beschreibung der Natur (sprich eine Gesetzmäßigkeit), sondern vielmehr eine Idee mit erkenntnisleitender Wirkung. Solche Ideen sollen in dieser Arbeit als Denkprinzipien bezeichnet werden.

2.3 Formulierung der Forschungsfragen der vorliegenden Untersuchungen

Mit den in 2.2 definierten Begriffen sollen nun die Forschungsfragen dieser Arbeit formuliert werden:

- **(F1) Welche Rolle spielt die Erhaltung als Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkprinzip im Rahmen der Entwicklung der Fachsystematik der Physik?**

Diese Frage soll für die einzelnen Teilgebiete separat angegangen werden, um aufzuzeigen, ob ein Teilgebiet der Physik in Bezug auf die Erhaltung ausgezeichnet ist.

Die Rolle der Erhaltung als Gesetz ergibt sich aus Nennungen von Gesetzen, in denen die Erhaltung explizit erwähnt wird. Die Funktion der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit kann nur indirekt ersehen werden. So können dazu Gesetze genannt werden, die auf den ersten Blick nichts mit Erhaltung zu tun

haben, in denen also die Erhaltung nicht explizit vorkommt, die sich aber durch das Erhaltungsprinzip herleiten oder begründen lassen. Da die Erhaltung als Denkprinzip nicht in der Ebene der öffentlichen Wissenschaft, sondern in der thematischen Dimension (nach Holton, vgl. Abbildung 2.1) lokalisiert ist, wird man sie kaum als solche in den Lehrbüchern formuliert finden. Die Erhaltung wird erst aus der historischen Analyse der Theoriebildung der Physik als Denkprinzip erkannt.

Zur Beantwortung dieser Frage wird folglich eine fachlich-historische Betrachtung vonnöten sein (Kapitel 3).

- **(F2) Welchen Beitrag kann die Erhaltung zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses im Physikunterricht leisten?**

Beiträge zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses von Physik wären nach Abbildung 1.3 einerseits die Strukturierung und Systematisierung der Inhalte der Physik (erster Schritt) und andererseits die Verinnerlichung der Grundideen der Physik als Beitrag zum physikalischen Denken, das Lernende befähigt selbständig und kreativ physikalische Fragestellungen zu bearbeiten (zweiter Schritt). Als Unterfragen ließen sich demnach folgende Fragen stellen:

- Wie lässt sich das komplexe Theoriegeflecht der Physik für Lernende sinnvoll strukturiert und systematisiert vermitteln?
- Wie kann Physikunterricht die grundlegenden Ideen der Physik verdeutlichen, um dadurch zum selbständigen physikalischen Denken zu befähigen?

Der erste Schritt lässt sich vermutlich durch den Charakter der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit beschreiben und der zweite dadurch, dass die Erhaltung auch als Denkprinzip fungiert. Doch wie lässt sich das im Physikunterricht konkret umsetzen und wie sind diese Hypothesen in die bisherigen Abhandlungen der Physikdidaktik einzubetten?

- **(F3) Wird der Erhaltung in den Physikbüchern für die gymnasiale Oberstufe eine hinreichende Bedeutung zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses der Physik beigemessen?**

Kapitel 2 Grundlagen

Zur Beantwortung dieser Frage sollen sechs gängige Schulbücher der gymnasialen Oberstufe und deren Lösungsbücher in Form einer qualitativen Inhaltsanalyse untersucht werden. Konkret sollen die Fragen beantwortet werden, wie oft die Erhaltung in den Schulbüchern als Gesetz, als Gesetzmäßigkeit und als Denkprinzip vorkommt. Wie sieht die Verteilung der Fundstellen in den einzelnen Teilgebieten der Physik aus?

Kapitel 3

Die Rolle des Erhaltungsgedankens in den einzelnen Teilgebieten der Physik

Bevor im Folgenden die Rolle der Erhaltung in der Physik herausgearbeitet wird, soll festgelegt werden, was unter Erhaltung verstanden wird.

Für eine beliebige physikalische Größe X gilt in einem abgeschlossenen System folgende Bilanzgleichung:

$$\frac{dX}{dt} = I_X + \Sigma_X \quad (3.1)$$

Dabei ist I_X der Strom von X über die Systemgrenzen hinweg und Σ_X die Erzeugungs- oder Vernichtungsrate von X . Die zeitliche Änderung der Größe X entspricht damit der Summe aus dem Strom der Größe über die Systemgrenzen und der Erzeugungs- oder Vernichtungsrate von X im System. Ist die Erzeugungs- oder Vernichtungsrate von X immer gleich 0, so ist X eine Erhaltungsgröße. Diese kann weder erzeugt noch vernichtet werden. Für eine Erhaltungsgröße wird (nach Division durch das Volumen) Gleichung 3.1 zur Kontinuitätsgleichung (vgl. 3.14):

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \operatorname{div}(j) = 0. \quad (3.2)$$

Dabei ist ρ_X die Dichte der Größe X und j die Stromdichte. Dieser Erhaltungscharakter bestimmter physikalischer Größen kann als ein fundamentales Prinzip in der Physik gewertet werden.

Durch Literaturrecherche findet man, dass unterschiedliche Autoren durchaus

auch unterschiedliche physikalische Grundideen für bedeutsam halten. Doch erstaunlicherweise findet sich auch bei den unterschiedlichsten Autoren ein prägnanter Grundstamm physikalischer Prinzipien, denen sie alle zentrale Bedeutung beimessen. Typisch ist das nachfolgend zitierte Beispiel, indem ebenfalls der Erhaltungsgedanke als fundamental genannt wird. In dem Artikel „Die erkenntnisleitende Funktion von Analogien in Forschung und Lehre“ (Kuhn, 1997, S. 82) listet W. Kuhn folgende grundlegende Prinzipien auf:

- Symmetrieprinzipien
- Erhaltungssätze
- Extremalprinzipien
- Selbstreferenzprinzipien
- Nichtlineare Entwicklungs- bzw. Entfaltungsprinzipien, die als metaphysische Hintergrundüberzeugungen Weltansichten transportieren.

Mit den in Abschnitt 2.2 definierten Begriffen kann man sagen, dass das Erhaltungsprinzip in dreierlei Weise bedeutend für die Physik ist. Sicherlich ist die Erhaltung in spezieller Form als Gesetz zu sehen, wie etwa der Ladungserhaltungssatz oder der Massenerhaltungssatz. Doch nicht nur in konkreter Form ausformulierter Gesetze, sondern auch als allgemeingültige Gesetzmäßigkeit tritt die Erhaltung in der Physik in Erscheinung, da z.B. die Energieerhaltung für alle physikalischen Vorgänge eine Rahmenbedingung darstellt. Aus der historischen Analyse wird aber auch deutlich, dass die Idee der Erhaltung immer wieder zündender Funke der Theoriebildung war. Damit fungiert die Erhaltung auch als Denkprinzip in der Physik.

In diesem Kapitel wird die Rolle der Erhaltung in der Physik in der Zuordnung zu diesen drei Begriffen aufgezeigt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Dabei geschieht die Zuordnung zu den Begriffen Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkprinzip nach folgenden Gesichtspunkten:

- Unter den Erwähnungen als Gesetz werden mathematische Beschreibungen physikalischer Phänomene mit begrenztem Gültigkeitsbereich verstanden,

bei denen die Erhaltung explizit erwähnt wird. So haben allgemeine Erhaltungsgrößen ihre fachgebietsspezifische Beschreibung, die in diesem Sinne als Gesetze zu verstehen sind.

- Bei der Auflistung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit werden meist Gesetze im Sinne der Definition 2.2.1 (also wie im vorangegangenen Punkt) genannt, nur das dort die Erhaltung nicht explizit erwähnt ist. Es sind Gesetze die anscheinend nichts mit Erhaltung zu tun haben, denen aber die Erhaltung als Grundlage oder Begründung dient. Damit stellen sie implizite Erwähnungen der Erhaltung dar.
- Die Nennungen der Erhaltung als Denkprinzip lassen sich erst aus dem historischen Kontext heraus verstehen. Sie beschreiben, wie das Denken im Erhaltungsprinzip maßgeblich zur Theoriebildung in der Physik beigetragen hat.

Die Betrachtungen sind nicht nur bezüglich dieser drei Begriffe differenziert, sondern jedes physikalische Teilgebiet wird für sich gesondert beleuchtet. Die Unterteilung in die Teilgebiete „Mechanik“, „Astronomie“, „Thermodynamik“, „Elektromagnetismus“ und „moderne Physik“ ist orientiert an der gängigen Aufteilung der Physik in den Schulbüchern. Das Teilgebiet „moderne Physik“ fasst Relativitätstheorie, Quantentheorie, Atom- und Kernphysik und Elementarteilchenphysik zusammen, also im Grunde die Physik des 20. Jahrhunderts bezeichnen.

Die Betrachtung reflektieren, dem Ziel dieser Arbeit entsprechend, Schulniveau, mit gelegentlichen Überschreitungen.

3.1 Mechanik

3.1.1 Die Erhaltung als Gesetz in der Mechanik

3.1.1.1 Der Massenerhaltungssatz

Die Masse stellt in der Mechanik die wohl wichtigste Grundgröße dar. In der klassischen Mechanik kann die Masse in einem abgeschlossenen System weder vernichtet noch erzeugt werden. Dieser Sachverhalt wird als Massenerhaltungssatz

bezeichnet. Formal ausgedrückt gilt also für ein abgeschlossenes System:

$$M = \sum_{i=1}^n m_i = \textit{konstant}. \quad (3.3)$$

3.1.1.2 Der Energieerhaltungssatz der Mechanik

In der klassischen Mechanik spielen vor allem die Energieform der potentiellen Energie und die der kinetischen Energie eine wichtige Rolle. Da meist homogene Kraftfelder betrachtet werden, ist die üblichste Form des Energieerhaltungssatzes der Mechanik:

$$\sum_{i=1}^n E_{pot_i} + \sum_{i=1}^n E_{kin_i} = \sum_{i=1}^n m_i g h_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \textit{konstant}. \quad (3.4)$$

Gelegentlich gehen auch andere Energieformen mit in die Bilanz ein (etwa die Rotationsenergie oder die Spannenergie einer Feder).

3.1.1.3 Der Impulserhaltungssatz

Neben der Energie stellt der Impuls eine wichtige Erhaltungsgröße der Mechanik dar. Er wird durch das Formelzeichen \vec{p} ausgedrückt und ist definiert als das Produkt aus der Masse m und der Geschwindigkeit \vec{v} . Für abgeschlossene Systeme bleibt dieser erhalten. Dieser Sachverhalt wird auch Impulserhaltungssatz genannt:

$$\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \textit{konstant}. \quad (3.5)$$

3.1.1.4 Der Drehimpulserhaltungssatz

Analog zur Definition des Impulses \vec{p} für Translationsbewegungen lässt sich auch für Rotationsbewegungen der sogenannte Drehimpuls \vec{L} definieren. Anstelle der Masse m wird das Trägheitsmoment J eingeführt und anstatt der Geschwindigkeit \vec{v} die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$. Somit ergibt sich der Drehimpuls zu $\vec{L} = J\vec{\omega}$. In vielen Kontexten ist es nützlich, den Drehimpuls auf den Bahnimpuls \vec{p} und dem Radius \vec{r} mit der Beziehung $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ zurückzuführen. Der Drehimpuls ist ebenso eine Erhaltungsgröße. Es gilt folglich der Drehimpulserhaltungssatz:

$$\sum_{i=1}^n \vec{L}_i = \sum_{i=1}^n J_i \vec{\omega}_i = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \textit{konstant}. \quad (3.6)$$

3.1.1.5 Der Schwerpunkterhaltungssatz

Ein weiteres Erhaltungsgesetz der Mechanik ist der sogenannte Schwerpunkterhaltungssatz. Dieser ist eine andere Formulierung des Trägheitsgesetzes (1. newtonsches Axiom) und besagt, dass sich die Richtung und der Geschwindigkeitsbetrag eines abgeschlossenen Systems nicht ändern, wenn keine äußeren Kräfte wirken, unabhängig von der Wechselwirkung der Teile im Inneren des Systems. Formal ausgedrückt lautet die Schwerpunkterhaltung mit M als der Gesamtmasse des Systems:

$$\frac{d}{dt} \dot{\vec{r}}_s = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \dot{\vec{r}}_i \right) = 0. \quad (3.7)$$

3.1.2 Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Mechanik

3.1.2.1 Die Massen- und Energieerhaltung als Grundlage der Hydrodynamik

In der Strömungslehre spielen die Kontinuitätsgleichung und die Bernoulligleichung eine maßgebliche Rolle. Bei genaueren Betrachtungen stellt man fest, dass diese Gesetze nur konkrete Formulierungen der Erhaltung darstellen.

Die Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass die Stromstärke, also die zeitliche Änderung des Volumens einer strömenden Flüssigkeit in einem Rohr immer den gleichen Wert hat. Wenn man die Volumenänderung nur in eine Richtung betrachtet, lässt sich die Stromstärke als Produkt der Querschnittsfläche A und der Änderung in eine Richtung wie folgt ausdrücken:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{ds}{dt}. \quad (3.8)$$

Diesem Gesetz liegt die Massenerhaltung (3.1.1) als Gesetzmäßigkeit zugrunde. Die Masse m einer in einem abgegrenzten Volumen V zur Zeit t befindlichen Flüssigkeitsmenge mit der Dichte ρ ist gegeben durch

$$m = \int \rho \, dV. \quad (3.9)$$

Zur Zeit $t + dt$ beträgt die Flüssigkeitsmasse dann

$$\int \left(\rho + \frac{\partial \rho}{\partial t} dt \right) dV. \quad (3.10)$$

Die in der Zeit dt zugeströmte Flüssigkeitsmasse dm ergibt sich folglich zu

$$\frac{dm}{dt} = \int \frac{\partial \rho}{\partial t} dV. \quad (3.11)$$

Andererseits gilt für die mit der Geschwindigkeit v durch den Querschnitt A in der Zeit dt geströmte Flüssigkeitsmasse¹

$$\frac{dm}{dt} = \int_A \rho v dA. \quad (3.12)$$

Dieser Ausdruck lässt sich mit Hilfe des gaußschen Integralsatzes umformen zu:

$$\frac{dm}{dt} = \int_V \operatorname{div}(\rho v) dV. \quad (3.13)$$

Aufgrund der Massenerhaltung können die Integranden der Ausdrücke 3.11 und 3.13 gleichgesetzt werden, woraus sich die Kontinuitätsgleichung ergibt:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0. \quad (3.14)$$

Bei inkompressiblen Flüssigkeiten, also $\rho = \textit{konstant}$, gilt dann $\operatorname{div} v = 0$ (zur genaueren Herleitung siehe Bergmann u. a., 1990, S. 341f).

Die Bernoulli-Gleichung

Betrachtet man die Energie einer strömenden Flüssigkeit, also ihre Fähigkeit Arbeit zu verrichten, so sind folgende Energieformen aufzulisten²:

- Die potentielle Energie $E_{pot} = mgh$,
- die kinetische Energie $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$
- und die durch den Druck gegebene Energie³ $E_p = pV$.

Aufgrund der Energieerhaltung muss die Summe dieser Energieformen konstant sein, so dass gilt: $mgh + \frac{1}{2}mv^2 + pV = \textit{konstant}$. Dividiert man diesen Ausdruck durch das Volumen, so ergibt sich die Bernoulli-Gleichung:

$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + p = \textit{konstant}. \quad (3.15)$$

¹Die Geschwindigkeit v wird in Normalrichtung betrachtet, deshalb wird der Vektorcharakter nicht berücksichtigt.

²Diese Betrachtung passt sich dem Schulniveau an. Bei tiefergehenden Überlegungen müssten weitere Energieformen berücksichtigt werden.

³Der Druck hat die Dimension einer Energiedichte.

3.1.2.2 Der Energieerhaltungssatz bei einfachen Maschinen der Mechanik

Historisch frühzeitig entwickelten Menschen Maschinen, um sich das Leben zu erleichtern. Dabei bemerkte man gewisse Erhaltungseigenschaften, ohne dass die dafür ursächlichen Begrifflichkeiten formuliert wurden (siehe dazu Schirra, 14.09.1989, S. 73). Die Mechanik, wie sie uns heute bekannt ist, nahm ihren Anfang mit Galileo Galilei (1564-1642). Seine Sichtweise, dass mechanische Bewegungen nichts anderes sind als alle sonstigen naturgemäßen Bewegungen, stellte für jene Zeit einen großen Fortschritt dar⁴. Seine modellhaften Betrachtungen ließen Galilei erkennen, dass eine scheinbare „Leichtigkeit“, wie sie von einfachen Maschinen erzeugt wird, durch „Langsamkeit“ kompensiert werden muss. Er selbst schildert dies wie folgt:

„Die einfachen Maschinen werden benutzt, schwere Gewichte zu bewegen durch Aufwendung einer kleinen Kraft über viel Zeit, es muss klar sein, dass die Geschwindigkeit der Kraft größer sein wird, als die Geschwindigkeit des Gewichtes.“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 77)

Betrachtungen an der geneigten Ebene⁵ veranlassten Galilei, nicht die beiden Größen Kraft und Geschwindigkeit, sondern Kraft und Weg als Bilanzgrößen anzusehen. Er entdeckte (vgl. Abbildung 3.1):

„Da der (vertikale) Abstand der Kraft F im gleichen Verhältnis ist zu dem (vertikalen) Abstand der Kraft E wie die Länge \overline{AC} zur Länge \overline{CB} , deshalb ist das letztere wie das Gewicht E zu dem Gewicht F .“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 78)

Er ordnete damit dem Produkt aus Weg und Kraft entlang des Weges mehr oder weniger bewusst Erhaltungseigenschaften zu, ohne den Begriff der Arbeit, wie wir

⁴Man bedenke dabei, dass in jener Zeit das aristotelische Verständnis vorherrschend war, welches zwischen himmlischer und irdischer, sowie zwischen natürlicher und mechanischer Bewegung unterscheidet. Die an Maschinen, die zur Überlistung der Natur dienen, beobachtbaren Phänomene sind nach jenem Verständnis andere als die natürlichen Phänomene, welche der Naturforscher beschreiben möchte.

⁵Galilei führte die Bewegung des freien Falls auf die Bewegung an der geneigten Ebene zurück, weil sie dort besser zu messen war.

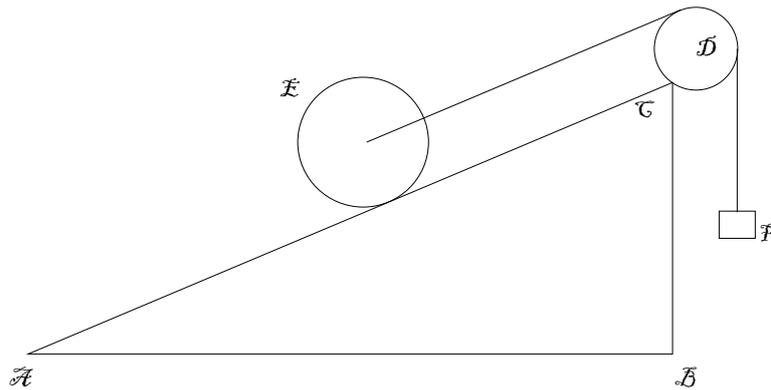


Abbildung 3.1: Die geneigte Ebene

dieses Produkt heute bezeichnen, ausformuliert zu haben.

Diese Erkenntnis spielt auch in der Mechanik, wie wir sie heute kennen, eine wichtige Rolle. Gelegentlich wird sie die „goldene Regel der Mechanik“ genannt. Ausformuliert besagt diese, dass man das, was man an Kraft spart, an Weg zulegen muss. Dem liegt die Energieerhaltung zugrunde, da das Produkt aus Weg und Kraft entlang des Weges (die Arbeit) die Dimension einer Energie hat. Die scheinbare Erleichterung durch mechanische Maschinen geschieht nicht zum „Nulltarif“. Das „Weniger“ an Kraftaufwand muss mit „Mehr“ an Weg bezahlt werden.

3.1.2.3 Energieerhaltung zur Beschreibung des mathematischen Pendels

Nicht nur für die Betrachtung von Maschinen, sondern auch für die Formulierung eines allgemeineren Energieerhaltungssatzes in der Mechanik hat Galilei wichtige Weichen gestellt. Er erkannte, dass die Geschwindigkeit eines fallenden Körpers nur eine Funktion der Höhe ist, sodass auch im gebundenen Fall an der geneigten Ebene eine aus der Höhe, auf Bahnen unterschiedlicher Neigung herabrollende Kugel die gleiche Geschwindigkeit hat. Wörtlich heißt es:

„Ich nehme an, die Geschwindigkeitsgerade, welche dasselbe Bewege durch den Fall auf verschieden geneigten Ebenen erlangt, seien gleich, sofern die Höhen der Ebenen dieselben sind.“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 94)

Weitere Erkenntnisse konnte er aus seinem Pendelexperiment schließen. Er ließ ein Pendel der Länge AB schwingen, sodass es den Bogen CBD beschreibt. Er beobachtete (siehe Abbildung 3.2):

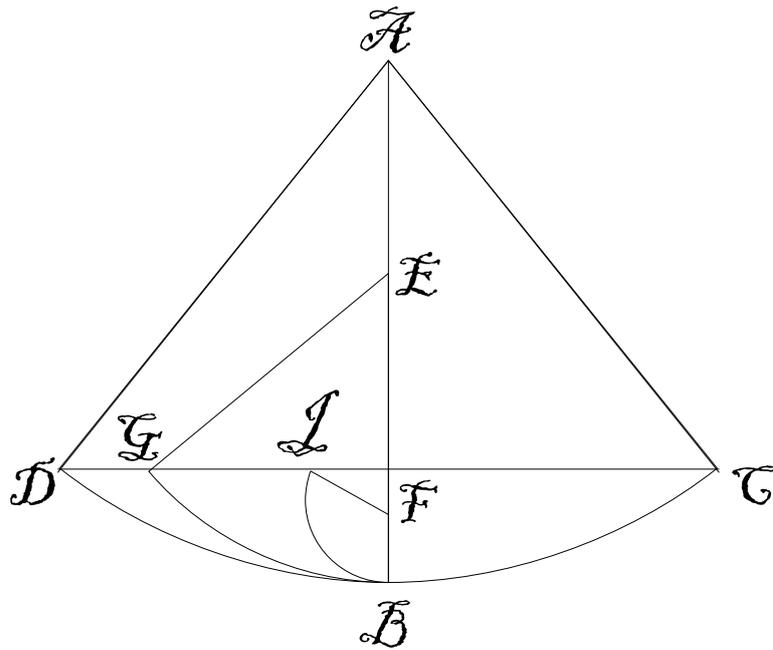


Abbildung 3.2: Galileis Pendelversuch

„Man kann sicher schließen (weil B der tiefste Punkt ist), dass die Geschwindigkeit, die eine Kugel nach dem Herabfallen durch den Bogen CB im Punkt B erlangt, hinreichend sei, um die Aufwärtsbewegung durch einen gleich großen Bogen BD bis zur gleichen Höhe zu bewirken.“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 95)

Dieses Experiment erweiterte er um das Anbringen eines Stiftes im Punkt E , welcher das Pendel dazu veranlasst, den Bogen BG mit E als Mittelpunkt zu beschreiben. Wir kennen diese Vorrichtung als gehemmttes Pendel. Dass in diesem Fall das Pendel wieder dieselbe Ausgangshöhe erreicht und dieser Fall auch eintritt, wenn man den Stift im Punkt F anbringt, veranlasst Galilei zu folgender Aussage:

„Das beim Fall durch den Bogen DB hervorgerufene Moment müsse gleich dem Moment sein, das denselben Körper von B bis D aufwärts bewegte, sodass also allgemein jedes beim Fall erzeugte Moment gleich dem Moment sei, das den Körper durch denselben Bogen zu erheben vermochte, aber alle Momente, die den Körper durch die Bögen BD , BG , BI heben konnten, sind einander gleich, da sie stets im Fall durch CB entstanden waren, wie es uns das Experiment lehrt.“ (zitiert nach

Schirra, 14.09.1989, S. 95)

Heute würden wir sagen, dass beim Pendel eine periodische Umwandlung von potentieller Energie in kinetische Energie stattfindet und umgekehrt. In den Punkten *C* und *D* hat die Masse die größte potentielle Energie und im Punkt *B* ist diese gänzlich in kinetische Energie umgeformt. Diese kinetische Energie wird dann wieder in potentielle Energie umgewandelt. Aufgrund der Energieerhaltung steigt die Masse immer wieder auf die Ausgangshöhe.

Mit diesem Experiment hat Galilei folgende Proportionalität bestätigt.:

$$v^2 \propto h. \quad (3.16)$$

Die Energieerhaltung die in diesem Experiment sehr deutlich demonstriert wird, war Galilei noch nicht so klar, doch reichte diese Proportionalität, die einer Geschwindigkeit eine potentielle Höhe zuschreibt, bereits weit an den Energieerhaltungssatz der Mechanik (3.1.1.2) heran und stellte für Huygens eine wichtige Grundlage dar, um sich dem Energieerhaltungssatz der Mechanik zu nähern (3.1.3.1).

3.1.3 Die Erhaltung als Denkprinzip in der Mechanik

3.1.3.1 Die Untersuchung von Stoßvorgängen als Beitrag zur Genesis des Energieerhaltungssatzes der Mechanik

Etwa zeitgleich mit Galilei hat sich auch René Descartes (1596-1650) mit Fragestellungen zur Mechanik beschäftigt. Dabei war das Denkprinzip der Erhaltung, das er auf einen unveränderlichen Schöpfer zurückführt von hoher Bedeutung (siehe dazu Schirra, 14.09.1989, S. 91ff). Descartes kam zu dem Schluss, dass der Bewegungsquantität mv Erhaltungseigenschaften zuzuschreiben sind. Auf den Arbeiten Descartes aufbauend hat sich der niederländische Physiker Christiaan Huygens (1629-1695) ähnlichen Problemen gewidmet. Er interessierte sich u.a. für die Arbeitsfähigkeit bewegter Massen. Experimente zum Zusammenstoß harter Kugeln brachten ihn zu dem Ergebnis, dass die Erhaltung der Größe mv^2 gelten muss. Im Jahre 1668 stellte die Royal Society die Erklärung der Stoßprozesse als wissenschaftliche Aufgabe, woraufhin Huygens 1669 in seiner Lösung folgende Aussage machte:

„Die Summe der Produkte aus den Massen der Körper und den Quadraten der Geschwindigkeit ist vor und nach dem Stoß gleich.“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 99)

Dieser Erkenntnis liegen folgende Betrachtungen zugrunde, die er erst 1703 in seinem Werk „De Motu Corporum ex munto impulso“ veröffentlichte:

Huygens realisierte den Stoß zweier Kugeln gleicher Massen in zwei gegeneinander bewegten Bezugssystemen durch ein mit der Geschwindigkeit v fahrendes Boot, auf dem eine Kugel mit derselben Geschwindigkeit v in Fahrtrichtung schwingt. Diese Kugel lässt er gegen eine ruhende Kugel am Ufer stoßen. Aus Sicht des Bootes stoßen die beiden Kugeln mit gleicher Geschwindigkeit gegeneinander. Aus Sicht des Ufers stößt die eine Kugel mit der Geschwindigkeit $2v$ gegen eine ruhende Kugel. Nach dem Stoß hat die vorher ruhende Kugel aus Sicht des Ufers die Geschwindigkeit $2v$ und die andere Kugel ruht. Aus Sicht des Bootes haben beide Kugeln die Geschwindigkeit v , sie haben lediglich die Richtung getauscht. Daraus wird ersichtlich, dass gleiche Kugeln beim Stoß ihre Geschwindigkeiten tauschen und zwar invariant bezüglich der Wahl des Inertialsystems.

Zur mathematischen Beschreibung ordnet Huygens den Geschwindigkeiten u_1 und u_2 vor dem Stoß gemäß der Proportionalität $v^2 \propto h$ (3.16) die hypothetischen Fallhöhen $u_1^2 \propto h_1$ und $u_2^2 \propto h_2$ zu, sodass für den zugeordneten Schwerpunkt des Systems h_s gilt:

$$h_s = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2}{m_1 + m_2}. \quad (3.17)$$

Nach dem Stoß können die Geschwindigkeiten v_1 und v_2 die Massen in die gedachten Steighöhen $v_1^2 \propto h_3$ und $v_2^2 \propto h_4$ befördern. Huygens ging bei seinen Überlegungen von der Schwerpunkterhaltung (3.1.1.5) aus, sodass gelten muss:

$$h_s = \frac{m_1 h_3 + m_2 h_4}{m_1 + m_2}. \quad (3.18)$$

Aus der Gleichsetzung von 3.17 und 3.18, das aufgrund der Schwerpunkterhaltung möglich ist, folgte die Behauptung Huygens:

$$m_1 u_1^2 + m_2 u_2^2 = m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2. \quad (3.19)$$

Diese Überlegungen legen den verlustfreien Wechsel einer Größe eines Systems in zwei unterschiedliche Formen nahe. Die eine Form ist die Steighöhe des Schwer-

punkts im Schwerfeld der Erde und die andere hängt mit mv^2 zusammen. Mathematisch lässt es sich so ausdrücken:

$$\sum mv^2 \propto \sum mh. \quad (3.20)$$

Huygens war sich auch sicher, dass die Erhaltung der Größe mv^2 nicht nur auf Stoßprozesse allein beschränkt ist. Er meinte:

„Es ist ein Erhaltungsgesetz, dass die Körper ihre Aufstiegskraft bewahren müssen und deshalb muss die Summe ihrer Geschwindigkeitsgerade die Gleiche bleiben. Wie ich beobachtet habe, findet diese Gesetzmäßigkeit ihre Bestätigung nicht nur bei dem physikalischen Pendel und dem Stoß elastischer Körper, sondern auch bei vielen anderen mechanischen Untersuchungen.“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 102)

Huygens ist damit nicht nur der heutigen Formulierung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik (siehe 3.1.1.2) sehr nahe gekommen, sondern zeigte auch, wie effizient das Nutzen der Erhaltung als Denkprinzip (in seinem Fall die Schwerpunkterhaltung) sein kann.

Die Arbeiten von Descartes und Huygens veranlassten auch Leibniz (1642-1716) einen Beitrag zu diesen physikalischen Fragestellungen zu leisten. Er formulierte, dass bewegten Körpern eine „vis viva“ zuzuordnen sei, die sich zu mv^2 ergibt. Ruhenden Körpern hingegen kann die „vis mortua“ zugeschrieben werden, um den Anreiz zur Bewegung zu beschreiben. Auf diesen Begrifflichkeiten aufbauend formuliert Leibniz die Hypothese, dass die lebendige Kraft dem Erhaltungsprinzip unterworfen sei. Diese Behauptung wurde jedoch von Isaac Newton (1643-1727) mit dem Hinweis auf ständigen Verlust von Bewegung bei vielen mechanischen Prozessen kritisiert.

Bezeichnend für jene Zeit ist der Streit um das rechte Kräftemaß bei bewegten Körpern, das Descartes mit mv und Leibniz (und Huygens) mit mv^2 angegeben haben. Die physikalischen und philosophischen Gelehrten teilten sich damals dementsprechend in zwei Lager, die einen heftigen Disput führten (siehe dazu Schirra, 14.09.1989, S. 112ff). Dieser Streit wurde im 18. Jahrhundert durch die analytische Beschreibung der Mechanik durch Leonhard Euler (1707-1783) und

Jean-Baptiste le Rond d'Alembert (1717-1783) geschlichtet, die herausstellten, dass im Grunde beide Recht hatten. Die unterschiedlichen Kräftemaße rühren von unterschiedlichen Sichtweisen her. Die newtonsche Kraft kann nämlich in zweifacher Weise beschrieben werden. Einmal als die zeitliche Momentaufnahme der Bewegungsgröße mv , so dass gilt:

$$F = \frac{d(mv)}{dt}. \quad (3.21)$$

Andererseits kann sie auch als die räumliche Veränderungsrate von $\frac{m}{2}v^2$ aufgefasst werden, was formal folgendermaßen ausgedrückt werden kann:

$$F = \frac{d(\frac{mv^2}{2})}{ds}. \quad (3.22)$$

Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) hat es dann in folgende mathematische Form gegossen: Die Größe mv entspricht dem Zeitintegral der newtonschen Kraft:

$$mv = \int F dt. \quad (3.23)$$

Und die Größe mv^2 kann mit dem Wegintegral der newtonschen Kraft gleichgesetzt werden:

$$mv^2 = 2 \int F ds. \quad (3.24)$$

Heute würden wir sagen, dass es sich bei den beiden Größen um den Impuls und die kinetische Energie handelt.

3.1.3.2 Untersuchung inelastischer Stöße zur Findung neuer Energieformen

Manche Phänomene ließen aber noch Zweifel an der strikten Validität der Energieerhaltung aufkommen. Ein solches Phänomen war der Stoß inelastischer Kugeln. Dieser wurde vor allem durch Johann Bernoulli (1667-1748) beschrieben. Durch den Glauben an die Erhaltung sah er die Einführung weiterer Energieformen für nötig, wie etwa die innere potentielle Energie. Wörtlich heißt es bei ihm:

„Wenn die Körper nicht vollkommen elastisch sind, so wird ein Teil der vis viva, welche vernichtet zu werden scheint, bei der Kompression der Körper verbraucht, weil sie nicht vollständig ihren Zustand annehmen. Wir sehen jene Kompression jener Körper an als vergleichbar mit einer Feder, welche nach dem zusammengedrückten Zustand durch einen

Riegel gehindert wird, ihre frühere Form wieder einzunehmen, also auch nicht die ganze lebendige Kraft, die sie von einem stoßenden Körper erhalten hat, demselben zurückzugeben. Deshalb wird keine Kraft vernichtet, wenn sie auch verloren zu sein scheint.“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 125)

Diese Gedanken regten zur Suche einer inneren potentiellen Energie an, die zur Grundlage der kinetischen Gastheorie, zu der Daniel Bernoulli (1700-1782) wichtige Beiträge leistete (siehe dazu Schirra, 14.09.1989, S. 126ff), wurde.

3.2 Astronomie

3.2.1 Die Erhaltung als Gesetz in der Astronomie

Bereits die frühe Anwendung der Himmelsmechanik impliziert mehrere Erhaltungsgrößen. Doch die Tatsache wurde den Astronomen historisch erst dann bewusst, als die Formulierungen für Energie- und Impulserhaltung aus der Mechanik vorlagen. Wir kommen deshalb in der Astronomie gleich zur Rolle der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit.

3.2.2 Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Astronomie

3.2.2.1 Das erste keplersche Gesetz und die Energieerhaltung

Das erste keplersche Gesetz besagt, dass sich ein Planet auf einer elliptischen Bahn um eine Sonne bewegt. In einem der Ellipsenbrennpunkte befindet sich das Zentralgestirn. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass die große Halbachse durch die Energieerhaltung festgelegt ist (vgl. Pfau, 2011, S. 106ff). Der Radius r kann bei Ellipsen durch die sogenannte Polargleichung der Kegelschnitte wie folgt beschrieben werden:

$$r(\varphi) = \frac{k}{1 + \epsilon \cos(\varphi)}. \quad (3.25)$$

Dabei ist k der sogenannte Halbparameter der Ellipse und ϵ die numerische Exzentrizität. Diese steht mit der linearen Exzentrizität e wie folgt im Verhältnis:

$$\epsilon = \frac{e}{a}. \quad (3.26)$$

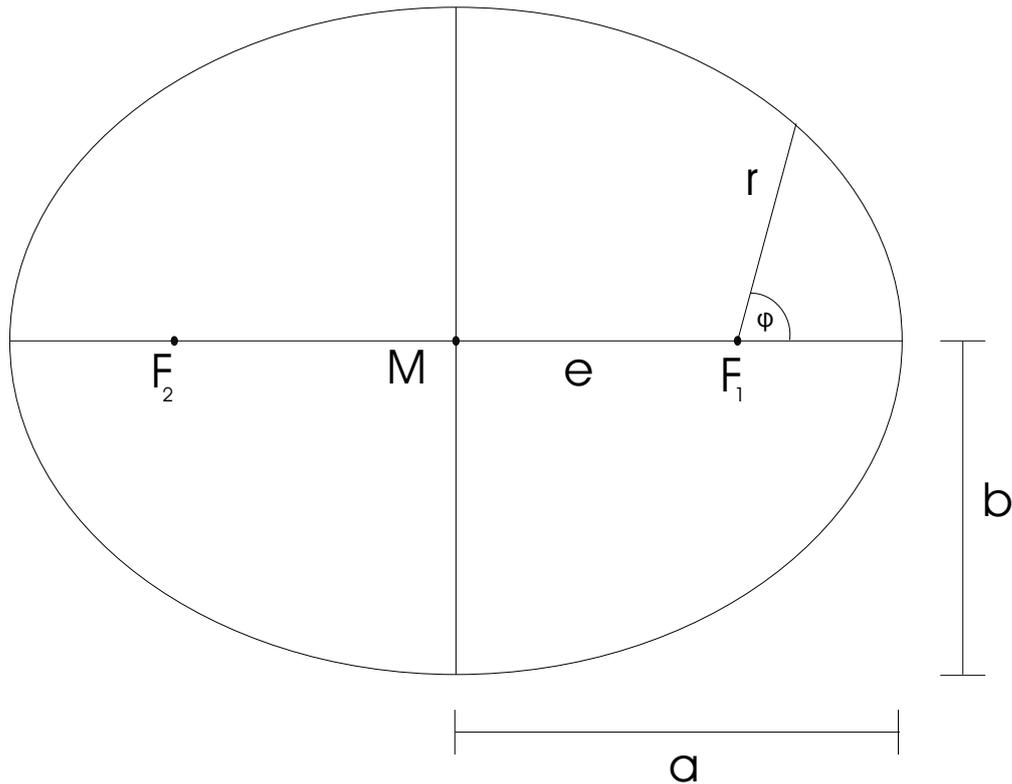


Abbildung 3.3: Zur Geometrie einer Ellipse

Für Ellipsen nimmt die numerische Exzentrizität einen Wert zwischen 0 und 1 an, da die Hauptachse a länger ist als die lineare Exzentrizität e .

Für die Bewegung eines Planeten der Masse m um die Sonne der Masse M kann der Halbparameter k mit dem Drehimpuls $\vec{L} = \vec{r} \times m\dot{\vec{r}}$ und der Gravitationskonstanten G wie folgt ausgedrückt werden (Pfau, 2011, S. 94f):

$$k = \frac{|\vec{L}|^2}{GMm^2}. \quad (3.27)$$

Für die Gesamtenergie des Systems gilt:

$$E = \frac{m}{2}\dot{\vec{r}}^2 - G\frac{Mm}{r}. \quad (3.28)$$

Da für die zeitliche Änderung des Radiusvektors $\dot{\vec{r}} = \dot{r}\vec{e}_r + r\dot{\varphi}\vec{e}_\varphi$ gilt, kann (3.28) auch folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$E = \frac{m}{2}\dot{r}^2 + \frac{L^2}{2mr^2} - G\frac{Mm}{r}. \quad (3.29)$$

Wählen wir für die weiteren Betrachtungen das Perihel, so dass gilt $\dot{r}|_{r=r_p} = 0$.

Damit lässt sich die Polargleichung (3.25) wie folgt ausdrücken:

$$r_p = \frac{k}{1 + \epsilon}. \quad (3.30)$$

Damit wird aus 3.29:

$$E = \frac{L^2}{2mr_p^2} - G\frac{Mm}{r_p}. \quad (3.31)$$

Setzt man nun noch den nach $|\vec{L}|^2$ umgestellten Ausdruck (3.27) ein, so erhält man:

$$E = \frac{GMmk}{2r_p^2} - G\frac{Mm}{r_p}. \quad (3.32)$$

Den Halbparameter k kann man mit dem Ausdruck (3.30) ersetzen. Dann gilt:

$$E = \frac{GMm(1 + \epsilon)}{2r_p} - \frac{GMm}{r_p}. \quad (3.33)$$

Durch Vereinfachungen erhält man den Ausdruck:

$$E = G\frac{Mm}{2r_p}(\epsilon - 1). \quad (3.34)$$

Den Perihel-Radius kann man auch mit der großen Haupthalbachse a als

$$r_p = a(1 - \epsilon) \quad (3.35)$$

ausdrücken. Damit wird aus (3.34):

$$E = -G\frac{Mm}{2a} \quad (3.36)$$

oder nach a umgestellt

$$a = -G\frac{Mm}{2E}. \quad (3.37)$$

Aus dieser Formel wird deutlich, dass die große Halbachse durch die Energieerhaltung festgelegt ist. Da die Gesamtenergie eines Planeten erhalten bleibt, sind alle Terme auf der rechten Seite konstant, wodurch die große Haupthalbachse a festgelegt ist.

3.2.2.2 Das zweite keplersche Gesetz und die Drehimpulserhaltung

Der Begriff des Drehimpulses war zur Zeit Keplers noch nicht exakt definiert und damit die Drehimpulserhaltung auch noch nicht bekannt. Um so größer erscheint die Leistung Keplers, der die vielen ihm zur Verfügung stehenden Beobachtungsdaten in drei relativ einfachen Gesetzen beschrieben hat. Das zweite keplersche Gesetz besagt, dass der Radiusvektor eines Planeten, der um eine Sonne kreist, in gleicher Zeit gleiche Flächen überstreicht. Mit den heute bekannten

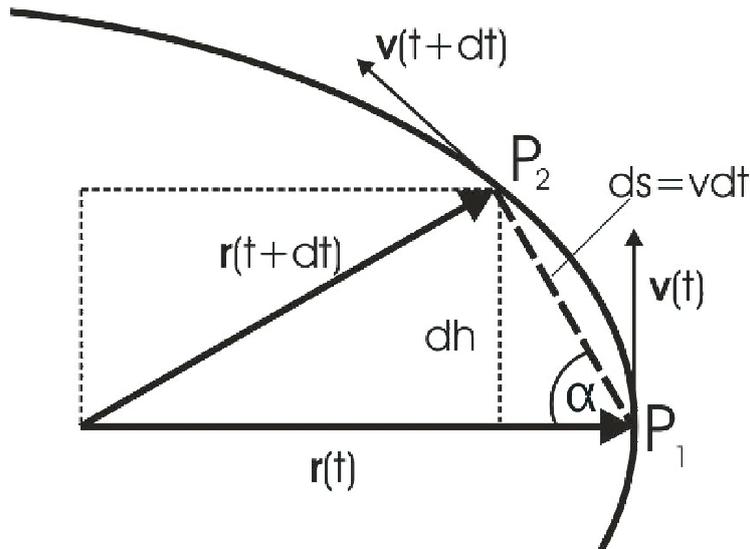


Abbildung 3.4: Das zweite keplersche Gesetz

physikalischen Begriffen erkennt man, dass dieser Satz eine Konsequenz aus dem Drehimpulserhaltungssatz ist. Dies kann folgendermaßen verständlich werden: In Abbildung 3.4 betrachten wir den Radiusvektor zu einem Zeitpunkt t und in einem infinitesimal kleinen Zeitraum dt später. In dieser Zeit hat sich der Planet von P_1 nach P_2 bewegt. Da aus $dt \rightarrow 0$ folgt, dass $ds \rightarrow 0$ und $\alpha \rightarrow 0$ können wir das Flächensegment der Ellipse wie folgt ausdrücken:

$$dA = \frac{1}{2} |\vec{r}| dh. \quad (3.38)$$

Für dh lässt sich auch $|\vec{v}| dt \sin \alpha$ schreiben, sodass für die Fläche gilt:

$$dA = \frac{1}{2} |\vec{r}| |\vec{v}| dt \sin \alpha. \quad (3.39)$$

Für die Änderung der Fläche nach der Zeit \dot{A} gilt dann:

$$\dot{A} = \frac{1}{2} |\vec{r}| |\vec{v}| \sin \alpha. \quad (3.40)$$

Erweitert man die rechte Seite nun um die Masse m des Planeten, so lässt sie sich mit dem Drehimpuls $L = |\vec{r} \times \vec{p}|$ wie folgt ausdrücken:

$$\dot{A} = \frac{1}{2m} |\vec{r} \times \vec{p}| = \frac{1}{2m} |\vec{L}|. \quad (3.41)$$

Damit ist gezeigt, dass die pro Zeiteinheit überstrichene Fläche proportional zum Betrag des Drehimpulses $|\vec{L}|$ ist. Da nun der Drehimpuls erhalten bleibt, ist die zeitliche Änderung der Fläche in allen Punkten der Bahn konstant.

3.2.2.3 Das Swing-by-Manöver

Unter einem Swing-by-Manöver versteht man in der interplanetaren Raumfahrt das Vorbeifliegen eines relativ leichten Raumflugkörpers (etwa einer Raumsonde) an einem massereichen Körper (z.B. einem Planeten) zur Änderung der Flugbahn sowie der kinetischen Energie des Raumflugkörpers (siehe Abbildung 3.5). Voyager 1 und Voyager 2 wurden beispielsweise durch ein Swing-by-Manöver am Saturn auf die dritte kosmische Geschwindigkeit beschleunigt. Wie ist ein solches

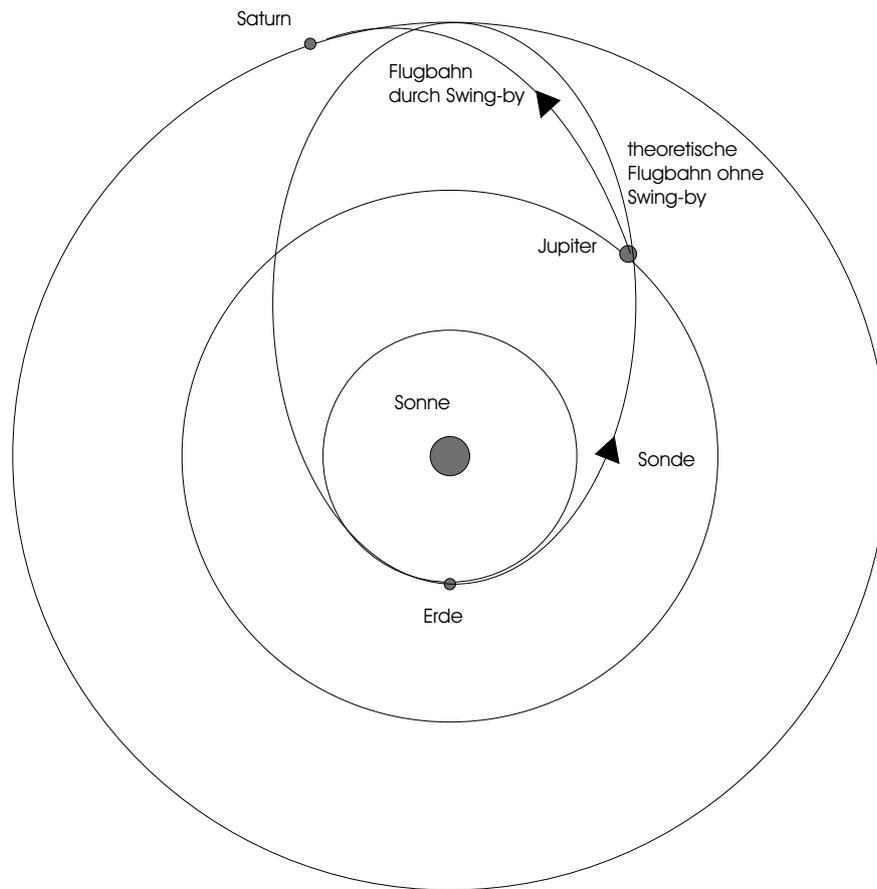


Abbildung 3.5: Swing-by-Manöver am Jupiter

Manöver mit dem Energieerhaltungssatz zu vereinbaren? Woher bezieht die Sonde ihren Zuwachs an kinetischer Energie?

Die Gesetzmäßigkeit der Energieerhaltung stellt für das Swing-by-Manöver die physikalische Grundlage dar. Die Betonung derselben ist für das Verständnis dieses raumfahrttechnischen Manövers von besonderer Bedeutung (Schwarz, 2003). Die Beschleunigung der Sonde ist nur aufgrund der Verzögerung des Planeten bei seiner Bewegung um die Sonne möglich. Aufgrund der Massenverhältnisse

stellt die Verlangsamung des Planeten jedoch keinen merklichen Effekt dar. Ein Swing-by-Manöver ist folglich nur bei einem Dreikörperproblem möglich. D. Wiss vergleicht diesen Sachverhalt in seinem Artikel „Swing-by-Manöver - Was steckt dahinter?“ (Wiss, 2003) mit dem Aufschlag eines Tennisballs. Der Ball kommt, nachdem er hochgeworfen wurde, mit einer Geschwindigkeit angefliegen und trifft auf den Tennisschläger, der sich mit einer (in der Regel höheren) Geschwindigkeit in eine andere Richtung bewegt. Dadurch wird der Tennisball beschleunigt - seine Richtung ändert sich in die Richtung der Geschwindigkeit des Schlägers und auch dem Betrag nach erfährt der Ball einen Zuwachs. Dies wird, aufgrund der Energieerhaltung, mit einer Verlangsamung des Schlägers „bezahlt“.

3.2.3 Die Erhaltung als Denkprinzip in der Astronomie

3.2.3.1 Die Entdeckung des Neptun

In der ersten Hälfte des 19. Jh. war die Theorie der Himmelsmechanik und die Beobachtungsgenauigkeit soweit entwickelt, dass die Planetenbahnen relativ genau vorhergesagt werden konnten. Verwunderlich war jedoch die Tatsache, dass Uranus, der damals äußerste bekannte Planet, merklich von der berechneten Bahn abwich. Da Uranus der einzige Planet war, der derartige Abweichungen zu den theoretischen Tabellen aufwies, musste dafür eine besondere Ursache existieren. M. Grosser nennt in seinem Buch „Die Entdeckung des Neptun“ fünf Erklärungsansätze, die damals formuliert wurden (Grosser, 1970, S. 47ff):

1. Die eine Lösungsidee war das Wiederaufgreifen der descartschen Hypothese einer kosmischen Flüssigkeit, die jedoch völlig spekulativ war und auch jeglichen konkreten Erklärungsansatz der Uranusabweichung vermissen ließ.
2. Eine weitere Vermutung war, dass die Abweichungen durch einen massereichen Satelliten verursacht werden. Dieser müsste jedoch bei den für Satelliten bekannten Dichten so groß sein, dass er zu beobachten wäre. Außerdem wären die von einem Satelliten verursachten Abweichungen von kürzerer Dauer als die beobachteten Abweichungen.
3. Desweiteren wurde angenommen, dass eine Katastrophe, wie etwa das Nahkommen eines Kometen, zur Zeit der Entdeckung des Uranus (1781) für

die Abweichungen verantwortlich sei. Dauerhaft erklärte dieser Ansatz die Uranusbahn jedoch nicht.

4. Von einigen Astronomen jener Zeit wurde das Gravitationsgesetz in der Weise angezweifelt, als dass es bei großer radialer Entfernung etwas verändert werden müsse. Ideen gingen dahin, dass das Gravitationsgesetz neben dem $\frac{1}{r^2}$ Glied noch ein $\frac{1}{r^4}$ Glied erhalten müsse.
5. Zeitlich gesehen als letztes wurde die Idee eines achten Planeten im Sonnensystem ins Spiel gebracht. Die Position eines solchen Planeten konnte schon vor seiner Entdeckung, vor allem durch die Erhaltungssätze der Himmelsmechanik, recht genau vorhergesagt werden. Die tatsächliche Entdeckung gelang dann Johann Gottfried Galle (1812-1910) am 23.09.1846 an der Berliner Sternwarte nach der Vorhersage Urbain Jean Joseph Leverriers (1811-1877).

Dieses Ereignis wird nicht selten als Paradebeispiel zur Verdeutlichung der Effektivität des Denkens im Erhaltungsprinzip genannt. Im Lehrbuch zur Mechanik im Berkley Physik Kurs wird es als historisches Beispiel im Kapitel „Die Erhaltung der Energie“ erwähnt (Kittel u. a., 1973, S. 105f), oder auch im Artikel „Analogien“ von O. Timmer, der in der Entdeckung des Neptun eine Analogie zur Entdeckung des Antineutrino (siehe dazu 3.5.3.2) sieht. Historisch gesehen hat die Erhaltung bei der Entdeckung des Neptun sicherlich mitgepielt, doch nicht in einer so tragenden Rolle wie bei der Deutung der Energiebilanz des β -Zerfalls (3.5.3.2). Beim Ringen um die Erklärung der Abweichung der Uranusbahn wurden, wie erwähnt, mehrere Hypothesen formuliert und die hypothetische Annahme eines achten Planeten im Sonnensystem geschah nicht nur aus dem Festhalten an den Erhaltungssätzen. Unter diesem Vorbehalt stellt die Entdeckung des Neptun dennoch ein Beispiel der Erhaltung als Denkprinzip dar.

3.2.3.2 Helmholtz zur Abschätzung der Lebensdauer der Sonne

In der Mitte des 19. Jahrhunderts hat Hermann von Helmholtz (1821-1894) mit seiner Schrift „Über die Erhaltung der Kraft“ (Helmholtz, 1902) auf die Univer-

salität der Energieerhaltung⁶ hingewiesen. Diese Erkenntnis wendete er auf alle möglichen Teilgebiete der Physik an, um bisher bekanntes Wissen neu zu erklären oder auch um Erklärungsansätze für unerforschte Bereiche zu formulieren. So widmete er sich auch der Frage, woher die Sonne ihre Leuchtkraft bezieht. Die Sonne stellt für die Erde die Hauptenergiequelle dar. Bei allen Energieumwandlungsketten stößt man früher oder später auf die Sonne mit der Frage nach ihrer Energiequelle. Da Energie nicht erzeugt werden kann, muss auch die Sonne über eine „Quelle“ der Energie verfügen. In den Vorträgen zu den Themen „Über die Entstehung des Planetensystems“⁷ und „Über die Wechselwirkung der Naturkräfte“⁸ widmete sich Helmholtz genau dieser Frage. Zunächst geht er der Hypothese nach, dass die Sonne über Verbrennungsprozesse ihre Energie bezieht. Dabei nahm er optimistisch an, dass auf der Sonne die beiden Stoffe mit der größten spezifischen Verbrennungswärme verbrannt werden. Konkret ging er davon aus, dass die Sonne aus Wasserstoff und Sauerstoff besteht, die sich durch Verbrennung zu Wasser vereinigen. Mit der bekannten Sonnenmasse würde dieses Brennen 3021 Jahre währen. Damit musste diese Hypothese verworfen werden, da dies einen deutlich zu kurzen Zeitraum darstellt.

Weiter ging er der von Robert Meyer (1814-1878) geäußerten Hypothese nach, dass die Sonne analog zu den Meteoriten, die beim Eindringen in die Erdatmosphäre verglühen, ihre Wärme durch den permanenten Einschlag von Meteoriten beziehen würde. Diese Hypothese konnte gleich verworfen werden, denn es gilt neben der Energieerhaltung auch die Massenerhaltung. Würde die Sonne ihre Energie durch den Einschlag von Meteoriten beziehen, so wäre ihre Masse schon soweit angestiegen, dass sich der Massenzuwachs merklich auf die Planetenbahnen ausgewirkt hätte.

Angeleitet durch das Prinzip der Erhaltung der Kraft machte er den Vorschlag, dass die Sonne kontrahieren und dadurch potentielle Energie in thermische Ener-

⁶Der Terminus „Energie“ wurde zur Zeit Helmholtz noch nicht in der heute geläufigen Weise verwendet. Was er mit „Kraft“ betitelt, entspricht dem, was wir heute als „Energie“ bezeichnen.

⁷Diesen Vortrag hat Helmholtz 1871 in Heidelberg und Köln gehalten (nachzulesen in Helmholtz, 1871).

⁸Diesen Vortrag hat Helmholtz 1871 in Königsberg gehalten (nachzulesen in Helmholtz, 07.02.1984).

gie umwandeln solle. Dieser Hypothese ist er in dem Vortrag „Über die Wechselwirkung der Naturkräfte und der darauf bezüglichen neuesten Ermittlungen der Physik“ quantitativ nachgegangen. Das Gravitationspotential ϕ eines Sterns ist im Abstand r zum Mittelpunkt:

$$\phi(r) = \frac{GM(r)}{r}. \quad (3.42)$$

Die Masse wiederum ist eine Funktion des Radius und ergibt sich mit der mittleren Massendichte ρ aus

$$M(r) = \frac{4}{3}\pi\rho r^3. \quad (3.43)$$

Eine infinitesimal kleine Schicht am Rand des Sterns hat die Masse:

$$dm(r, dr) = 4\pi r^2 \rho dr. \quad (3.44)$$

Die potentielle Energie dieser Schicht ergibt sich aus dem Produkt aus Potential und Masse $dm(r, dr)$, sodass gilt:

$$dE = \frac{G}{r} \frac{4}{3}\pi\rho r^3 4\pi r^2 \rho dr. \quad (3.45)$$

Helmholtz sah die Energiequelle der Leuchtkraft der Sonne in der Kontraktion vom Rand des Planetensystems auf die heutige Größe. Als Rand des Planetensystems nahm er die Umlaufbahn des Neptun an (etwa 6000 R, wenn R der Sonnenradius ist). Es galt folglich den Term (3.45) von 6000 R bis R zu integrieren, was folgenden Wert ergab:

$$E = \int_{6000R}^R dE(r) = \frac{16}{3}\pi^2\rho^2 G \int_{6000R}^R r^4 dr = \frac{3GM^2}{5} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{6000R} \right). \quad (3.46)$$

Rechnet man diese Energie mit den entsprechenden Werten der Sonne aus⁹ und teilt dies durch die Leuchtkraft, so erhält man einen Zeitwert von ca. 19 Mio. Jahren. Dieses Ergebnis ist weit realistischer als die Zeiträume, die die Sonne entsprechend der anderen Hypothesen in der Vergangenheit hätte leuchten können.

Durch weitere Kontraktion, so Helmholtz weiter, würde die Sonne noch weitere 17 Mio. Jahre leuchten können, bis sie die Dichte der Erde erreicht.

⁹Helmholtz hat nur die Sonnenmasse in Rechnung gestellt, und nicht die Masse des Sonnensystems, da die Sonnenmasse 738 mal größer ist als die Masse aller Planeten.

Aus heutiger Sicht ist dieser Theorie manches hinzuzufügen. Zum einen der Virialsatz, der besagt, dass nur die Hälfte der potentiellen Energie in Wärme umgewandelt werden kann und zum anderen die Kernfusion, die, wie wir heute wissen, die Hauptenergiequelle der Sonne darstellt. Der Ansatz Helmholtz' beschreibt jedoch das frühe Stadium eines Sterns, bis die Kernfusion zündet. Doch auch wenn dieser Ansatz die Frage nach der Energiequelle der Sonne nicht hinreichend beantworten kann, so ist die Leistung Helmholtz' doch beachtlich. Die Genialität dieser Überlegungen ist auf das konsequente Anwenden des Erhaltungsgedankens zurückzuführen. Es stellt eine erste Anwendung der allgemeinen Energieerhaltung dar, die in allgemeinerer Form im ersten Hauptsatz der Thermodynamik kurze Zeit später vervollkommen wurde.

3.3 Thermodynamik

3.3.1 Die Erhaltung als Gesetz in der Thermodynamik:

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik kann auf Rudolf Clausius (1822-1888) zurückgeführt werden, der 1850 die Äquivalenz zwischen Wärme und Arbeit als den 1. Grundsatz der Wärmetheorie bezeichnete. Er kommentierte,

„dass in allen Fällen, wo durch Wärme Arbeit entstehe, eine der erzeugten Arbeiten proportionale Wärmemenge verbraucht werde, und dass umgekehrt durch Verbrauch einer ebenso großen Arbeit dieselbe Wärmemenge erzeugt werden könne.“ (Clausius, 1850, S. 373)

Daraus lässt sich auch schlussfolgern, dass Wärme keine Zustandsgröße sein kann, sondern der mechanischen Arbeit verwandt ist und damit als Austauschgröße gewertet werden muss, da sie die Änderung eines Systemzustandes beschreibt. Mathematisch formuliert kann man schreiben:

$$\delta Q = dU + pdV. \quad (3.47)$$

Das Hinzufügen von Wärme führt folglich zu einer Änderung der inneren Energie oder zur Verrichtung der Arbeit pdV . Dieser Sachverhalt ist als 1. Hauptsatz der

Thermodynamik bekannt. Mit anderen Worten ausgedrückt, ist die Summe der einem System von außen zugefügten Wärme und der von außen zugefügten Arbeit gleich der Zunahme der inneren Energie: $dU = \delta Q + \delta W$. Dies ist nichts anderes, als eine andere Form des Energieerhaltungssatzes, wie dies Helmholtz als Erster aussprach und begründete, als er 1877 den 1. Hauptsatz auf alle Gebiete der Physik mit ihren entsprechenden Energieformen übertrug (Schirra, 14.09.1989, S. 305). Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Identifikation nicht produktiv, sondern regulativ zu verstehen ist, denn nach dem Erhaltungsprinzip der Energie können alle Vorgänge in beide Richtungen stattfinden, die durch diese Gleichung beschriebenen Prozesse stellen in der Natur jedoch eine „Einbahnstraße“ dar. Die Begründung dafür liegt im 2. Hauptsatz der Thermodynamik.

3.3.2 Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Thermodynamik: Die Erhaltung in der kinetischen Gastheorie

Der Erste, der 1738 die Energie statistisch deutete, war Daniel Bernoulli (1700-1782) in seinem Werk „Hydrodynamica“ (Bernoulli, 1738), indem er postulierte, dass Wärme als eine verstärkte innere Bewegung der Teilchen betrachtet werden könne. Die erste fundierte Erklärung der Wärmeenergie ist in dem Werk „Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen“ von Clausius aus dem Jahre 1857 zu finden (Clausius, 1857). Dort wird die Grundgleichung der kinetischen Gastheorie formuliert:

$$RT = pV = \frac{1}{3}m\overline{v^2} \quad \text{mit} \quad T \sim m\overline{v^2}, \quad (3.48)$$

die den Zusammenhang zwischen der makroskopischen und mikroskopischen Energie eines Zustands beschreibt:

$$pV = \frac{1}{3}m\overline{v^2} = \frac{2}{3} \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{2}{3}\overline{E_{kin}}, \quad (3.49)$$

wobei $\overline{E_{kin}}$ die mittlere kinetische Energie der Schwerpunktbewegung eines Moleküls und pV die äußere Arbeit des Gases bedeuten.

Angeregt durch die Arbeit von Daniel Bernoulli hat es sich J. C. Maxwell (1831-1879) zur Aufgabe gemacht, die Geschwindigkeiten dieser kleinen Teilchen genau-

er zu untersuchen, da er, wie N. Schirra kommentiert, unzufrieden mit den bisherigen Verteilungen, keinen unmittelbaren Bezug zum Energieerhaltungsprinzip erkennen konnte (Schirra, 14.09.1989, S. 321). In seinem 1867 publizierten Aufsatz „On the dynamical theory of gases“ formulierte er für die Verteilungsfunktion F bei sich stoßenden Molekülen die Forderung (mit den Geschwindigkeiten u_1 und u_2 vor und den Geschwindigkeiten v_1 bzw. v_2 nach dem Stoß):

$$F(u_1^2) \cdot F(u_2^2) = F(v_1^2) \cdot F(v_2^2) \quad (3.50)$$

Diese Bedingung muss gelten, weil die Kollision der Moleküle zufällig abläuft, die Geschwindigkeit der Teilchen vor dem Stoß unkorreliert ist und die Verteilung bei den wechselseitigen Stößen stationär bleiben muss.

Mit dem Energieerhaltungssatz aus der klassischen Mechanik

$$\frac{1}{2}mu_1^2 + \frac{1}{2}mu_2^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}mv_2^2 \quad (3.51)$$

hat er für die Geschwindigkeitsverteilung folgende Beziehung hergeleitet¹⁰(Maxwell, 1867, S. 129):

$$F(v^2) \sim e^{-\beta v^2} \quad \text{mit} \quad \beta \sim \frac{1}{T}. \quad (3.52)$$

3.3.3 Die Erhaltung als Denkprinzip in der Thermodynamik

3.3.3.1 Aus der Geschichte der Thermodynamik: Carnot zur Bestimmung des Wirkungsgrades von Dampfmaschinen

Die Verbesserung der Dampfmaschine von James Watt (1736-1819) hatte nicht nur besondere Bedeutung für die Industrialisierung, sondern hat auch die Physik, speziell die Thermodynamik, positiv beeinflusst. Sehr bald nach dieser Erfindung hat man sich um den maximalen Wirkungsgrad einer solchen Maschine Gedanken gemacht. Die wesentlichsten Beiträge zu diesem physikalischen Problem hat der Franzose Sadi Carnot (1796-1832) geleistet, die er in seinem Werk „Réflexion sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance“ (Carnot, 1824) veröffentlichte. Seine Arbeiten sind aus der Zeit heraus zu verstehen, in der noch um die Antwort auf die Frage, was Wärme eigentlich sei,

¹⁰Unabhängig von Maxwell hat Boltzmann 1868 die gleiche Verteilungsfunktion für Energie und Geschwindigkeit hergeleitet.

gerungen wurde. Die Meinungen schieden sich konkret in der Frage, ob es sich bei Wärme um eine Substanz oder eine Bewegung handelt. Den Todesstoß erfuhr die Wärmestofftheorie erst im 18. Jahrhundert durch Bernoulli und Rumford (siehe dazu Kuhn, 2001, S. 347f). Carnot war seiner Zeit von der Wärme als Substanz ausgegangen¹¹. Diesen Wärmestoff („calorium“) hat er als Erhaltungsgröße angenommen. Um nun den Wirkungsgrad einer Dampfmaschine abzuschätzen, hat er die Wärme-Kraftmaschine in Analogie zur Wasser-Kraftmaschine betrachtet. So wie bei einer Wasser-Kraftmaschine Wasser aus einem hohen Wasserstand in einen niedrigeren Wasserstand fällt und dabei Arbeit verrichtet, so „fällt“ bei einer Wärmestoff-Kraftmaschine der Wärmestoff aus einer hohen Temperatur in eine niedrigere und die Kraft des Falls (*puissance d'une chute*) ist im Stande, Arbeit zu verrichten. Bei der Verrichtung von Arbeit bei einer Wasser-Kraftmaschine ist die Höhendifferenz beider Wasserreservoirs von tragender Bedeutung und analog müsste bei einer Wärme-Kraftmaschine die Temperaturdifferenz beider Wärmereservoirs in die Bestimmung des Wirkungsgrades mit einfließen. Geht man nun von der Erhaltung des Wärmestoffes aus, so müsste für den Wirkungsgrad einer Wärme-Kraftmaschine gelten:

$$\eta = \frac{Q(T_1 - T_2)}{QT_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3.53)$$

Dieses Ergebnis ist richtig, auch wenn ihm eine falsche Annahme zugrunde liegt. Wohl gilt bei der Wasser-Kraftmaschine das Prinzip der Massenerhaltung, bei der Wärme-Kraftmaschine jedoch ist die bei einer niedrigeren Temperatur freigesetzte Wärme geringer als die Wärme, die bei einer hohen Temperatur aufgenommen wurde.

3.3.3.2 Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Die Feststellung, dass Wärme ohne Hilfe von außen nur vom Wärmeren zum Kälteren übergeht, dass also in vielen Vorgängen in der Natur eine Irreversibilität vorliegt, stellte in ihrer theoretischen Beschreibung bis zur Mitte des 19. Jahr-

¹¹Erst gegen Ende seines Lebens hat er diese Ansicht verworfen und sich der kinetischen Wärmetheorie angeschlossen.

hunderts noch eine unbezwungene Hürde dar. In der Arbeit Carnots erscheinen zwei Arten von Arbeit inkompatibel:

- Wärmeumwandlungen in reversiblen Kreisprozessen,
- irreversible dissipative Prozesse, wie z.B. Mischvorgänge.

Während im ersten Fall mechanisch nutzbare Energie freigesetzt wird, verschwindet im zweiten Fall ein Teil dieser Nutzenergie. Thomson kommentierte zu diesem Problem 1849:

„Wenn thermische Substanz auf diese Weise bei Wärmeleitung eines Körpers verschwendet wird, was wird aus der mechanischen Wirkung, die sie produzieren könnte? Nichts kann in den Naturvorgängen verlorengehen - keine Energie kann vernichtet werden.“ (Thomson, 1849, pars V, S. 545)

Zur Lösung dieses physikalischen Problems wusste Thomson keinen Rat (Schirra, 14.09.1989, S. 308). Der Erste, dem ein Lösungsansatz gelang, war Rudolf Clausius (1822-1888). Die Vorgehensweise Clausius' beschreibt N. Schirra wie folgt:

„Die Clausiusschen Leitmotive zur Formulierung der beiden Hauptsätze sind [...] konsequente Anwendung des Energieerhaltungssatzes auf die Gedankengänge Carnots“. (Schirra, 14.09.1989, S. 307)

Um die Irreversibilität zu quantisieren, hat Clausius in seiner Argumentation das Irreversibilitäts-Äquivalent S eingeführt, dessen Existenz erst bei der Umkehrung des Prozesses, nämlich beim Wärmefluss vom wärmeren zum kälteren Körper, sichtbar wird. Ein reversibler Kreisprozess kann durch zwei Teilprozesse beschrieben werden, bei denen ein Teilprozess einen positiven Äquivalenzwert S^+ und der andere einen negativen S^- trägt. Der reversible Kreisprozess, bei dem Wärme in Arbeit durch den Wärmefluss zum kälteren Körper und wiederum Arbeit in Wärme durch den Wärmefluss zum wärmeren Körper umgewandelt wird, kann symbolisch durch die Gleichung $S^+ + S^- = 0$ beschrieben werden, die analog zur Energieerhaltung die Struktur einer Irreversibilitätserhaltung aufweist. Dieses Irreversibilitäts-Äquivalent S ist der freigesetzten bzw. aufgewendeten Wärme

und dem reziproken Wert der Temperatur proportional. Damit gilt:

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0 \text{ bzw. } \int \frac{dQ}{T} = 0. \quad (3.54)$$

Clausius hat dies auch für irreversible Prozesse formuliert, bei denen gelten muss:

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} > 0 \text{ bzw. } \int \frac{dQ}{T} > 0. \quad (3.55)$$

Dabei ist der Übergang von höheren zu niedrigeren Temperaturen als negativ festgelegt. Die dadurch beschriebene Zustandsgröße S hat Clausius als Entropie¹² bezeichnet und seine Wortschöpfung wie folgt kommentiert:

„Das Wort Entropie habe ich absichtlich dem Worte Energie möglichst ähnlich gebildet, denn die beiden Größen, welche durch diese Worte benannt werden sollen, sind ihrer physikalischen Bedeutung nach so nahe verwandt, dass eine gewisse Gleichartigkeit in der Benennung mir gerechtfertigt zu sein schien.“ (Clausius, 1865, S. 390)

Mit dieser Interpretation der Entropie hat er den 2. Hauptsatz wie folgt formuliert:

„[...] dass alle in der Natur vorkommenden Verwandlungen in einem gewissen Sinne, welchen ich als den positiven angenommen habe, von selbst, d.h. ohne Kompensation, geschehen können, dass sie aber im entgegengesetzten, also im negativen Sinne, nur in der Weise stattfinden können, dass sie durch gleichzeitig stattfindende positive Verwandlung kompensiert werden.“ (Clausius, 1865, S. 398)

In einem abgeschlossenen System befolgt die Entropie damit nur einen „halben Erhaltungssatz“ (vgl. Schirra, 14.09.1989, S. 310).

3.4 Elektrodynamik

3.4.1 Die Erhaltung als Gesetz in der Elektrodynamik

3.4.1.1 Der Ladungserhaltungssatz

So wie die Masse für die Mechanik eine Grundgröße darstellt, ist die Ladung in der Elektrodynamik eine Grundgröße. Die Ladung ist, wie die Masse, eine Erhaltungs-

¹²Der Begriff Entropie stammt vom griechischen „entrepein“ (= umwandeln).

größe, so dass sich der Ladungserhaltungssatz analog zum Massenerhaltungssatz (Abschnitt 3.1.1) formulieren lässt. Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden - in einem abgeschlossenen System bleibt die Summe der Ladungen konstant. Formal ausgedrückt bedeutet das:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \textit{konstant}. \quad (3.56)$$

Die Erhaltung der Ladung kann auch durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben werden (vgl. Massenerhaltung 3.14). Diese besagt, dass die zeitliche Änderung der Ladungsdichte ρ der negativen räumlichen Änderung der Stromdichte \vec{j} entspricht. Formal lässt sich das so ausdrücken:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \textit{div}(\vec{j}) = 0. \quad (3.57)$$

3.4.1.2 Der Energieerhaltungssatz der Elektrodynamik: Der Satz von Poynting

Da der Energiefluss in einem elektromagnetischen Feld dem Erhaltungsprinzip unterworfen ist, muss die zeitliche Änderung der Gesamtenergie eines Feldes dem Energiefluss durch die umgrenzende Oberfläche entsprechen. Dieser Energiefluss wurde zuerst formal, wenn auch in einer etwas anderen Notation, von John Poynting (1852 -1914) in seinem Aufsatz „On the Transfer of Energy in Electromagnetic Field“ (Poynting, 1855) verfasst¹³.

Ausgangspunkt für eine zweckmäßige Beschreibung sind die ersten beiden maxwellschen Feldgleichungen (zur Entstehung siehe 3.4.3):

$$\textit{rot}\vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.58)$$

$$\textit{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (3.59)$$

Dabei ist \vec{E} die elektrische Feldstärke, \vec{H} die magnetische Feldstärke, \vec{D} die dielektrische Verschiebung, \vec{B} die magnetische Flussdichte und \vec{j} die elektrische Stromdichte. Multipliziert man diese Ausdrücke jeweils skalar mit \vec{H} bzw. mit \vec{E} , so erhält man durch mathematische Umformungen:

$$\vec{H} \cdot \textit{rot}\vec{E} = -\frac{1}{2} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} (\vec{H} \cdot \vec{B}) \quad (3.60)$$

¹³Die Herleitung ist nach Schirra (Schirra, 14.09.1989, S. 345ff) skizziert.

$$\vec{E} \cdot \text{rot} \vec{H} = \vec{E} \cdot \vec{j} + \frac{1}{2} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} (\vec{E} \cdot \vec{D}). \quad (3.61)$$

Desweiteren gilt:

$$\vec{H} \cdot \text{rot} \vec{E} - \vec{E} \cdot \text{rot} \vec{H} = \text{div}(\vec{E} \times \vec{H}). \quad (3.62)$$

Bildet man nun die Differenz aus (3.60) und (3.61), so erhält man unter der Verwendung von (3.62) folgenden Ausdruck:

$$-\text{div}(\vec{E} \times \vec{H}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B}) \right) + \vec{E} \cdot \vec{j}, \quad (3.63)$$

wobei $\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} (\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B}) \right)$ die zeitliche Änderung der elektromagnetischen Energiedichte, $\vec{E} \cdot \vec{j} = \frac{\partial}{\partial t} w_A$ die Zeitableitung der Dichte w_A der vom elektrischen Feld an den Ladungsträgern, also an der Stromdichte, verrichteten Arbeit und $\vec{E} \times \vec{H} =: \vec{S}$ der Poynting-Vektor ist. Anders formuliert lautet die Gleichung:

$$\frac{\partial}{\partial t} w_{em} = \text{div} \vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} w_A. \quad (3.64)$$

Diese Aussage, die auch als poyntingscher Satz bekannt ist, kann als die lokale Energieerhaltung im System aus elektromagnetischem Feld und Stromdichte bezeichnet werden. Dabei kann der Poynting-Vektor \vec{S} als Energieflussdichte angesehen werden, da seine Quelle die zeitliche Änderung zweier Energiedichten ist, wie man aus folgender Gleichung entnehmen kann:

$$\text{div} \vec{S} = - \frac{\partial}{\partial t} (w_{em} + w_A). \quad (3.65)$$

Will man nun die Gesamtgleichung für den Energietransport bestimmen, so muss man die Gleichung über ein bestimmtes Volumen integrieren, so dass gilt:

$$\frac{d}{dt} \int_V w_{em} \cdot dV = \int_V \text{div} \vec{S} \cdot dV + \int_V \vec{E} \cdot \vec{j} \cdot dV. \quad (3.66)$$

Mit dem gaussischen Integralsatz kann man den ersten Term der rechten Seite in ein Integral über die Oberfläche des Volumens V überführen:

$$\frac{d}{dt} \int_V w_{em} \cdot dV = \oint_A \vec{S} \cdot ds + \int_V \vec{E} \cdot \vec{j} \cdot dV. \quad (3.67)$$

Dies ist die mathematische Form des integralen poyntingschen Satzes, der als Energieerhaltungssatz der Elektrodynamik angesehen werden kann. In Worten

besagt er, dass die zeitliche Abnahme der elektromagnetischen Feldenergie im Volumen V der Leistung an den Ladungsträgern und dem durch die Oberfläche des Volumens hindurchfließenden Energiestromes entspricht.

3.4.2 Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Elektrodynamik

3.4.2.1 Der Energieumsatz bei der elektromagnetischen Induktion

Das wohl bedeutendste Gesetz der Elektrodynamik ist das von M. Faraday (1791-1897) experimentell entdeckte Induktionsgesetz, da es eine Grundlage für die Theorie der Elektrodynamik und ihrer technischen Anwendung bildet. Der theoretische Sachverhalt der Induktion, dass die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses eine Spannung induziert, ist in den oben angeführten maxwellschen Gleichungen (3.58) eigentlich schon enthalten. Formal ausgedrückt besagt das Induktionsgesetz:

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(\vec{A} \cdot \vec{B})}{dt} = -\vec{A} \frac{d\vec{B}}{dt} - \vec{B} \frac{d\vec{A}}{dt}. \quad (3.68)$$

Durch die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses Φ wird eine Spannung induziert. Der magnetische Fluss setzt sich aus der Fläche A und der magnetischen Flussdichte B zusammen.

Es sei im Rahmen dieser Betrachtung nochmals erwähnt, dass die Gesetzmäßigkeit der Energieerhaltung bei diesem Vorgang von tragender Bedeutung ist. Das Prinzip, das als lenzsche Regel bekannt ist und das Minuszeichen in die Formel der elektromagnetischen Induktion einfließen lässt, rührt von der Energieerhaltung her. Dass die induzierte Spannung ihrer Ursache entgegen gerichtet sein muss, ist eine Notwendigkeit, die das Verletzen des Energiesatzes verhindert. Denn wenn die induzierte Spannung ihrer Ursache gleichgerichtet wäre, so würde diese einen Strom bewirken, der das verursachende Magnetfeld verstärken würde, sodass die induzierte Spannung noch größer werden würde (und so weiter). Man hätte dann ein perpetuum mobile, das dem Energieerhaltungssatz widersprechen würde. Das Minuszeichen in der Gleichung ist deshalb erforderlich, weil die „Erzeugung“ der elektrischen Energie auf Kosten der magnetischen Energie geschieht.

3.4.2.2 Der Energieumsatz im elektrischen Stromkreis

Stromfluss in einem metallischen Leiter

Fließt nun eine Ladungsmenge dq in der Zeit dt durch die Fläche A eines Leiters, so kann die Stromdichte als

$$j = \frac{dq}{dtA} \quad (3.69)$$

definiert werden. Der Gesamtstrom wäre durch das Flächenintegral

$$I = \int_A \vec{j} \cdot \vec{n} dA \quad (3.70)$$

gegeben, wenn \vec{n} die Flächennormale ist. Dass diese Stromdichte proportional zum angelegten elektrischen Feld \vec{E} ist, wird als das ohmsche Gesetz bezeichnet. Dabei ist die sogenannte elektrische Leitfähigkeit σ die Proportionalitätskonstante. Formal kann man dies ausdrücken durch:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (3.71)$$

Für einen homogenen Stromfluss durch einen Leiter der Länge l , dem Querschnitt A und der spezifischen Leitfähigkeit σ gilt folglich (mit $U = E \cdot l$ und $R := U/I = \frac{l}{\sigma A}$):

$$\int \vec{j} \cdot \vec{E} dV = \int \sigma \cdot E^2 \cdot A \cdot dx = \sigma \cdot E^2 \cdot A \cdot l = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R. \quad (3.72)$$

Daraus lässt sich ableiten, dass die vom elektrischen Feld pro Zeiteinheit im Volumen V geleistete Arbeit, sprich die Leistung, wegen des ohmschen Widerstandes des Leiters eine Umwandlung der elektrischen Energie in Wärme darstellt. Aufgrund der Energieerhaltung ist für den Transport von elektrischer Energie über weite Entfernungen eine hohe Spannung ratsam, da mit geringerer Stromstärke der Leistungsverlust durch joulische Wärme geringer ist.

Elektrische Netzwerke

Das erste kirchhoffsche Gesetz: Das erste kirchhoffsche Gesetz (Knotenregel) besagt, dass in einem Knoten die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme ist. Im Beispiel von Abbildung 3.6 würde dies bedeuten, dass $I_2 + I_4 = I_1 + I_3 + I_5$ wäre. Dieses Gesetz ist eine logische Schlussfolgerung aus der Ladungserhaltung, denn in einem Knotenpunkt geht keine Ladung verloren. Das, was an Ladung zuströmt, muss auch wieder abströmen.

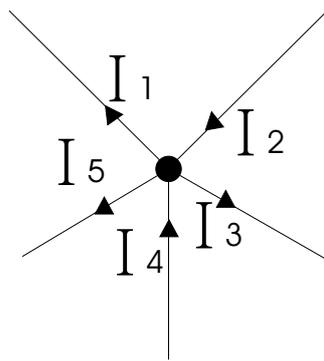


Abbildung 3.6: Beispiel zur Knotenregel

Das zweite kirchhoffsche Gesetz: Auch das zweite kirchhoffsche Gesetz ist eine konsequente Anwendung eines Erhaltungssatzes, in diesem Fall der Energieerhaltung. Das zweite kirchhoffsche Gesetz (Maschenregel) besagt, dass die Summe der angelegten Spannungen einer Masche der negativen Summe der abfallenden Spannungen entsprechen muss. Dabei sollte bedacht werden, dass Spannungen Potentialdifferenzen sind. Im Beispiel von Abbildung 3.7 entspricht die angelegte Spannung U der Potentialdifferenz zwischen den Punkten D und A. Beim Widerstand R_1 fällt die Spannung IR_1 ab. Um diese ist das Potential im Punkt B geringer als im Punkt A. Analog fällt auch Spannung bei R_2 und R_3 ab. Aufgrund der Energieerhaltung kann in der Summe aber nur das an Potential verringert werden, was ursprünglich zur Verfügung stand. Daraus folgt die Maschenregel.

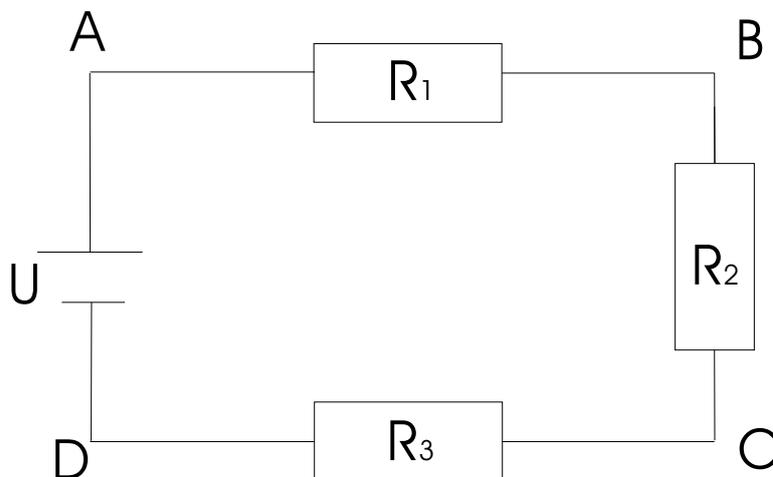


Abbildung 3.7: Beispiel zur Maschenregel

Kondensatoren

Die Energie in einem Stromkreis kann in Form von elektrischer Energie in einem Kondensator zwischengespeichert werden. Die gespeicherte Energie in einem Kondensator entspricht der Energie, die nötig ist, um den Kondensator aufzuladen. Um bei einem Plattenkondensator mit der Kapazität C , der Plattenfläche A und dem Plattenabstand d die Ladung dQ auf die andere Kondensatorplatte zu bringen, ist die Verrichtung der Arbeit

$$dW = \int_{x=0}^d d\vec{F}d\vec{s} = dQ \int_{x=0}^d d\vec{E}d\vec{s} = UdQ \quad (3.73)$$

nötig. Die gesamte Arbeit, die erbracht werden muss, lässt sich durch Integration bestimmen:

$$W_{el} = \int_{Q=0}^Q \frac{Q}{C}dQ = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}UQ = \frac{1}{2}CU^2. \quad (3.74)$$

Mit dem Wissen, dass $U = Ed$ und $C = \frac{A\epsilon_0}{d}$ ist, lässt sich die Energiedichte wie folgt beschreiben:

$$w_{el} = \frac{W}{Ad} = \frac{1}{2}\epsilon_0 E^2. \quad (3.75)$$

Spulen

So wie Kondensatoren Zwischenspeicher für elektrische Energie sind, können Spulen als Zwischenspeicher für magnetische Energie angesehen werden. Wir betrachten eine ideale Spule, d.h. eine Spule mit einem vernachlässigbar kleinem ohmschen Widerstand und der Induktivität L . Beim Einschalten nimmt die Spule Leistung auf, solange an der Spule die Spannung U_L zur Überwindung der Induktionsspannung U_{ind} anliegt, sprich solange die Stromstärke I ansteigt. Die in dem Zeitintervall dt aufgenommene Energie dW ist:

$$dW = U_L Idt = L \frac{dI}{dt} Idt = LI dI. \quad (3.76)$$

Daraus ergibt sich durch Integration:

$$W_{magn} = \frac{1}{2}LI^2. \quad (3.77)$$

Betrachtet man eine zylindrische Spule mit der Länge l , dem Querschnitt A und der Windungszahl N , so gilt für die Induktivität: $L = \mu_0 N^2 \frac{A}{l}$. Damit kann man umformen:

$$W_{magn} = \frac{1}{2} \left(\mu_0 N^2 \frac{A}{l} \right) I^2 = \frac{1}{2} \left(\mu_0 N^2 \frac{A}{l} \right) \left(\frac{1}{\mu_0} Al \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{B^2}{\mu_0} \right) \mu_0 = \frac{1}{2} (HB)V. \quad (3.78)$$

Und für die Energiedichte des magnetischen Feldes folgt daraus:

$$w_{magn} = \frac{W_{magn}}{V} = \frac{\frac{1}{2} B^2}{\mu_0} = \frac{1}{2} H^2 B. \quad (3.79)$$

Mit $\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$ folgt für die Energiedichte des elektromagnetischen Feldes:

$$w_{em} = \frac{1}{2} \epsilon_0 (E^2 + c^2 B^2). \quad (3.80)$$

Der elektromagnetische Schwingkreis

Schaltet man nun einen Kondensator und eine Spule parallel in einen Stromkreis, so ergibt sich der sogenannte elektromagnetische Schwingkreis. Dieser Schwingkreis ist ein gutes Beispiel dafür, dass elektrische Energie in magnetische umgewandelt werden kann, und wie diese Umwandlungen dem Energieerhaltungssatz unterworfen sind.

Wenn der Kondensator geladen ist, ist die gesamte Energie in Form von elektrischer Feldenergie im Kondensator gespeichert. Diese verursacht einen Stromfluss durch die Spule, welcher in der Spule eine Spannung induziert, die dem Anstieg des Stroms entgegenwirkt. Ist der Kondensator komplett entladen, erreicht der Strom in der Spule seinen maximalen Wert. Die Energie des elektrischen Feldes ist gänzlich in magnetische Energie im Magnetfeld um die Spule umgewandelt worden. Da der Kondensator nun entladen ist, kann der Strom in der Spule nicht mehr angetrieben werden und das Magnetfeld um die Spule bricht zusammen. In der Spule entsteht aufgrund der lenzschen Regel eine Selbstinduktionsspannung, die den Strom noch eine Zeit lang in gleicher Richtung weiter treibt. Dadurch wird der Kondensator erneut aufgeladen und die magnetische Feldenergie in elektrische Feldenergie umgewandelt. Wenn kein Strom mehr in der Spule fließt, erreicht die Ladung auf dem Kondensator ihren maximalen Wert, jedoch mit anderer Polung.

Formal kann dieser Vorgang wie folgt beschrieben werden: Die Gesamtenergie W_g ist die Summe der elektrischen Energie W_{el} und der magnetischen Energie W_{magn}

$$W_g = W_{el} + W_{magn}. \quad (3.81)$$

Mit (3.74) und (3.77) gilt dann:

$$W_g = \frac{1}{2}CU_C^2 + \frac{1}{2}LI^2. \quad (3.82)$$

In Abhängigkeit von der Zeit t kann die Periodizität der Umwandlung mit der Kreisfrequenz ω wie folgt beschrieben werden:

$$W_g = \frac{1}{2}CU_{Cmax}^2 \cos^2(\omega t) + \frac{1}{2}LI_{max}^2 \sin^2(\omega t). \quad (3.83)$$

Für die maximale Stromstärke gilt:

$$I_{max} = \omega CU_{Cmax}. \quad (3.84)$$

Damit gilt für die Gesamtenergie:

$$W_g = \frac{1}{2}CU_{Cmax}^2 \cos^2(\omega t) + \frac{1}{2}L\omega^2 C^2 U_{Cmax}^2 \sin^2(\omega t). \quad (3.85)$$

Mit $\omega^2 = \frac{1}{LC}$ folgt:

$$W_g = \frac{1}{2}CU_{Cmax}^2 \cos^2(\omega t) + \frac{1}{2}L \frac{1}{LC} C^2 U_{Cmax}^2 \sin^2(\omega t) \quad (3.86)$$

$$W_g = \frac{1}{2}CU_{Cmax}^2 (\cos^2(\omega t) + \sin^2(\omega t)) \quad (3.87)$$

$$W_g = \frac{1}{2}CU_{Cmax}^2. \quad (3.88)$$

Wenn man nun nicht I_{max} ersetzt, sondern für U_{Cmax} den Wert $\frac{I_{max}}{\omega C}$ einsetzt, bekommt man:

$$W_g = \frac{1}{2}C \frac{I_{max}^2}{\omega^2 C^2} \cos^2(\omega t) + \frac{1}{2}LI_{Cmax}^2 \sin^2(\omega t) = \frac{1}{2}LI_{Cmax}^2. \quad (3.89)$$

Darin sehen wir wieder die Energieerhaltung:

$$W_{el} = W_{magn} = \frac{1}{2}CU_{Cmax}^2 = \frac{1}{2}L^2 I_{max}. \quad (3.90)$$

3.4.2.3 Energieerhaltung beim Transformator

Eine wichtige Anwendung des Induktionsgesetzes ist im Transformator realisiert. Zwei Spulen L_1 und L_2 mit den Windungszahlen N_1 und N_2 werden mit einem Eisenjoch verbunden. Wird nun in der ersten Spule die Wechselspannung U_1 angelegt und sie folglich mit dem Strom I_1 durchflossen wird, so entsteht dadurch ein Magnetfeld. Dieser magnetische Fluss Φ_m bewirkt die Induktionsspannung

$$U_{ind} = -\frac{dI_1}{dt} = -\frac{N_1 d\Phi_m}{dt}. \quad (3.91)$$

Diese Spannung ist der angelegten Spannung U entgegengesetzt gleich, da nach den kirchhoffschen Gesetzen (3.4.2.2.2) $U_1 + U_{ind} = 0$ gelten muss. Da man den ohmschen Widerstand der Spule gegenüber ihrem induktiven Widerstand ωL vernachlässigen kann, wird nach dem Energieerhaltungssatz in der Sekundärspule die Spannung

$$U_2 = -\frac{N_2 d\Phi_m}{dt} \quad (3.92)$$

induziert. Aus der Energieerhaltung lässt sich auch ableiten, dass $U_1 I_1 t = U_2 I_2 t$. Umgestellt kann man dann sagen dass:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.93)$$

Daraus lässt sich auch schlussfolgern, dass das Spannungsverhältnis dem Verhältnis der Windungszahlen entspricht. Formal ausgedrückt heißt das

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (3.94)$$

In der Praxis geht dieser Vorgang nicht ganz so verlustfrei vonstatten wie dargestellt, jedoch werden die Verluste durch geschickte Konstruktion gering gehalten. So wird beispielsweise das Eisenjoch aus dünnen, voneinander isolierten Eisenplatten durch isolierte Schrauben zusammengepresst, damit Wirbelströme im Eisenjoch vermieden werden, die durch Aufwärmung zu Verlusten führen würden.

3.4.3 Die Erhaltung als Denkprinzip in der Elektrodynamik:

Die Idee des elektrischen Feldes

Die momentane Kraftwirkung, die zwei Ladungen aufeinander ausüben, konnte in Anlehnung an die newtonschen Axiome durch das coulombsche Gesetz be-

schrieben werden. Fraglich war dabei nur, wie die Energielokalisation und der Energietransport beschrieben werden können (Schirra, 14.09.1989, S. 333). Bei der Klärung dieser Fragen bildeten sich im 19. Jahrhundert unter den Physikern zwei Lager, einmal die Anhänger der sogenannten Fernwirkungstheorie, zu denen u.a. Wilhelm Eduard Weber (1804-1891), Carl Friedrich Gauß (1777-1855) und André-Marie Ampère (1775-1836) zählten und die Befürworter der Nahwirkungstheorie, die vor allem durch Michael Faraday (1791-1867) vertreten und später von James Clerk Maxwell (1831-1879) mathematisch beschrieben wurde. Einige Jahrzehnte im 19. Jahrhundert existierten beide Theorien nebeneinander und erst am Ende des Jahrhunderts kristallisierte sich mit der Feldtheorie die Auffassung von der Nahwirkung als erfolgreicher heraus.

Die Idee des elektrischen Feldes geht auf Faraday zurück, da er zur Deutung des von ihm entdeckten Induktionsgesetzes von der Ausbreitung elektromagnetischer Energie in den Raum ausging. Diese „Wirkung“, die sich in den Raum hinein erstreckt, wurde von Faraday durch Feldlinien modelliert, die den ganzen Raum zwischen Ladung und Magneten erfüllen. Die Nahwirkungskräfte werden nun durch die Ausbreitung einer immateriellen Kraft, die sich von Raumpunkt zu Raumpunkt ausbreitet, beschrieben. Die mathematische Beschreibung dieser Idee hat Maxwell geleistet. Aus seinem zweibändigen Hauptwerk „A Treatise on electricity and magnetism“ aus dem Jahre 1873 kann man entnehmen, dass er die Feldlinien von Faraday als physikalische Realität annahm und diese mit dem Energiebegriff in Verbindung brachte. Wörtlich heißt es:

„In der Theorie der Elektrizität und des Magnetismus erkennt man 2 Arten von Energie, die elektrostatische und die elektrokinetische, und von diesen wird angenommen, dass sie nicht nur in den elektrisierten und magnetisierten Körpern vorhanden sind, sondern auch in jedem Teil des umgebenden Raumes, in dem elektrische und magnetische Kraft beobachtet wird.“ (Maxwell, 1873, Vol.2, Kap.20, §782)

Die von ihm aufgestellten Feldgleichungen beschreiben den Energietransport ohne fluidmechanische Modelle als Trägerfunktionen, sondern es wird jedem Raumpunkt eine raum- und zeitabhängige Energiedichte $w_{em}(\vec{x}, t)$ zugeordnet. Die gesamte Feldenergie zur Zeit t ergibt sich aus dem Volumenintegral über diese

Energiedichte.

$$w_{em}(t) = \int w_{em}(\vec{x}, t) dV. \quad (3.95)$$

Dieser Formalismus genügt der Forderung, die Helmholtz in dem erwähnten Buch über die Erhaltung der Kraft aufgestellt hat, in welcher er fordert:

„Die Gesetze der Physik müssen so beschaffen sein, dass die Energie allgemein ein Integral der Differentialgleichung der Physik ist.“ (Helmholtz, 1902)

Die Verwendung des Energiebegriffs der Nahwirkungstheorie war für jene Zeit revolutionär und genial, da sie die damals bekannten Phänomene hinreichend erklären konnte und in ihrer Eleganz und Abgeschlossenheit Ihresgleichen suchte. Diese maxwellsche Energieauffassung löste als Nahwirkungstheorie die webersche Fernwirkungstheorie ab. Sie führte zu den nach Maxwell benannten Feldgleichungen, die alles Grundlegende der Elektrodynamik beinhalten. Die Betrachtung elektromagnetischer Felder und damit ihrer Energien ist sowohl einfacher als auch eleganter als die Erklärung dieser Phänomene durch Kräftebetrachtungen. Diese geniale Leistung, die Maxwell selbst nur bescheiden als mathematische Beschreibung der faradayschen Ideen ansah, ist auch vom Denken in physikalischen Prinzipien durchdrungen, da, wie W. Kuhn in seinem Werk über die Ideengeschichte der Physik aufzeigt, Maxwell seinen Beschreibungen des elektromagnetischen Feldes mit seinen Quellen und Wirbeln die Analogie der Strömung einer hypothetischen inkompressiblen Flüssigkeit zugrunde legte (Kuhn, 2001, S. 334).

Bei der Formulierung eines so fundamentalen Konzepts wie dem des Feldbegriffes waren verschiedene Leitideen nötig. Neben grundlegenden Überlegungen zum Raum als einem physikalischen Objekt, mussten weitere Überlegungen hinzutreten, u. a. der Erhaltungsgedanke, der uns auch hier als leitendes Denkprinzip entgegentritt. Während bei der Fernwirkungstheorie die Energie einfach in einem Raumpunkt verschwindet, um an einem anderen wieder zu erscheinen, bleibt die Energie im Nahwirkungskonzept erhalten und breitet sich von Raumpunkt zu Raumpunkt aus (siehe dazu 3.4.1.2).

3.5 Moderne Physik

3.5.1 Die Erhaltung als Gesetz in der modernen Physik

3.5.1.1 Die Verschmelzung der Erhaltungssätze der Mechanik durch die Relativitätstheorie

Die von Albert Einstein (1879-1955) aufgestellten Postulate der Relativitätstheorie haben auch für den Energiebegriff weitreichende Folgen. Aus dem Gedankenexperiment eines bewegten Elektrons leitete Einstein die Erkenntnis ab, dass Masse und Energie der Materie miteinander in Beziehung stehen (für ausführlichere Betrachtungen siehe Schirra, 14.09.1989, S. 364). Diese Einsicht hat Einstein in der kurzen Mitteilung „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?“ am 27.09.1905 veröffentlicht (Einstein, 1905c). In dieser Mitteilung formuliert er allgemeiner:

„Die Masse eines Körpers ist ein Maß für dessen Energiegehalt.“ (Einstein, 1905c, S. 641)

Diese Tatsache wird als die Äquivalenz zwischen Energie und Masse bezeichnet. Man könnte anders formulieren: „Jeder Energie (-form) ist eindeutig eine bestimmte Trägheit (Masse) zugeordnet und umgekehrt entspricht jeder Masse ein bestimmter Energiewert.“ (Schirra, 14.09.1989, S. 365). Damit ist in der Relativitätstheorie die Massenerhaltung (3.1.1.1) in gewissem Sinne verloren gegangen, jedoch als Trägheitserhaltung wieder hergestellt worden. Die exakte mathematische Herleitung von $E = mc^2$ gelang dann Max Planck (1858-1947) 1907 aus Poincarés Konzeption des Feldimpulses der elektromagnetischen Energiestrahlung (Schirra, 14.09.1989, S. 366).

Der experimentelle Nachweis der Äquivalenz zwischen Energie und Masse konnte zunächst nicht geleistet werden. Die Ursache dafür ist sicherlich die Tatsache, dass man nur chemische Prozesse untersucht hat, die keine signifikanten Ergebnisse aufweisen. Einstein selbst wies darauf hin, dass der experimentelle Nachweis in Kernreaktionen zu suchen sei. Er machte 1907 in seiner Schrift „Die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie“ (Einstein, 1907) den Vorschlag, dass aus der Differenz des Atomgewichts M eines radioaktiv zerfallenen Atoms

und der Summe der Atomgewichte der Endprodukte $\sum m$ der frei gewordene Energiebetrag nachgewiesen werden könnte. Damit tastete Einstein eine Frage an, die zu der Zeit einige Schwierigkeiten bereitete. Die energetische Betrachtung des radioaktiven Zerfalls schien einen Widerspruch zum Energieerhaltungssatz darzustellen, denn schon kurz nach der Entdeckung der Radioaktivität stellten sich Fragen, die mit dem bisherigen Energieverständnis nicht zu erklären waren. So machte Henri Becquerel (1852-1908) eher zufällig die Entdeckung, dass Uranerz eine verpackte Filmplatte schwärzen kann. Woher kam die energiereiche Strahlung, die die Platte geschwärzt hat? Dass die Urankerne selbst eine Energiequelle darstellten, war für die damalige Zeit eine zu kühne Behauptung. Man neigte eher dazu, den Energieerhaltungssatz anzuzweifeln. Erst 1904 stellte Ernest Rutherford (1871-1937) die Behauptung auf, dass die Energie aus den Atomen selbst komme, indem er aussagte:

„In dieser Sicht wird die kontinuierliche Energieausstrahlung aktiver Körper von der dem Atom inhärenten Energie hergeleitet und widerspricht dem Gesetz der Energieerhaltung in keiner Weise.“ (zitiert nach Schirra, 14.09.1989, S. 369)

Dem von Einstein geforderten Nachweis der Äquivalenz zwischen Energie und Masse bei der Untersuchung des Atomkerns musste noch einiges an Theoriebildung vorangehen. Erst als die Theorie über den Aufbau des Atoms hinreichend ausgereift war und einige weitere elementare Teilchen entdeckt wurden, konnte der Nachweis über den Massendefekt erbracht werden.

Die von Einstein aufgestellte Relativitätstheorie hatte enorme Konsequenzen auf das bisherige Verständnis von Raum und Zeit, die wohl am deutlichsten in der Erweiterung des bisherigen Raumes mit seinen drei Dimensionen um eine weitere, nämlich die Zeit festzustellen ist. Dieser Raum wird Minkowski-Raum genannt, da er zum ersten mal von Hermann Minkowski (1864-1909) mit folgenden Worten eingeführt wurde:

„Die Anschauungen über Raum und Zeit, die ich ihnen entwickeln möchte, sind auf experimentell-physikalischem Boden erwachsen. Darin liegt ihre Stärke. Ihre Tendenz ist eine radikale. Von Stund an sollen

Raum für sich und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken und nur noch eine Union der beiden soll Selbstständigkeit bewahren.“ (Minkowski, 1958)

In dieser Betrachtung gilt für die Komponenten des Energie-Impuls-Vierervektor $p^i = (p_x, p_y, p_z, \frac{E}{c})$ für ein freies Teilchen gemäß der Lorentz-Transformation mit $\beta = \frac{v^2}{c^2}$:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \text{und} \quad \vec{p} = (p_x, p_y, p_z) = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (3.96)$$

Für das innere Produkt folgt daraus:

$$p_i p^i = -\vec{p}^2 + \frac{E^2}{c^2} = m_0^2 c^2. \quad (3.97)$$

woran sich wegen $m_0^2 c^2 = \textit{konstant}$ die Invarianzeigenschaft ableiten lässt¹⁴. In dieser Weise können wir von einer Fusion des Energie- und Impulserhaltungssatzes reden, wonach Masse, Energie und Impuls erhalten bleiben. Jede physikalische Bewegung so als ein Transport von Energie und Impuls interpretiert werden kann (Falk und Ruppel, 1983, S. 36). Der Übergang eines Energie-Impuls-Vierervektors von einer Raumzeit in die andere wird nun durch eine höhere vierdimensionale Einheit, den Energie-Impulstensor, beschrieben (vgl. Schirra, 14.09.1989, S. 373). Dieser Tensor gibt auch einen tieferen Einblick in das Wesen von Erhaltungssätzen, denn die Erhaltung von Energie und Impuls ist auf die Symmetrie des Tensors zurückzuführen. Allgemein entspricht jedem Erhaltungssatz eine geometrische Symmetrieeigenschaft des zugrundeliegenden Raumes. Diese Erkenntnis geht auf die Schrift „Invariante Variationsprobleme“, die 1918 von Emmy Noether (1882-1935) veröffentlicht wurde, zurück und ist folglich als Noether-Theorem bekannt.

3.5.1.2 Der Energieerhaltungssatz der Quantentheorie

In Anlehnung an die klassische hamiltonsche Mechanik hat Werner Heisenberg (1901-1976) die quantentheoretische Mechanik formalisiert und in dem Werk „Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen.“ (Heisenberg, 1925) publiziert. Er beschrieb darin, dass die Energiemi-

¹⁴Dabei ist m_0 die Ruhemasse. Bisher wurde die bewegte Masse $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ verwendet.

veaus eines harmonischen Oszillators, die sich für den Zustand n wie folgt ergeben:

$$W(n) = h\nu \cdot (n + 1/2) \quad (3.98)$$

aus einer durch eine zweifache Mannigfaltigkeit dargestellten Energie herleiten lassen. Das darin beinhaltete Übersetzungsschema, nach dem physikalische Größen als (hermitesche) Matrizen angenommen werden, entdeckte Max Born (1882-1970) einige Tage nach der Publikation Heisenbergs. Demnach wird die Energie durch die Energiematrix \hat{H} , die die Energieeigenwerte mathematisch formuliert, beschrieben. Die allgemeine Darstellung der Energie ist:

$$H_{mn} = W_n \cdot \delta_{mn} \text{ mit } \delta_{mn} = \begin{cases} 1, \text{ wenn } n = m \\ 0, \text{ wenn } n \neq m. \end{cases} \quad (3.99)$$

Damit gilt für den harmonischen Oszillator:

$$H_{mn} = h\nu \cdot (n + 1/2) \cdot \delta_{mn} \quad (3.100)$$

Woraus die Matrix folgt:

$$H_{mn} = \begin{pmatrix} \frac{h\nu}{2} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \frac{3h\nu}{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \frac{5h\nu}{2} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots\dots\dots & \\ \cdot & & & & \end{pmatrix} \quad (3.101)$$

In der Arbeit von 1925 stellen Born, Heisenberg und Jordan (Born u. a., 1925) die für die Quantentheorie fundamentale Vertauschungsrelation dar, die besagt, dass die Matrizen physikalischer Größen im allgemeinen nicht kommutieren. In der Schreibweise der Kommutatoren heißt das:

$$\hat{A} \cdot \hat{B} - \hat{B} \cdot \hat{A} \neq 0. \quad (3.102)$$

Bezieht man sich auf die kanonische Bewegungsgleichungen einer physikalischen Größe in der Matrixform \hat{g} mit $\dot{\hat{g}} = \frac{i}{\hbar}(\hat{H} \cdot \hat{g} - \hat{g} \cdot \hat{H})$, so kann man den Erhaltungssatz der Energie in einfacher Weise formulieren:

$$\dot{\hat{H}} = 0. \quad (3.103)$$

Die Energiematrix kommutiert mit sich selbst.

3.5.2 Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der modernen Physik: Der Teilchencharakter des Lichts - Die Erhaltung als Erklärungsgrundlage des lichtelektrischen Effekts und des Compton-Effekts

Die Geburtsstunde der Quantenmechanik kann auf den 14.12.1900 datiert werden. An diesem Tag hielt Max Planck (1858-1947) in der Sitzung der „Deutschen Physikalischen Gesellschaft“ seinen Vortrag zum Thema „Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspektrum“. Motiviert war der Vortrag durch die unbefriedigende Situation, dass die Energiestrahlung in Abhängigkeit von der Temperatur und der Wellenlänge nur für die Grenzfälle von sehr großen Frequenzen durch das wiensche Strahlungsgesetz und für sehr kleine Frequenzen durch das rayleigh-jeanssche Strahlungsgesetz beschrieben werden konnte. Planck stellte sich der Aufgabe, eine allgemeingültige Strahlungsformel zu finden. Er schrieb in einem Brief an Wood:

„Die klassische Physik reichte nicht aus, das war mir klar. Denn nach ihr muss die Energie im Lauf der Zeit vollständig in die Strahlung übergehen.“ (zitiert nach Hermann, 1969, S. 34)

Zur Lösung dieses Problems ging er von der Modellvorstellung eines Hohlraums aus, dessen Wände aus Oszillatoren bestehen. Im thermischen Gleichgewicht können die Resonatoren Strahlung sowohl emittieren als auch absorbieren. Er kommentierte seine Überlegungen wie folgt:

„Es kommt nun darauf an, die Wahrscheinlichkeit W dafür zu finden, dass die N Resonatoren insgesamt die Schwingungsenergie U_N besitzen. Hierzu ist es notwendig, U_N nicht als stetige, unbeschränkt teilbare, sondern als eine discrete aus einer ganzen Zahl von endlichen gleichen Teilen zusammengesetzte Größe aufzufassen.“ (zitiert nach Hermann, 1972, S. 299)

Dass ein harmonischer Oszillator nicht mit beliebigen Energiewerten, sondern nur mit bestimmten Energiestufen schwingen kann, wurde unter dem Stichwort Quantenhypothese bekannt. Diese wird formal dadurch ausgedrückt, dass die Energie

ein ganzzahliges Vielfaches der Naturkonstanten h ist. Diese Konstante, welche die Dimension einer Wirkung hat, wurde von Planck als Wirkungsquantum bezeichnet. Diese Hypothese wurde von den Physikern zur Zeit Plancks weitgehend akzeptiert, doch blieb die theoretische Begründung ein noch ungelöstes Problem. Planck selbst hatte die Tragweite dieser neuen Sichtweise zunächst nicht durchschaut. Es war Einstein, der auf der Quantenhypothese aufbauend annahm, dass elektromagnetische Strahlung allgemein gequantelt sei. Diese Energiequanten nahm er als reale teilchenhafte Gebilde an, die dann den Namen Photonen¹⁵ erhielten. Er selbst schrieb:

„Monochromatische Strahlung von geringerer Dichte (innerhalb des Gültigkeitsbereichs der Wienschen Strahlungsformel) verhält sich in wärmetheoretischer Hinsicht so, wie wenn sie aus voneinander unabhängigen Energiequanten der Größe $h\nu$ bestünde.“ (Einstein, 1905b, S. 132-148)

Die von Einstein formulierte Photonenhypothese wurde von vielen als ein Rückfall in die Korpuskeltheorie abgewertet, da Licht nicht als Teilchen, sondern als Welle angesehen wurde, denn nur durch den Wellencharakter des Lichts konnten Effekte wie Beugung und Interferenz erklärt werden. Einstein ließ sich jedoch nicht durch die Skepsis seiner Kollegen einschüchtern, sondern hielt an dieser Hypothese fest und konnte damit den äußeren photoelektrischen Effekt deuten, der bis dahin mit der Wellentheorie des Lichts nicht zu erklären war¹⁶. Dass das Auslösen eines Elektrons in einer Metalloberfläche durch Licht nicht von der Intensität des Lichts, sondern von dessen Frequenz abhängig ist, kann demnach wie folgt erklärt werden: In die Oberfläche dringt ein Lichtquant der Energie $h\nu$ ein, dessen Energie teilweise in kinetische Energie des Elektrons umgewandelt wird. Dabei muss das Elektron aber zuerst eine stoffspezifische Austrittsarbeit W_A überwinden. Demnach gilt folgende Energiebilanz:

$$h\nu = \left(\frac{m}{2} \cdot v^2 \right)_{max} + W_A. \quad (3.104)$$

¹⁵Der Name Photon erschien zum ersten Mal 1926 im Titel eines Aufsatzes des Amerikaners G.N. Lewis (vgl. Schirra, 14.09.1989, S. 404).

¹⁶Für diese Erklärung hat Einstein den Nobelpreis verliehen bekommen und nicht, wie oft angenommen, für die Relativitätstheorie.

Wenn nun aber dem Licht solch ein teilchenhafter Charakter zuzuschreiben ist und die einzelnen Energiequanten eine bestimmte Energie besitzen, so müsste ihnen auch, gemäß der Äquivalenz zwischen Energie und Masse, eine Masse zugeordnet sein. Wenn dies so ist, sollten die Erhaltungssätze und die daraus resultierenden Stoßgesetze auch bei diesen Lichtteilchen gelten. Den entsprechenden Nachweis dafür lieferte Arthur Compton (1892-1962) 1922 durch den nach ihm benannten Compton-Effekt. Dieser Effekt beschreibt die Streuung von Röntgenstrahlung an freien Elektronen, bei der eine Vergrößerung der Wellenlänge auftritt. Compton ging von der Vorstellung aus, dass es sich bei der Wechselwirkung zwischen der Röntgenstrahlung und den freien Elektronen im Material um einen elastische Stoß zwischen zwei Korpuskeln handle. Durch die Anwendung des Erhaltungsprinzips konnte er die Energie der in alle Richtungen frei gestreuten Photonen berechnen. Es muss nämlich gelten:

$$\vec{p}_{Ph} = \vec{p}_{Ph}' + \vec{p}_e \quad (3.105)$$

$$h\nu + m_0c^2 = h\nu' + mc^2 \quad (3.106)$$

$$\Rightarrow h \cdot (\nu - \nu') = (m - m_0) \cdot c^2. \quad (3.107)$$

So lässt sich theoretisch begründen, dass die Frequenzabnahme der gestreuten Strahlung auf die Energieabgabe des Photons an das gestoßene Elektron zurückzuführen ist.

Die Photonenhypothese Einsteins wurde damit durch das Denken im Erhaltungsprinzip bestätigt.

3.5.3 Die Erhaltung als Denkwerkzeug in der modernen Physik

3.5.3.1 Atommodelle und das Erhaltungsprinzip

Um 1900 machten es sich viele Physiker zur Aufgabe ein Atommodell zu entwerfen, welches das reiche Datenmaterial der charakteristischen Emissionsspektren verschiedener leuchtender Gase erklärt. Im Februar 1911 veröffentlichte Ernest Rutherford (1871-1937) das nach ihm benannte Atommodell. In der Sekundärliteratur wird oft behauptet, dass dieses instabil sei, weil die Elektronen in den Kern stürzen würden, wenn sie ihre Energie durch das Bewegen um den Kern

abgegeben hätten, da ja nach den Regeln der Elektrodynamik bewegte Ladungen Strahlung emittieren. Von solchen kreisenden Elektronen ist bei Rutherford aber nicht die Rede. Bei ihm sind die Elektronen statisch um den Kern verteilt. Erst bei der Betrachtung des Wasserstoffatoms tritt die Problematik des kreisenden Elektrons auf, mit welcher sich Niels Bohr (1885-1962) auseinander gesetzt hat (vgl. Kuhn, 2001, S. 416-417). Bohr sah die Stabilität durch die Gesetze der klassischen Physik nicht erklärbar und vermutete einen Zusammenhang dieses Problems mit der planckschen Quantenhypothese. Er behalf sich mit Ad-hoc-Setzungen, die uns heute auch als bohrsche Postulate geläufig sind. Demnach bewegen sich die Elektronen auf diskreten Bahnen τ_1, τ_2, \dots um den Kern herum, ohne - wie dies nach den Gesetzen der klassischen Elektrodynamik der Fall sein müsste - elektromagnetische Strahlung zu emittieren. Jeder dieser Bahnen ist ein Energieniveau $W_{\tau_1}, W_{\tau_2}, \dots$ zuzuschreiben. Beim Übergang eines Elektrons von einem ausgezeichnetem Zustand in einen energetisch niedrigeren (etwa von τ_2 nach τ_1) wird die frei gewordene Energie in Form von kontinuierlicher Strahlung mit der Frequenz ν emittiert, sodass gilt:

$$E_{\tau_2} - E_{\tau_1} = h\nu. \quad (3.108)$$

Bohr sah sein Atommodell, dass er zunächst nur für das Wasserstoffatom erarbeitet hatte, durch den später durchgeführten Elektronenstoßversuch von James Franck (1882-1964) und Gustav Hertz (1887-1975) bestätigt, auch wenn dieser klassisch noch nicht alle Effekte erklären konnte¹⁷.

Wie sind nun aber die Ad-hoc-Setzungen Bohrs mit dem Erhaltungsprinzip vereinbar? Er hat seinerzeit auf die strikte Validität des Erhaltungsprinzips verzichtet, wie aus folgendem Zitat hervorgeht:

„Wie aus den bisherigen Betrachtungen hervorgeht, kann eine allge-

¹⁷So blieb die Frage weiter unbeantwortet, warum bei Atomen mit mehreren Elektronen nicht alle Elektronen auf die niedrigste Schale fallen. Diese Frage konnte erst durch das 1925 aufgestellte Pauliprinzip erklärt werden. Desweiteren war noch unklar, wie die Dublettstruktur im Grundenergiezustand des Wasserstoffatoms der Balmer-Serie ($n=2$), die schon 1891 von Albert Michelson (1852-1931) beobachtet wurde, zu erklären sei. Diese Erklärung wurde erst 1915/1916 von Arnold Sommerfeld (1868-1951) durch die Betrachtung des bohrschen Atommodells in Polarkoordinaten um zwei weitere Quantenzahlen erweitert (zur genaueren Beschreibung Schirra, 14.09.1989, S. 410-411).

meine Beschreibung der Phänomene, bei der Sätze der Erhaltung von Energie und Impuls in ihrer klassischen Formulierung im einzelnen gültig bleiben, nicht durchgeführt werden. Deshalb müssen wir darauf vorbereitet sein, dass Folgerungen aus diesen Sätzen keine unbegrenzte Gültigkeit besitzen werden.“ (Bohr, 1923)

Zusammen mit Hendrik Kramers (1894-1952) und John Slater (1900-1976) hat er eine Theorie entwickelt, die sogenannte BKS-Theorie, die die Erhaltungssätze über ein virtuelles Strahlungsfeld zumindest noch als stationäres Konzept - im Mittel für zahlreiche Übergangsprozesse - gültig bleiben ließ, deren strikte Validität jedoch ablehnten (Näheres dazu in Schirra, 14.09.1989, S. 413f). Diese Theorie stieß wohl unter einigen der zeitgenössischen Physiker auf Zustimmung, doch standen auch nicht wenige Physiker dieser Theorie skeptisch gegenüber¹⁸. Man bemühte sich die BKS-Theorie experimentell zu widerlegen, was dann Bothe und Geiger 1925 und auch noch Compton im gleichen Jahr gelang, sodass man sich mit der von James Franck (1882-1964) und Pascual Jordan (1902-1980) in einem Aufsatz ausgedrückten Meinung einverstanden erklärte. Sie schrieben 1926:

„Es ist aber diese (BKS-) Theorie durch Untersuchungen von Bothe und Geiger und von Compton experimentell widerlegt worden; man kann nicht mehr zweifeln, dass der Energie- und Impulssatz in Strenge gültig ist.“ (Franck und Jordan Pascual, 1926)

Selbst Bohr musste daraufhin eingestehen:

„Da nun die eindeutige Kopplung atomarer Prozesse schon bei den Strahlungserscheinungen Tatsache zu sein scheint, ist der in der Abhandlung eingeschlagene Weg wohl zu verlassen, was auch insofern befriedigend ist, als eine begrenzte Gültigkeit der Erhaltungssätze uns vor verschiedenartige Bedenken bei der Deutung der thermodynamischen Erscheinungen stellen würde.“ (Bohr, 1925)

Aus heutiger Sicht kann bezüglich der Energiekrise im bohrschen Atommodell mit der Materiewelle argumentiert werden. Diese gründet sich auf der kühnen

¹⁸Dazu gehörten vor allem Einstein und Sommerfeld.

Hypothese von Louis de Broglie (1892-1987), den zu seiner Zeit heiß diskutierten Dualismus des Lichts auch auf andere Teilchen wie Protonen oder Elektronen anzuwenden, die er in seiner Dissertation vom 25.11.1924 publizierte (Broglie, 1924). Er kommentierte darin:

„Es ist anzunehmen, dass auf Grund eines großen Naturgesetzes mit jedem Energiequantum von der Ruhemasse m_0 ein periodisches Phänomen der Frequenz ν_0 verknüpft ist, so dass gilt $h\nu_0 = m_0c^2$.“ (zitiert nach Hermann, 1972, S. 401)

Mit der Relativitätstheorie und der planckschen Quantenhypothese gewann er den Zusammenhang zwischen dem Impuls eines Teilchens und der von ihm angenommenen Wellenlänge der Wellenbewegung der Teilchen (zur genaueren Beschreibung siehe Kuhn, 2001, S. 422-425). Diese Relation ist in der nach ihm benannten de Broglie Wellenlänge formuliert:

$$\lambda_{deBroglie} = \frac{h}{mv}. \quad (3.109)$$

Diese Hypothese konnte 1927 experimentell von Davisson (1881-1958) und Germer (1896-1971) bei der Entwicklung von Elektronenröhren nachgewiesen werden, sodass de Broglie 1929 der Nobelpreis überreicht wurde. In seinem Nobelvortrag nannte de Broglie das Motiv dieser kühnen Hypothese:

„Die Bestimmung der stabilen Bahnen im Atom bringt ganze Zahlen ins Spiel, die bisher in der Physik immer nur zusammen mit den Phänomenen der Interferenz und der Eigenschwingung aufgetreten waren. Dies brachte mich auf die Idee, dass auch die Elektronen nicht einfach als Teilchen betrachtet werden können, sondern dass ihnen eine Periodizität zugeschrieben werden kann“ (zitiert nach Kuhn, 2001, S. 426).

Mit seiner Arbeit hatte de Broglie einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des bohrschen Atommodells geleistet. Die von Bohr ad-hoc aufgestellten Forderungen zur Rettung des Energieerhaltungssatzes konnten nun aus einer anderen Sichtweise betrachtet werden. Die bohrschen Bahnen sind nämlich genau die Bahnen, auf denen eine Elektronenwelle eine stehende Welle ausbilden würde, woraus

unmittelbar die Energieniveaus folgen würden.

Die Arbeit de Broglies stellte den Grundstein dar, die Energie im verallgemeinerten Wellenbild zu betrachten. Die wesentlichsten Beiträge dazu lieferte Erwin Schrödinger (1887-1961). W. Kuhn stellt die Motivation Schrödingers heraus:

„Als Schrödinger, der sich damit (der Theorie de Broglies) näher befasste, im Züricher Institut einen Vortrag hielt, bemerkte Debye, es käme ihm „ziemlich albern“ vor, wenn man mit Materiewellen arbeite, ohne eine Wellengleichung für deren Ausbreitung angeben zu können. Diese kritische Bemerkung hat Schrödinger offenbar so geärgert, dass er intensiv nach einer solchen Wellengleichung suchte.“ (Kuhn, 2001, S. 442)

Diese Suche sollte über eine Analogie zum Erfolg führen. Die Ergebnisse seiner Arbeit hat er in Form von vier Mitteilungen unter dem Titel „Quantisierung als Eigenwertproblem“ im Jahre 1926 veröffentlicht (Schrödinger, 1926d). Schrödinger nahm an, dass sich die zu erforschende Wellenmechanik zur klassischen hamiltonischen Mechanik wie die Wellenoptik zur geometrischen Optik verhält. Er ging bei seinen Betrachtungen folglich von der klassischen Wellengleichung in folgender Form aus¹⁹:

$$\Delta\Psi - \frac{1}{u^2} \cdot \frac{\partial^2\Psi}{\partial t^2} = 0. \quad (3.110)$$

Für die Phasengeschwindigkeit u der Ψ – Welle gilt nach den Ergebnissen von de Broglie:

$$u = \lambda\nu = \frac{h\nu}{mv} = \frac{E}{mv}. \quad (3.111)$$

Mit dem Energieerhaltungssatz $\frac{mv^2}{2} = E - V$ folgt für u :

$$u = \frac{E}{\sqrt{2m \cdot (E - V)}} = \frac{h\nu}{\sqrt{2m \cdot (E - V)}}. \quad (3.112)$$

Wenn man nun dieses u in die Wellengleichung einsetzt, so erhält man die Schrödingergleichung für Mikrosysteme im stationären Zustand:

$$\Delta\Psi + \frac{2m}{\hbar^2} \cdot (E - V) \cdot \Psi = 0. \quad (3.113)$$

¹⁹Der Weg Schrödingers zu seiner Gleichung ist weniger als Herleitung, sondern eher als „geniales Erraten“ zu bezeichnen.

Wie kommt nun aber die Diskretheit der Energiezustände? Sie rührt daher, dass die Schrödingergleichung in ihrer Anwendung auf Atome nur für bestimmte Energiewerte physikalisch sinnvolle Lösungen, Eigenwerte genannt, darstellt, da die Differentialgleichungen unter Berücksichtigung der von der Natur der Sache gestellten Randbedingungen gelöst werden können. Die dadurch neu gewonnene Sichtweise ersetzte die bohrschen Bahnen durch Zustände, genannt Orbitale, in denen sich die räumlichen Elektronenwellen auf verschiedenste Weise um den Kern herum bewegen können. Transportiert diese Welle auch wie die klassischen Wellen Energie? Mit dieser Frage hat sich Max Born (1882-1970) beschäftigt und seine Gedanken in dem Aufsatz „Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge“ (Born, 1926) publiziert. Er weist der Größe Ψ nur eine Art Führungsfeld der Elektronen zu, welches die Wahrscheinlichkeit für den Übergang eines Atoms in andere Energieniveaus bestimmt. Er schreibt:

„Impuls und Energie aber werden so übertragen, als wenn Korpuskel (Elektronen) tatsächlich herumfliegen. Die Bahnen dieser Korpuskeln sind nur so weit bestimmt, als Energie- und Impulssatz sie einschränken; im übrigen wird für das Einschlagen einer bestimmten Bahn nur eine Wahrscheinlichkeit durch die Werteverteilung der Funktion Ψ bestimmt.“ (Born, 1926, S. 804)

Damit wurde ein Wendepunkt eingeläutet, da nur Wahrscheinlichkeiten für verschiedene mögliche Ereignisse angegeben werden können.

Diese Formulierungen ermöglichen eine viel allgemeinere Beschreibung der Erhaltungseigenschaft einer physikalischen Größe: Für irgendeine physikalische dynamische Größe, die durch den Operator \hat{g} repräsentiert sei, ergibt sich der Erwartungswert \bar{g} durch:

$$\bar{g}(t) = \int \Psi^* \hat{g} \Psi d^3x. \quad (3.114)$$

Die zeitliche Änderung von \bar{g} kann mit der Schrödingergleichung wie folgt beschrieben werden:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \bar{g}(t) = \int \Psi^* (\hat{g} \cdot \hat{H} - \hat{H} \cdot \hat{g}) \Psi d^3x = \int \Psi^* [\hat{g}, \hat{H}] \Psi d^3x. \quad (3.115)$$

Wenn nun der Operator \hat{g} mit dem Hamilton-Operator kommutiert, d.h. $[\hat{g}, \hat{H}] = 0$, dann ist der Erwartungswert von \hat{g} zeitlich konstant. Allgemein kann man sa-

gen, dass jede physikalische Größe, deren Operator mit dem Hamilton-Operator, d.h. mit der Energiematrix, kommutiert, eine Erhaltungsgröße darstellt.

3.5.3.2 Der β -Zerfall

Als β -Zerfall wird der Zerfall eines Neutrons in ein Proton und in ein Elektron verstanden. Nach dem Energieerhaltungssatz muss die Energie des Protons und des Elektrons in der Summe die Energie des Neutrons ergeben. Der experimentelle Befund von James Chadwick (1891-1974) ergab jedoch für das Elektron ein kontinuierliches Energiespektrum, d.h. die Energie des Elektrons kann Werte von Null bis zu einem bestimmten Maximalwert annehmen. Wie ist dieser Energieverlust zu erklären? Es war Wolfgang Pauli (1900-1958), der 1930 die Ad-hoc-Hypothese aufstellte, nach der beim β -Zerfall ein weiteres neutrales Teilchen emittiert wird, das die restliche Energie aufnimmt; das Neutrino. So kühn zeigten sich nicht alle Physiker jener Tage. Nicht wenige waren der Überzeugung, dass der Energieerhaltungssatz bei diesen atomaren Prozessen nicht gilt. Der Behauptung Paulis fehlte noch die energietheoretische Beschreibung der Wechselwirkungsprozesse zwischen Neutron, Proton, Elektron und Neutrino. Diese gelang Enrico Fermi (1901-1954) in seinem Aufsatz in den Jahren 1933/34 unter Berücksichtigung des Erhaltungsprinzips. Der experimentelle Nachweis eines solchen Teilchens gelang erst 1957. Dabei stellte sich auch heraus, dass beim β -Zerfall kein Neutrino, sondern ein Antineutrino $\bar{\nu}_e$ emittiert wird, sodass folgende Reaktionsgleichung gilt:



An diesem Beispiel wird deutlich, wie durch das Festhalten am Energieerhaltungssatz die wissenschaftliche Forschung (hier die Entdeckung einer neuen Teilchenart) weitergebracht wurde.

3.6 Zusammenfassung

3.6.1 Die Erhaltung als Gesetz

Die Erhaltung ist in verschiedenen Facetten an mehreren Stellen der Physik als Gesetz formuliert. Für die einzelnen Teilgebiete der Physik existieren jeweils fach-

spezifische Formulierungen der Erhaltungssätze. Zusammenfassend seien die erwähnten Nennungen der Erhaltung als Gesetz nocheinmal übersichtlich dargestellt:

- Der Massenerhaltungssatz (3.1.1.1):

$$M = \sum_{i=1}^n m_i = \textit{konstant}$$

- Der Ladungserhaltungssatz (3.4.1.1):

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = \textit{konstant}$$

- Der Impulserhaltungssatz (3.1.1.3):

$$\sum_{i=1}^n \vec{p}_i = \sum_{i=1}^n \vec{v}_i m_i = \textit{konstant}$$

- Der Drehimpulserhaltungssatz (3.1.1.4):

$$\sum_{i=1}^n \vec{L}_i = \sum_{i=1}^n J_i \vec{\omega}_i = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \textit{konstant}$$

- Der Schwerpunktserhaltungssatz (3.1.1.5):

$$\frac{d}{dt} \dot{r}_s = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^n m_i \dot{r}_i \right) = 0$$

- Der Energieerhaltungssatz der Mechanik (3.1.1.2):

$$\sum_{i=1}^n E_{pot_i} + \sum_{i=1}^n E_{kin_i} = \sum_{i=1}^n m_i g h_i + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \textit{konstant}$$

- Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik (Der Energieerhaltungssatz der Thermodynamik (3.3.1)):

$$\delta Q = dU + p dV$$

- Der Satz von Poynting (Der Energieerhaltungssatz der Elektrodynamik (3.4.1.2)):

$$\frac{\partial}{\partial t} w_{em} = \textit{div} \vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} w_A$$

- Symmetrie des Energie-Impuls-Tensors (3.5.1.1)

- Die Zeitunabhängigkeit des Hamilton-Operators (3.5.1.2):

$$\dot{\hat{H}} = 0$$

Diese Aufzählung belegt, dass die Erhaltung an diversen Stellen der Physik in unterschiedlichen Facetten als Gesetz in Erscheinung tritt, auch in den Anwendungsbereichen, in denen sie in dieser Arbeit nicht explizit erwähnt wurde, wie z.B. in der Astronomie.

Diese Gesetze sind für die Physik von hoher Bedeutung. Lernende sollten die wichtigsten Erhaltungssätze in ihrer fachspezifischen Anwendung unbedingt kennenlernen.

Nicht selten bleibt dann aber das Lehren der Physik auf dieser Bedeutung der Erhaltung für die Physik stehen.

Die Fülle an physikalischen Gesetzen wird durch Gesetzmäßigkeiten systematisiert und strukturiert (vgl. Abbildung 1.3). Neben dem konkreten Charakter der Erhaltung in Form von einzelnen Gesetzen, sollten Lernende unbedingt den allgemeinen Charakter der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit kennenlernen. Dazu der nächste Abschnitt.

3.6.2 Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit

Die Erhaltung von Energie, Impuls usw. kommt in der Physik nicht nur in den eben genannten teilgebietspezifischen Gesetzen vor, sondern ist als allgemeingültige Gesetzmäßigkeit Grundlage vieler anderer Gesetze, die auf den ersten Blick nichts mit Erhaltung zu tun haben. Die in diesem Kapitel behandelten Nennungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit sind eigentlich Nennungen von Gesetzen im Sinne der Definition 2.2.1, d.h. mit eng begrenztem Gültigkeitsbereich. Der Erhaltungscharakter dieser Gesetze liegt in ihrer Herleitung oder Erklärung. Diese Gesetze stellen implizite Erwähnungen der Erhaltung als allgemeingültige Gesetzmäßigkeit dar:

- Die Kontinuitätsgleichung der Hydrodynamik (3.1.2.1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0$$

- Die Bernoulli-Gleichung (3.1.2.1):

$$\rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 + p = \textit{konstant}$$

- Die goldene Regel der Mechanik (3.1.2.2):

Was man an Kraft spart, muss man an Weg zulegen.

- Die Beschreibung von Pendeln (3.2):

Die periodische Umwandlung zwischen potentieller und kinetischer Energie

- Das erste keplersche Gesetz (3.37):
Die Festlegung der großen Halbachse der Ellipse einer Planetenbahn durch die Energieerhaltung.
- Das zweite keplersche Gesetz (3.4):
Der Radiusvektor eines Planeten überstreicht in gleicher Zeit gleiche Flächen, aufgrund der Drehimpulserhaltung.
- Das Swing-by-Manöver (3.2.2.3):
Beschleunigung der Sonde durch Energieerhaltung.
- Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung (3.3.2):
Die Energieerhaltung als Grundlage der Verteilung
- Die lenz'sche Regel (3.4.2.1) $U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$:
Die induzierte Spannung wirkt ihrer Ursache aufgrund der Energieerhaltung entgegen.
- Das erste kirchhoffsche Gesetz (3.6):
Wegen der Ladungserhaltung ist die Summe aller Ströme an einem Knoten null.
- Das zweite kirchhoffsche Gesetz (3.7):
Aufgrund der Energieerhaltung ist die Summe aller Spannungen in einer Masche null.
- Der elektromagnetische Schwingkreis (3.4.2.2.5):
Aufgrund der Energieerhaltung findet periodische Umwandlung zwischen elektrischer und magnetischer Feldenergie statt.
- Die Spannungsumformung beim Transformator (3.4.2.3):
Wegen der Energieerhaltung ist die Leistung im Sekundärkreis die gleiche wie im Primärkreis.
- Die Erklärung des lichtelektrischen Effekts und des Comptoneffekts (3.5.2):
Die Lichtteilchen sind den Erhaltungssätzen von Energie und Impuls unterworfen.

In Anlehnung an Abbildung 2.2 soll der Allgemeingültigkeitscharakter einer Gesetzmäßigkeit in Abbildung 3.8 am Beispiel der Energieerhaltung verdeutlicht werden. Dieses Schema machen die Universalität der Erhaltung in der Physik deut-

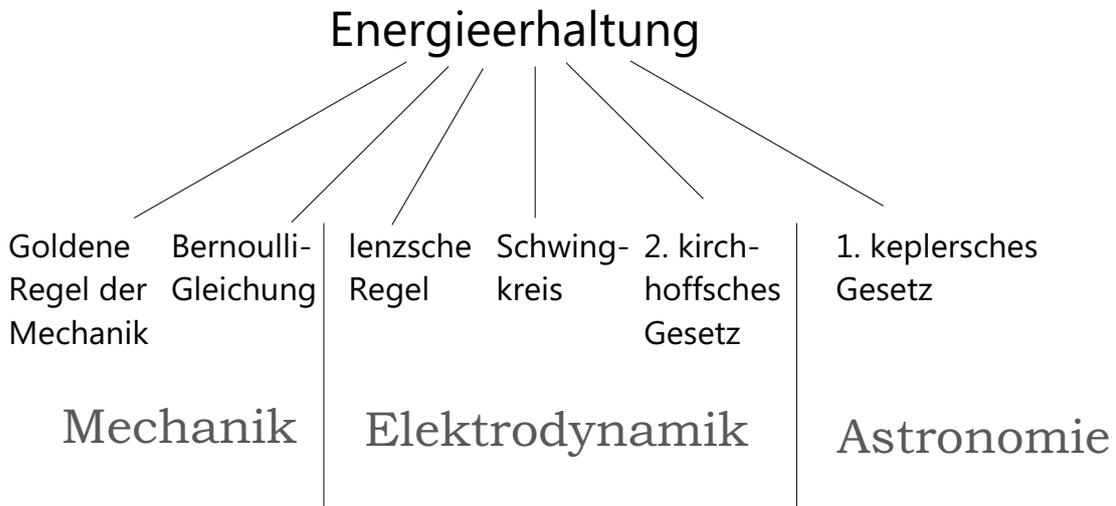


Abbildung 3.8: Die Energieerhaltung als Grundlage zahlreicher Gesetze der Physik

lich. Als Gesetzmäßigkeit ist die Erhaltung Grundlage zahlreicher Gesetze, die auf den ersten Blick keinen Bezug zur Erhaltung haben. Jedes Gesetz der Physik muss mit der „Erhaltung von Erhaltungsgrößen“ kompatibel sein. Damit stellt die Erhaltung bestimmter Größen in der Physik eine universelle Rahmenbedingung dar. Im komplexen Theoriegebäude der Physik lässt sich die Vielzahl der Gesetze auf einige wenige Grundprinzipien, von denen die Erhaltung eines ist, reduzieren. Das Verständnis der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit macht es dem Lernenden der Physik einfacher den Überblick über den „Formelwald“ der Physik zu wahren und die einzelnen Teilgebiete miteinander zu verflechten. Solche Querverbindungen sind für das Lernen von hoher Bedeutung, doch dazu mehr in Abschnitt 4.1.

3.6.3 Die Erhaltung als Denkprinzip

Die Universalität der Erhaltung wurde schon recht bald in der Geschichte erkannt und hat sich im Denken führender Physiker zu einem festen Denkschemata generiert. Immer wieder hat sich der Lösungsansatz der Erhaltung bei neuen Fragestellungen bewährt. Der Charakter der Erhaltung als Denkprinzip wird aus

den erwähnten Beispielen, die in nachfolgender Liste nochmal übersichtlich zusammengefasst sind, besonders deutlich:

- Huygens beschrieb mittels Schwerpunkterhaltung Stoßprozesse und kommt der Formulierung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik sehr nahe (3.1.3.1).
- Durch das Festhalten an der Energieerhaltung wurden neue Energieformen bei der Beschreibung von inelastischen Stößen gefunden (3.1.3.2).
- Bei der Entdeckung des Neptun hat das Denken in Energie- und Drehimpulserhaltung eine wichtige Rolle gespielt (3.2.3.1).
- Helmholtz konnte mit der „Erhaltung der Kraft“ die Frage nach der Energiequelle der Sonne weit besser beantworten als alle anderen Physiker seiner Zeit (3.2.3.2).
- Durch die Annahme der Erhaltung des Wärmestoffs konnte Carnot den maximalen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine bestimmen (3.3.3.1).
- Die Erhaltung der Energie gab der Fernwirkungs-Theorie den Todesstoß zugunsten der Nahwirkungs-Theorie, die durch das Modell des Feldes und der Feldlinien als Energiedichten von Faraday und Maxwell aufgestellt wurde (3.4.3).
- Der scheinbare Widerspruch zur Energieerhaltung der bohrschen Postulate bewirkte Erklärungsversuche, die in der Idee der Materiewelle mündeten (3.5.3.1).
- Durch das Festhalten an der Energieerhaltung bei der Beschreibung des β -Zerfalls wurde das Antineutrino postuliert, und schließlich auch gefunden (3.5.3.2).

Diese Auflistung macht deutlich, wie sich die allgemeingültige Erhaltung bestimmter Größen zu einem festen Denkprinzip etabliert hat, das immer wieder effektiv auf neue Fragestellungen angewandt wurde. Dabei ist kein Teilgebiet der Physik präveriert, sondern in allen Teilgebieten wird die Erhaltung in gleicher Weise als Denkprinzip genutzt.

Was sich in der Geschichte der Physik bewährt hat, kann und sollte auch beim gegenwärtigen Lernen und Lehren von Physik von hoher Bedeutung sein. Beim Erschließen noch unbekannter Inhalte oder beim Lösen von komplexen Fragestellungen stellt das Denken im Erhaltungsprinzip ein nützliches Werkzeug dar, das im Physikunterricht nicht ungenutzt bleiben sollte.

Kapitel 4

Zum didaktischen Potential des Erhaltungsgedankens

Nachdem in Kapitel 3 die Rolle der Erhaltung in der Physik aus fachlicher Sicht behandelt wurde, soll in diesem Kapitel auf die Rolle der Erhaltung im Physikunterricht aus didaktischer Perspektive eingegangen werden. Dabei sollen didaktische Möglichkeiten aufgezeigt werden, die sich aus der Bedeutung der Erhaltung in der Physik ergeben. Auch bei diesen Betrachtungen wird zwischen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit (siehe dazu Abschnitt 2.2.2) und als Denkprinzip (siehe dazu Abschnitt 2.2.3) differenziert. Als Gesetz wird die Erhaltung in den Schulen ausreichend betont (siehe dazu Kapitel 5). Weniger Anwendung dagegen findet die Betonung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit (siehe dazu Abschnitt 4.1) und als Denkprinzip (siehe dazu Abschnitt 4.2).

4.1 Das didaktische Potential der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit

Der Begriff der Gesetzmäßigkeit ist vor allem durch seinen Umfang des Geltungsbereiches charakterisiert, was ihn vom Gesetz unterscheidet (siehe Abschnitt 2.2). Durch die Allgemeingültigkeit fungiert die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit als integrierender Faktor der Physik. Für den Physikunterricht hat dies zur Folge, dass sich durch die Betonung der Erhaltung Querverbindungen zu anderen Teilgebieten der Physik herstellen lassen. Dass solche Querverbindungen für das Lernen

von tragender Bedeutung sind, soll durch die Lerntheorie Ausubels (Abschnitt 4.1.1) belegt werden. Darauf aufbauend soll aufgezeigt werden, wie solche Verbindungen in der Physik in Erscheinung treten, beispielsweise in Form von Analogien, die dann zur Vermittlung der Erhaltung als Denkprinzip genutzt werden können. Den allgemeinen didaktischen Überlegungen ist ein Unterrichtsentwurf zum elektrischen Feld angeschlossen (Kapitel 4.1.5), um auf eine mögliche Umsetzung hinzuweisen.

4.1.1 Die Lerntheorie Ausubels

David P. Ausubel (1918-2008) hat als gelernter Mediziner von der Psychologie ausgehend eine Theorie des sinnvollen Lernens entwickelt. Seine Gedanken hat er u.a. in seinem Werk „Educational Psychology“ (Ausubel, 1978) publiziert. Die Theorie Ausubels ist u.a. in den Werken „Grundkurs Lehren und Lernen“ von Gunther Eigler (Eigler u. a., 1975) und „Lernpsychologie“ von Walter Edelmann (Edelmann, 2000) übersichtlich dargestellt. Im Folgenden soll Ausubels Theorie skizziert werden, um darauf aufbauend die Möglichkeiten der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit im Physikunterricht aufzuweisen.

4.1.1.1 Lernpsychologische Aspekte des sinnvollen Lernens

Ausubel gilt mit seiner Sichtweise als Vertreter des expositorischen Lernens. Nach dieser Theorie geschieht Lernen im Nachvollziehen der Erklärung des Lehrers¹. Lehrende sollten sich demnach der Aufgabe verpflichtet fühlen, beim Lernenden den Aufbau einer gut organisierten kognitiven Struktur zu fördern. Die Qualität einer kognitiven Struktur besteht nach Ausubel darin, dass die Wissens-elemente aufeinander bezogene und untereinander verbundene Bedeutungen darstellen. Lernen, das den organisierten Aufbau einer kognitiven Struktur fördert, nennt Ausubel „sinnvolles Lernen“. Er definiert es folgendermaßen:

„Das Wesentliche eines sinnvollen Lernprozesses ist, dass symbolisch ausgedrückte Vorstellungen nicht-willkürlich und inhaltlich (nicht wörtlich) bezogen werden auf das, was der Lernende bereits weiß, nämlich

¹Die Gegenposition zum expositorischen Lernen ist z.B. die Theorie des „Entdecken-lassendes Lernen“ wie sie etwa von Jerome Bruner vertreten wird.

auf irgendeinen vorhandenen relevanten Bezugspunkt seiner kognitiven Struktur (z.B. eine Vorstellung, ein bereits sinnvolles Symbol, einen Begriff oder eine Aussage).“ (zitiert nach Eigler u. a., 1975, S. 72)

Aus dieser Definition geht hervor, dass sinnvolles Lernen an zwei Bedingungen geknüpft ist:

- Die nicht-willkürliche Verknüpfung
Damit ist gemeint, dass Neuzuerlernendes durch Beispiele, Ableitungen, Sonderfälle, Verallgemeinerungen usw. in eine Beziehung mit den vorhandenen, vertrauten Bedeutungen gesetzt wird.
- Die inhaltliche Verknüpfung
Diese setzt voraus, dass die Bedeutung eines Inhalts unabhängig von dessen sprachlicher Kodierung ist. Der Lernende sollte folglich in der Lage sein, einen Sachverhalt auf unterschiedliche sprachliche oder symbolische Weise zu verstehen und auch selber wiederzugeben.

Damit sinnvolles Lernen im Sinne Ausubels möglich ist, muss eine kognitive Struktur einen bestimmten Aufbau haben (siehe Abbildung 4.1). In einer kognitiven

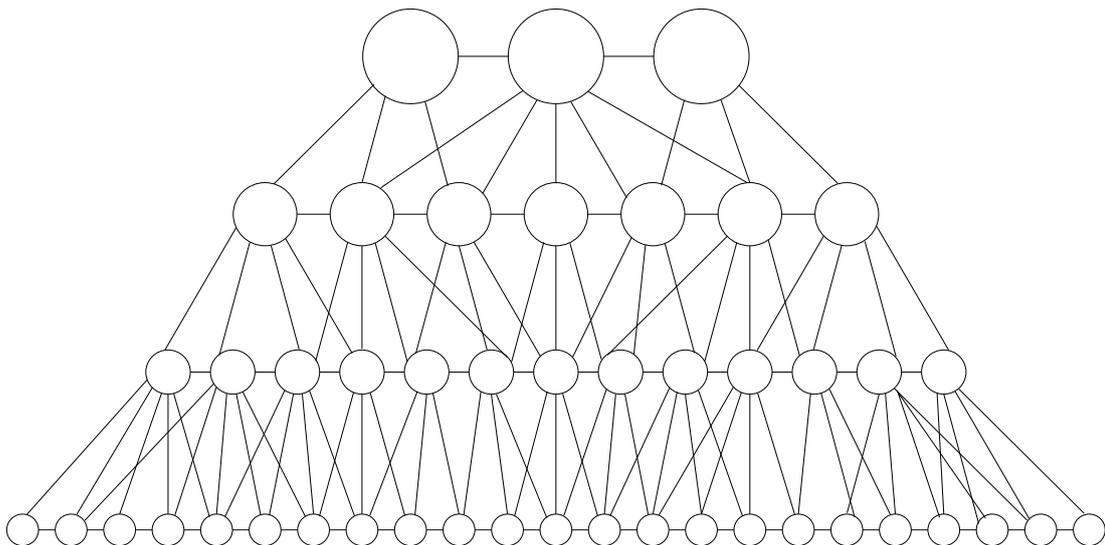


Abbildung 4.1: Der schematische Aufbau einer kognitiven Struktur (Edelman, 2000, S. 140)

Struktur lassen sich nach Ausubel nur dann viele Bedeutungen speichern, wenn

diese hierarchisch aufgebaut ist. Dabei bilden konkrete Informationen und Fakten das Fundament, auf welchem Bedeutungen spezifischer und differenzierter Art gründen. Dem sind allgemeine, abstrakte Bedeutungen übergeordnet. Zwischen den Ebenen sollten zahlreiche Verknüpfungen bestehen. Die Qualität einer kognitiven Struktur lässt sich an drei Kriterien ausmachen. Sie ist abhängig

1. von der Anzahl der verfügbaren Bedeutungen der kognitiven Struktur,
2. von der Klarheit und Stabilität der kognitiven Struktur und
3. von der Vielfalt der Verknüpfungen zwischen den Ebenen einer kognitiven Struktur und zu anderen kognitiven Strukturen.

In der Lerntheorie Ausubels spielt der Begriff der Unterordnung (original: „subsumtion“) eine wichtige Rolle². Darunter versteht er die Unterordnung eines neu zu erlernenden Inhalts unter schon bekannte Bedeutungen als Beispiel, Ausweitung, Modifikation oder Einschränkung. Beim Unterordnen ist die Ebene der abstrakten, allgemeinen Begriffe von besonderer Wichtigkeit. Durch die hohe Erklärungskraft und Beharrlichkeit gegenüber dem Vergessen dienen allgemeine, abstrakte Bedeutungen als Ankerpunkte für neue Bedeutungen spezifischen Inhalts. Die Assimilation der neuen Bedeutungen an vorhandene (subsuming concept) ermöglicht die Integration des neuen Sinngehalts in die gedankliche Matrix des Lernenden. Für das Behalten solcher sinnvoll gelernter Bedeutungen ist also entscheidend (Eigler u. a., 1975, S. 74),

- dass die übergreifenden Bedeutungen (subsuming concepts) ihrerseits klar und stabil in der kognitiven Struktur verankert sind und
- dass im Vorgang der Subsumtion die spezifischen Merkmale der neuen Bedeutung erhalten bleiben, d.h. der Lernende zwischen „subsuming concept“ und neuerlearnter Bedeutung unterscheiden kann.

²Neben der Unterordnung spricht Ausubel aber auch von der Überordnung und Kombination (siehe dazu Eigler u. a., 1975, S. 74).

4.1.1.2 Die Bedingungen des sinnvollen Lernens

Solch ein Lernen ist nach Ausubel nur unter bestimmten Bedingungen möglich. Er differenziert zwischen internen und externen Bedingungen.

Die internen Bedingungen des sinnvollen Lernens

Als erste interne Bedingung zum sinnvollen Lernen ist die Qualität einer kognitiven Struktur zu nennen, die, wie schon erwähnt, durch die Vielfalt der „subsuming concepts“ und deren Klarheit und Stabilität gegeben ist.

Des Weiteren ist sinnvolles Lernen nur dann möglich, wenn der Lernende sinnvoll lernen will. Damit ist mehr gemeint, als die grundsätzliche Motivation des Lernenden. Es reicht beispielsweise nicht aus, wenn der Lernende motiviert ist, sich den Inhalt kurzfristig einzuprägen, um ihn bei einer Überprüfung gut reproduzieren zu können. Gemeint ist der Wille, etwas richtig verstehen zu wollen.

Die externen Bedingungen des sinnvollen Lernens

Unter externen Bedingungen des sinnvollen Lernens werden organisatorische Maßnahmen im Lehr-Lern-Prozess verstanden, die sinnvolles Lernen fördern. Im Rahmen dieser Arbeit seien nur die Bedingungen für die Eingliederung neuer Bedeutungen in eine kognitive Struktur erwähnt. Diese sind

- das Prinzip des progressiven Differenzierens (progressive differentiation),
- das Prinzip des integrierenden Verbindens (integrative reconciliation) und
- das Prinzip der vorstrukturierenden Lernhilfen (advance organizers).

Ausubel nennt außerdem Bedingungen für langfristiges Behalten und für Transfer, die im Folgenden nicht erläutert werden.

Das Prinzip des progressiven Differenzierens (progressive differentiation) Eine Lehr-Lern-Einheit sollte so aufgebaut sein, dass mit den allgemeinen Ideen der Einheit in einer für den Lernenden verständlichen Form angefangen wird. Diese werden dann über sinnvolle Zuordnungen spezifiziert, um letztlich auch konkrete Probleme behandeln zu können.

Das Prinzip des integrierenden Verbindens (integrative reconciliation) Nach dem Prinzip des integrierenden Verbindens sollte beim Lehren immer wieder auf die Verbindungen zu anderen bereits behandelten Inhalten hingewiesen werden. Ebenso sollen die Verknüpfungen zu fachübergreifenden Inhalten betont werden. Diese Hinweise haben zum Ziel, dass der Lernende ein vernetztes Denken entwickelt.

Das Prinzip der vorstrukturierenden Lernhilfen (advance organizers) Die Wiederholung des zurückliegenden Inhalts und die Inhaltsübersicht zu Beginn eines neuen Inhalts, also die advance organizers, erfüllen nach Ausubel folgenden Zweck (zitiert nach Eigler u. a., 1975, S. 77):

- Sie geben einen Vorblick auf Thematik und Lernziel der Lehr-Lern-Einheit,
- sie stellen die Verbindung zu relevanten, in der kognitiven Struktur schon vorhandenen Kenntnissen und Vorstellungen her,
- sie leiten damit die Verankerung zu lernender Bedeutung in der kognitiven Struktur, insbesondere ihrer Unterordnung unter „subsuming concepts“ ein und
- sie weisen auf die wesentlichen Unterschiede zwischen bereits Bekanntem und neuen Lerninhalten hin und schärfen so die für das Behalten wichtige Unterscheidungsfähigkeit.

4.1.2 Die Rolle von Analogien im Physikunterricht

Eine sehr häufige Weise neue Lerninhalte, mit bisher Gelerntem zu verknüpfen oder den Lerninhalt in einen Bezug zu allgemein Bekanntem zu setzen, so wie es die Lerntheorie Ausubels fordert, geschieht über Analogien. Verknüpfungen dieser Art bieten dem Physikunterricht eine sehr gute Gelegenheit, den externen Bedingungen für sinnvolles Lernen Genüge zu leisten. Vor allem das Prinzip des integrierenden Verbindens lässt sich durch Analogiebetrachtungen sehr gut realisieren. Durch die Betonung von Analogien lernt der Lernende die Physik als zusammenhängendes Geflecht mit seinen zahlreichen Ähnlichkeiten und spezifischen Ausformulierungen allgemeingültiger Gesetzmäßigkeiten kennen. Dadurch

wird eine kognitive Struktur von hoher Qualität ausgebildet (im Sinne Ausubels). Allen Vorteilen zum Trotz muss aber auch betont werden, dass Analogien nicht selten Fehlvorstellungen schüren und in die Irre leiten. Der Lehrende sollte wissen, wie diese „zweischneidigen Schwerter“ anzuwenden sind. Im Weiteren soll gezeigt werden, wie das rechte Handhaben von Analogien im Physikunterricht mit der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit zusammenhängen sollte.

4.1.2.1 Allgemeines zu Analogien

In dieser Arbeit wird die Definition von Analogien benutzt, die Reinder Duit und Shawn Glynn in dem Artikel „Analogien - Brücken zum Verständnis“ (Duit und Glynn, 1995) formuliert haben. Demnach ist eine Analogie eine Ähnlichkeit zweier Bereiche hinsichtlich gewisser Eigenschaften. Dabei ist es wichtig zu betonen, dass sich diese Ähnlichkeiten immer nur auf Teile der Strukturen bzw. Eigenschaften der beiden Bereiche beziehen. Analogien in diesem Sinne sind symmetrisch, d.h. Analogie und Zielbereich können ausgetauscht werden. Wie W. Kuhn bemerkt, stellt eine Analogie den Schluss vom Konkreten zum Konkreten dar, wohingegen die Deduktion den Schluss vom Allgemeinen zum Konkreten und die Induktion den Schluss vom Konkreten zum Allgemeinen meint (Kuhn, 1994, S. 2).

In der Geschichte der Physik haben sich Analogien immer wieder als erkenntnisleitend erwiesen. Duit nennt als Beispiele (Duit und Glynn, 1995, S. 5):

- Huygens hat seine Wellentheorie des Lichts analog zur bekannten Wellentheorie des Schalls entwickelt.
- Fouriers Wärmeleitungstheorie war genau wie Sadi Carnots Theorie der Dampfmaschine vom Bild des Wasserstroms beeinflusst.
- Fouriers Theorie wiederum war das Vorbild, auf das Ohm „per analogiam“ seine Theorie des elektrischen Stromflusses entwarf und Fick seine Theorie der Diffusion aufbaute.

Auf Johannes Kepler (1571-1630) geht folgendes Zitat zurück, welches die erkenntnisleitende Rolle von Analogien treffend zum Ausdruck bringt:

„Analogien liebe ich außerordentlich; sie sind meine zuverlässigsten Lehrmeisterinnen, vertraut mit allen Geheimnissen der Natur.“ (zitiert

nach Duit und Glynn, 1995, S. 4)

4.1.2.2 Der allgemeine didaktische Nutzen von Analogiebetrachtungen im Physikunterricht

Die erkenntnisleitenden Hilfestellungen, die Analogien in der Geschichte der Physik geleistet haben, können sie auch heute im Physikunterricht entfalten. Für das Lernen sind Analogiebetrachtungen sehr wichtig, denn durch Analogien wird das Neuzuerlernende in eine Beziehung zum Bekannten gesetzt. Dies macht vor allem sinnvolles Lernen aus, wie es in 4.1.1 thematisiert wurde. Duit und Glynn nennen in ihrem Artikel folgende Vorteile der Nutzung von Analogien im Physikunterricht (Duit und Glynn, 1995, S. 8):

- Analogien (und ihre Verwandten) eröffnen neue Perspektiven, sie erleichtern dadurch die Umstrukturierung des vorhandenen Wissens, den Wechsel von den vorunterrichtlichen Vorstellungen zu den im Unterricht angestrebten physikalischen.
- Sie ermöglichen das Verständnis von abstrakten Begriffen durch den Vergleich mit Dingen und Vorgängen der realen Welt.
- Viele Analogien stellen eine Visualisierung (Verbildlichung) des Abstrakten bereit und sorgen damit für die Veranschaulichung des Abstrakten.
- Sie können eine motivierende Funktion haben, weil sie auf aus der Lebenswelt Bekanntes zurückgreifen und weil sie neue und überraschende Perspektiven öffnen. Das gilt insbesondere für Metaphern.

4.1.2.3 Die Gefahren von Analogiebetrachtungen im Physikunterricht

Trotz aller Vorteile ist Vorsicht beim Nutzen von Analogien geboten. Sie können auch in die Irre leiten. Bunge äußert diesbezüglich:

„Analogien sind zweifellos fruchtbar, aber sie haben genauso viele Monster hervorgebracht wie gesunde Babys.“ (zitiert nach Duit und Glynn, 1995, S. 4)

Dies lässt sich gut mit der Geschichte der Physik belegen. So wurde beispielsweise in der Mitte des 19. Jh. das Erwärmen und Abkühlen von Körpern in der Analogie zu einem Stofffluss gesehen. Diese Analogie hat zwar zu den Begriffen spezifische Wärme und Verdampfungswärme geführt, doch resultierte daraus auch die Fehlvorstellung der Wärme als stofflicher Größe (Duit und Glynn, 1995, S. 6).

Demzufolge listen Duit und Glynn auch negative Aspekte für die Anwendung von Analogien im Unterricht auf (Duit und Glynn, 1995, S. 8-9):

- Die Strukturen oder die sonstigen Eigenschaften des Analogie- und Zielbereiches stimmen nie vollständig überein. Die nicht übereinstimmenden Aspekte können in die Irre leiten, wenn die Grenzen der Analogie nicht hinreichend herausgearbeitet werden.
- Analogien sind nur dann fruchtbar, wenn der Analogiebereich den Schülern wirklich vertraut ist, wenn sie in diesem nicht ebenfalls „falsche“ Vorstellungen besitzen.
- Obwohl Analogien im täglichen Leben auch bei der Deutung von vorgegebenen Phänomenen ganz spontan verwendet werden, ist das spontane Aufgreifen von Analogien, die Lehrer und Lehrbücher anbieten, selten. Die fruchtbare Verwendung von Analogien bedarf sorgfältiger Planung.

Dadurch stellt sich die Frage, was bei einer solchen Planung berücksichtigt werden muss. Wann machen Analogien Sinn und wann nicht, oder: Wann ist eine Analogiebetrachtung legitim? Fragen dieser Art soll im nächsten Abschnitt nachgegangen werden.

4.1.3 Die Erhaltung als Grundlage für Analogien

Der Physikdidaktiker W. Kuhn hat sich intensiv mit der erkenntnisleitenden Funktion von Analogien in der Geschichte der Physik als auch im Physikunterricht befasst. Seine wesentlichsten Erkenntnisse zu diesem Thema hat er in den Artikeln „Analogien in historischer, methodologischer und didaktischer Sicht“ (Kuhn, 1994) und „Die erkenntnisleitende Funktion von Analogien in Forschung und Lehre“ (Kuhn, 1997) publiziert. Er stellt dabei Folgendes fest (Kuhn, 1997, S. 82):

- Analogien sind interpretierbar im ontischen Sinne als strukturelles Sparsamkeitsprinzip der Realität bzw. epistemisch als informationstheoretische Rundanz unseres Denkens über Realität. Die partielle Korrespondenz zwischen Welt und Welterkenntnis beruht auf der Ontogenese unseres Erkenntnisapparates (evolutionäre Erkenntnistheorie).
- Analogien erweisen sich als konstitutive Strukturelemente produktiver physikalischer Hypothesen- und Theoriebildung.
- Analogien haben einen Charakter von anschaulichen „Vortheorien“.
- Analogien führen zum Verständnis neuer Theorien durch Bezug auf bereits bekannte theoretische Zusammenhänge.
- Analogien ermöglichen erkenntnislogische Untersuchungen von Theorien im Hinblick auf innere Konsistenz, Unabhängigkeit und Vollständigkeit ihrer Prinzipien.
- Analogien konstituieren empirische Signifikanz für solche Theorien, aus denen sich ohne approximative Modellierung keine quantitative Aussagen gewinnen lassen.
- Analogien „funktionieren“ dann, wenn sie Ausdruck sind von fundamentalen Prinzipien:
 - Symmetrieprinzip
 - Erhaltungssätzen
 - Extremalprinzipien
 - Selbstreferenzprinzipien
 - Nichtlineare Entwicklungs- bzw. Entfaltungsprinzipien transportieren als metaphysische Hintergrundüberzeugungen Weltansichten.

Der letzte Punkt ist im Rahmen dieser Arbeit von besonderer Wichtigkeit. Kuhn betont ihn auch an anderer Stelle wenn er schreibt, dass ein tieferes physikalisches Verständnis durch Analogien nur dann vermittelt wird...

„...wenn nicht die Konstruktion und das geschickte Handhaben von auswechselbaren Modellen die Szene beherrscht, sondern der Blick stärker auf allgemeine physikalische Prinzipien und Konzepte (Erhaltung, Relativität, Symmetrie) gerichtet wird.“ (Kuhn, 1994, S. 15)

Nur dann, wenn Analogie- und Zielbereich im zugrundeliegenden physikalischen Prinzip übereinstimmen, sind Analogiebetrachtungen legitim³. Mit dem Vokabular dieser Arbeit ausgedrückt kann man sagen, dass Gesetzmäßigkeiten Grundlage für Analogien sein sollten, wenn sie in rechter Weise gebraucht werden sollen. So hat z.B. die Gesetzmäßigkeit der Erhaltung der Energie in den einzelnen Teilgebieten der Physik unterschiedliche Formulierungen (siehe 3.6.2), die in Analogie zueinander gesehen werden können. Alle Größen, die der Gesetzmäßigkeit der Erhaltung unterworfen sind (sogenannte Erhaltungsgrößen), können durch das Übereinstimmen in diesem grundlegenden physikalischen Prinzip in gewisser Analogie zueinander betrachtet werden. Zum Beispiel kann die Kontinuitätsgleichung für die Masse formuliert werden als

$$\frac{\partial \rho_M}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v) = 0. \quad (4.1)$$

Und analog dazu auch für die Ladung, da diese ebenfalls eine Erhaltungsgröße ist. Analog lautet dann die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} + \operatorname{div}(\vec{j}) = 0. \quad (4.2)$$

Würde man die Kontinuitätsgleichung als Analogie auf Photonen in der Lasertechnik anwenden wollen, so würde diese einen in die Irre leiten. Die Photonenanzahl ist keine Erhaltungsgröße, demnach würden Analogie- und Zielbereich nicht im grundlegenden physikalischen Prinzip (in der Gesetzmäßigkeit der Erhaltung) übereinstimmen. Die zeitliche Änderung der Photonendichte ist nicht auf die räumliche Änderung der Stromdichte zurückzuführen (wie dies die Kontinuitätsgleichung aussagen würde), sondern kann zur Ursache spontane Emission, stimulierte Emission, stimulierte Absorption oder auch Resonatorverluste haben.

³Gelegentlich kann eine Analogiebetrachtung auch dann zielführend sein, wenn Analogie- und Zielbereich in äußeren Strukturmerkmalen, wie z.B. der mathematischen Beschreibung übereinstimmen. Bei solchen Analogien ist jedoch Vorsicht geboten, da sie auch in die Irre leiten können.

O. Timmer stellt in seinem Artikel „Fächerübergreifender Unterricht durch Analogien“ (Timmer, 2004) ein schönes Beispiel für eine Analogie dar, das hier in etwas abgewandelter Form aufgegriffen werden soll. Die Analogie basiert auf der Erhaltungseigenschaft von Energie, Drehimpuls und Masse. Dabei wird die erkenntnisleitende Funktion der Erhaltung als Denkprinzip in den Gebieten Kernphysik, Astronomie, Experimentieren im Labor und Alltagserfahrung unterstrichen:

- Kernphysik

Es gelten die Erhaltungssätze von Energie und Impuls. Beim β -Zerfall wird nun experimentell für das Elektron ein kontinuierliches Energiespektrum festgestellt. Um die Erhaltungssätze zu sichern, wird ein weiteres Teilchen postuliert, das dann auch experimentell nachgewiesen werden kann (vgl. Abschnitt 3.5.3.2).

- Astronomie

In der Himmelsmechanik gelten die Erhaltungssätze von Energie und Drehimpuls, wodurch die Bahnen der Planeten recht genau vorhergesagt werden können. Beim Uranus wird nun eine signifikante Abweichung von der Bahn festgestellt. Da an den Erhaltungssätzen festgehalten wird, wird ein noch unbekannter Planet angenommen, der für die Störungen in der Uranusbahn verantwortlich ist, der dann auch entdeckt wurde (vgl. Abschnitt 3.2.3.1).

- Experimentieren im Labor

In einem chemischen Experiment muss das Gewicht der Produkte dem Gewicht der Ausgangssubstanzen entsprechen, da Massenerhaltung gilt. Stellt man eine Abweichung fest, so zweifelt man nicht die Gesetzmäßigkeit der Massenerhaltung an, sondern überprüft die Dichtheit der Apparatur.

- Alltagserfahrung

Wenn in einem Korb eine gewisse Anzahl an Äpfeln liegt, so bleibt diese auch erhalten, wenn keine äußeren Einflüsse wirken. Ist die Anzahl der Äpfel um einen geringer geworden, so wird nicht angenommen, dass sich ein Apfel „in Luft aufgelöst“ hat, sondern ein Dieb (z.B. eine Ratte) wird vermutet.

Die Analogien sind in Tabelle 4.1 übersichtlich dargestellt.

<i>Erfahrungsgebiet</i>	Kernphysik	Astronomie	Experimentieren	Alltags- erfahrung
<i>Gesetzmäßigkeit</i>	Energie- und Impuls-erhaltung	Energie- und Drehimpuls-erhaltung	Massenerhaltung	„Äpfel-erhaltung“
<i>Anomalie</i>	Es fehlt Energie bzw. Impuls beim Elektron	Bahnabweichungen des Uranus	Es fehlt Substanz	Es fehlt ein Apfel
<i>Ursache der Anomalie</i>	Neutrino stört die Energieaufnahme des Elektrons	Neptun stört die Bahn des Uranus	Undichtigkeit an der Apparatur	Ratte stiehlt einen Apfel
<i>Nachweis der Anomalie</i>	Cowan-Reines-Experiment	Beobachtung des Neptun	Geruchsprobe	Fußspuren der Ratte
<i>Gewonnene Erfahrung</i>	Neutrino	Neptun	Undichtigkeit	Ratte

Tabelle 4.1: Analogien auf der Grundlage der Erhaltung

4.1.4 Der spezielle Nutzen von Analogien zur Vermittlung der Erhaltung als Denkprinzip

In den bisherigen Betrachtungen haben wir die Erhaltung durch den Charakter einer allgemeingültigen Gesetzmäßigkeit als Grundlage und damit im gewissen Sinne als Legitimation von Analogiebetrachtungen im Unterricht kennen gelernt. Die Erhaltung als fundamentales Prinzip der Physik soll im Unterricht aber mehr darstellen als nur mahndes Gewissen beim Einsatz von Analogien. Um effektiv Physik betreiben zu können, muss man lernen, diese fundamentalen Prinzipien der Physik als Denkwerkzeug zu nutzen. Dazu ist die Verwendung von Analogien allgemein noch nicht hinreichend. Analogien sind allgemeine heuristische Prinzipien, wie auch das Invarianzprinzip, das Rückführungsprinzip, das Transformationsprinzip u.v.m., die auch in vielen anderen Disziplinen Verwendung finden. In Abbildung 4.2 ist dargestellt, wie die Verknüpfung eines unbekanntes Wissensgebiets mit einem bereits bekannten geschehen kann. Ganz oberflächlich lässt sich eine solche Verbindung durch die Betonung struktureller Gemeinsamkeiten herstellen, z.B. wenn ein Gesetz aus dem unbekanntes Wissensgebiet die glei-

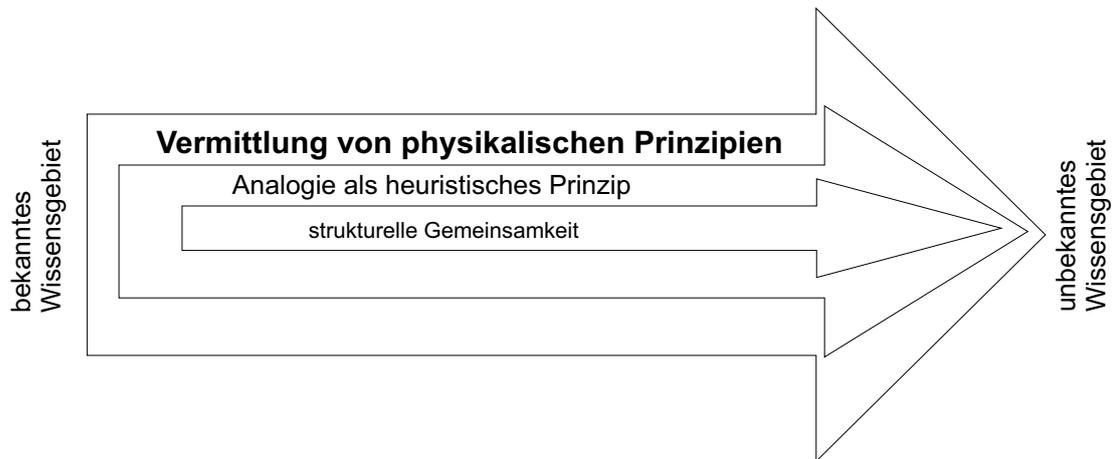


Abbildung 4.2: Die Ebenen der Verknüpfungen eines bekannten Wissensgebiets mit einem Unbekannten

che mathematische Struktur hat wie ein bereits bekanntes Gesetz. Auf etwas tieferem Niveau wäre eine allgemein heuristische Analogiebetrachtung, mit der man beispielsweise etwas Mikroskopisches mit etwas aus dem Alltag bekanntem Makroskopischen verdeutlicht. Bei diesen Analogiebetrachtungen ist jedoch, wie bereits betont, Vorsicht geboten. Erst auf der Grundlage von Gesetzmäßigkeiten sind solche Analogiebetrachtungen legitim. Solch eine Nutzung von Analogien als allgemeine heuristische Prinzipien fördert noch nicht das Denken in physikalischen Prinzipien. Unter den Analogiebetrachtungen sollten diejenigen eine besondere Betonung finden, die nicht nur als Erklärungsmittel ersonnen wurden, sondern bei denen Analogie- und Zielbereich tatsächlich im physikalischen Prinzip übereinstimmen. Auf diesem Wege lassen sich Analogien als Vehikel nutzen, um das Denken in physikalischen Prinzipien zu schulen.

4.1.5 Unterrichtsbeispiel zum elektrischen Feld

Als mögliche Umsetzung der didaktischen Erwägungen dieses Kapitels ist eine Skizze einer Unterrichtsreihe zum elektrischen Feld angefügt.

4.1.5.1 Zur didaktischen Schwerpunktsetzung der Unterrichtsreihe

Die zahlreichen didaktischen Überlegungen, die zur Konzeption einer solchen Unterrichtsreihe notwendig sind, können im Rahmen dieser Darstellung nicht umfassend ausgeführt werden. Es sollen an dieser Stelle lediglich diejenigen didaktischen

Überlegungen betont werden, die den Gedankengang in dieser Arbeit unterstreichen.

Die Rolle von Analogien

Diese Unterrichtsreihe stellt den Versuch dar, das elektrische Feld in Analogie zum Gravitationsfeld zu vermitteln. Es soll darauf hingewiesen werden, dass die Analogiebetrachtungen nur deshalb fruchtbar sind, weil Analogie- und Zielbereich in der physikalischen Gesetzmäßigkeit übereinstimmen (konkret werden die Analogie zwischen Massen- und Ladungserhaltung und die Analogien, die sich aus der Energieerhaltung ergeben, genutzt). Es werden wohl auch rein strukturelle Ähnlichkeiten dieser beiden Wissensbereiche genutzt, doch soll die Analogiebetrachtung zur Vermittlung physikalischer Prinzipien im Fokus stehen. Durch diese Analogiebetrachtungen soll desweiteren im Sinne des ausubelschen Prinzips des integrierenden Verbindens das neu zu Erlernende (elektrisches Feld) in eine sinnvolle Beziehung zum bereits Gelernten (Gravitation) gebracht werden.

Die Rolle der Erhaltung

Eine besondere Betonung wird der Erhaltung beigemessen. Aufgrund der Allgemeingültigkeit der Gesetzmäßigkeit der Energieerhaltung kann beispielsweise der Ansatz des Gleichsetzens von potentieller Energie und kinetischer Energie, dessen Effektivität die Schülerinnen und Schüler aus der Mechanik sehr gut kennen, in gleicher Weise auch in der Elektrodynamik genutzt werden. Durch die Betonung der Erhaltung sollen solche didaktischen Möglichkeiten aufgewiesen werden.

Vom Allgemeinen zum Konkreten

In Anlehnung an die Lerntheorie Ausubels sieht die Konzeption der Unterrichtsreihe (wo möglich) eine Vorgehensweise vom Allgemeinen zum Konkreten vor. Der Wechsel der Betrachtungsebene (phänomenologische Ebene - modellhafte Ebene - mathematisch/abstrakte Ebene) soll von den Schülerinnen und Schülern bewusst wahrgenommen werden. So soll beispielsweise aufgezeigt werden, dass der stromdurchflossene Leiter nur ein Spezialfall des elektrischen Feldes ist.

4.1.5.2 Zu den Voraussetzungen und Vorgaben der Unterrichtsreihe

Diese Unterrichtsreihe wurde vom Verfasser an einem Gymnasium in Herborn zum Beginn des Schuljahres 2011/2012 in einem Physik-Leistungskurs der Klasse 12 erprobt. Seitens des Kultusministeriums des Landes Hessen gelten für den Physik-Leistungskurs der Klasse 12 für das Thema elektrisches Feld die Vorgaben aus Tabelle 4.2.

Die Mechanik, samt der Gravitationstheorie, kann vorausgesetzt werden, da diese in der Klasse 11 behandelt wird.

Der zeitliche Rahmen für den Unterrichtsblock zum Thema „elektrisches Feld“ beläuft sich auf drei Wochen. In einer Woche finden 5 Schulstunden (2 + 2 + 1) Physikunterricht statt.

Verbindliche Unterrichtsinhalte	Konkretisierung
homogenes und inhomogenes Feld, Influenz	<ul style="list-style-type: none"> - Feldlinienbilder, speziell: radialsymmetrisches Feld einer Punktladung und homogenes Feld eines Plattenkondensators - Influenz bei Leitern und Polarisation bei Nichtleitern - elektrische Ladung und ihre Einheit als abgeleitete Größe der Stromstärke $I = \dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$ bzw. $Q = \int I dt$, Ladung als Erhaltungsgröße
Quantisierung der Ladung	<ul style="list-style-type: none"> - Millikan-Versuch im Schwebefall
Coulombkraft	<ul style="list-style-type: none"> - Das coulombsche Gesetz $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
Feldstärke	<ul style="list-style-type: none"> - $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ Feldstärke in homogenen Feldern und im radialsymmetrischen Feld
Potential, Spannung, Feldstärke	<ul style="list-style-type: none"> - Entwicklung des Potentialbegriffes: $V_{01} = \frac{W_{01}}{q}$ - potentielle Energie im elektrischen Feld, Äquipotentiallinien, $U = \Delta V$ - $U = \vec{E} \cdot \vec{s}$ bzw. $E = U/d$ im homogenen Feld des Plattenkondensators - Potential im Radialfeld - Gesetze des Gleichstromkreises (Widerstandsdefinition $R = U/I$, 1. und 2. kirchhoffsches Gesetz)
Kapazität, Feldenergie	<ul style="list-style-type: none"> - Kapazität eines Kondensators: $C = Q/U = const$, Herleitung von $C = \epsilon_0 A/d$ für den Plattenkondensator - die Naturkonstante ϵ_0 als Proportionalitätskonstante von Q/A und E oder von C und A/d - Parallel- und Reihenschaltung von Kondensatoren - Materie im elektrischen Feld, Dielektrikum, Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = C_r/C_0$ - Kondensator als Energiespeicher: $W_{el} = \frac{1}{2} C U^2$ Betrachtung des Auf- und Entladevorgangs beim Kondensator, Entladung auch mit Differenzialgleichung, Lösung mit Hilfe eines Lösungsansatzes

Tabelle 4.2: Handreichungen zum Thema „Das elektrische Feld“ des Kultusministeriums des Landes Hessen für den Physik-Leistungskurs der Klasse 12 (Hessisches Kultusministerium, 2011)

4.1.5.3 Skizze der Unterrichtsreihe

Die Unterrichtsreihe zum elektrischen Feld setzt sich aus neun aufeinander aufbauenden Unterrichtssequenzen zusammen. In der Tabelle 4.3 sind diese übersichtlich dargestellt.

Inhalt	Zeit in Stunden
Grundlegendes zur elektrischen Ladung	2
Die Coulombkraft	2
Influenz und Polarisierung	1
Das Modell des elektrischen Feldes	2
Die mathematische Beschreibung des elektrischen Feldes	2
Aufgaben zur Vertiefung der mathematischen Beschreibung des Feldes	1
Das elektrische Feld als Energiespeicher	2
Das ohmsche Gesetz	2
Elektrische Netzwerke	1
insgesamt	15

Tabelle 4.3: Lernsequenzabfolge der Unterrichtseinheit zum elektrischen Feld

Erste Unterrichtssequenz: Grundlegendes zur elektrischen Ladung

Als Einstieg können Experimente zur Elektrostatik als Demonstrationsexperiment vorgeführt und Schülerexperimente durchgeführt werden. Dem wird ein geschichtlicher Exkurs über elektrische Effekte hinzugefügt, wodurch bereits die beiden Arten von Ladungen (positive und negative) angesprochen werden. Dass die Ladung eine grundlegende Eigenschaft der Materie ist, wird durch die Analogie zur Masse betont (siehe Tabelle 4.4). Bei der Dichte wird auf den Unterschied zwischen der Massendichte und der Ladungsdichte hingewiesen. Während bei der Masse die Raummassendichte von tragender Bedeutung ist, wird bei der Ladung die Flächenladungsdichte häufiger verwendet. An dieser Stelle wird der faradaysche Käfig thematisiert.

Ladung		Masse
Q bzw. q	<i>Formelzeichen</i>	M bzw. m
C	<i>Einheit</i>	kg
Elementarteilchen $q_p = 1,602 \cdot 10^{-19} C =: e$ $q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} C = -e$ Alle Ladungen sind Vielfache der Elementarladung $Q = Ne$	<i>Träger</i>	Elementarteilchen $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} kg$ $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} kg$
Raumladungsdichte: $\rho = \frac{q}{V}$ Flächenladungsdichte: $\sigma = \frac{q}{A}$ Linienladungsdichte: $\lambda = \frac{q}{l}$	<i>Dichte</i>	Raummassendichte: $\rho = \frac{m}{V}$
Ladungserhaltungssatz: Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden $Q = \sum_{i=1}^n q_i = konstant$	<i>Erhaltungsgesetz</i>	Massenerhaltungssatz: Masse kann weder erzeugt noch vernichtet werden $M = \sum_{i=1}^n m_i = konstant$

Tabelle 4.4: Masse und Ladung als fundamentale Eigenschaften der Materie

Zweite Unterrichtssequenz: Die Coulombkraft

Dass sich Ladungen anziehen bzw. abstoßen, wurde in der ersten Unterrichtssequenz bereits phänomenologisch thematisiert. Nun soll die Anziehung bzw. Abstoßung quantifiziert werden. Konkret soll die Einführung des Coulombgesetzes Ziel dieser Unterrichtssequenz sein. Dies soll in Analogie zum Gravitationsgesetz hergeleitet werden⁴ (siehe Tabelle 4.5). Dabei spielt das Abstandsgesetz (die $\frac{1}{r^2}$ -Abhängigkeit) eine wichtige Rolle. Dies kann durch geometrische Überlegungen plausibel gemacht (ein von einem Punkt isotrop ausgehender Effekt verteilt sich im Abstand r gleichmäßig auf der Kugelschale der Fläche $4\pi r^2$) und durch ein Experiment bestätigt werden. Dazu kann man beispielsweise die Lichtstärke einer matten Glühbirne in Abhängigkeit zum Abstand messen.

⁴Bei dieser Analogiebetrachtung ist jedoch Vorsicht geboten, da die Grundlage dieser Analogie nicht das Übereinstimmen des fundamentalen Prinzips von Analogie- und Zielbereich darstellt, sondern die Beschreibung der gleichen Erscheinung - nämlich der Abstoßung bzw. Anziehung zweier Körper. Auch wenn deren Ursache eine unterschiedliche ist, ist die formale Beschreibung doch dieselbe (vgl. Kuhn, 1994, S. 15).

Zur Festigung und Vertiefung sollen die Schülerinnen und Schüler Aufgaben mit konkreten Werten rechnen, um ein Gefühl für die Größenordnungen zu bekommen. Konkret könnte man die elektrostatische und gravitative Anziehungskraft von Elektron und Proton im Wasserstoffatom ausrechnen und miteinander vergleichen. Darauf aufbauend lässt sich die Frage erörtern, wieso im Makroskopischen die scheinbar kleinere Gravitationskraft eine wesentlich größere Rolle spielt als die Coulombkraft.

Ladung		Masse
$F \propto q_1$	<i>actio = reactio</i>	$F \propto m_1$
$F \propto q_2$		$F \propto m_2$
$F \propto q_1 q_2$		$F \propto m_1 m_2$
$F \propto \frac{1}{r^2}$	Abstandsgesetz	$F \propto \frac{1}{r^2}$
$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$		$F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$
$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ mit $k = 8,988 \cdot 10^9 \frac{\text{m}^3 \text{kg}}{\text{C}^2 \text{s}^2}$		$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ mit $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$
Coulombgesetz		Gravitationsgesetz

Tabelle 4.5: Die Analogie zwischen Coulombgesetz und Gravitationsgesetz

Dritte Unterrichtssequenz: Influenz und Polarisierung

In dieser Unterrichtsstunde werden die Aufgaben der zurückliegenden Stunden besprochen, die Inhalte vertieft und die Phänomene der Influenz und Polarisierung besprochen. Dabei werden die Begriffe des Leiters und Nichtleiters eingeführt, die bereits in gewisser Weise aus der Mittelstufe bekannt sind.

Zum didaktischen Konzept dieser Arbeit trägt diese Unterrichtssequenz nicht viel bei, deswegen wird sie auch nicht weiter ausgeführt.

Vierte Unterrichtssequenz: Das Modell des Feldes

Nachdem nun die Kraftwirkung zwischen Ladungen durch das Coulombgesetz beschrieben werden kann, stellt sich die Frage, wie die Wirkung von einer Ladung zur anderen gelangt. Es kann aufgezeigt werden, wie um diese Antwort im 19. Jahrhundert gerungen wurde. Dabei gab es zwei Positionen:

- Die Fernwirkungstheorie:

Die Energie verschwindet bei einem Probekörper und taucht bei einem anderen wieder auf (Vertreter: Weber, Gauß, Ampère).

- Die Nahwirkungstheorie:

Die Ladung wirkt zunächst auf ihre nähere Umgebung im Raum und durch diese breitet sie sich von Raumpunkt zu Raumpunkt zu entfernten Ladungen aus. Im Modell wird dies mit Feldlinien beschrieben. Die Feldlinien können als Energiedichten interpretiert werden (Vertreter: Faraday, Maxwell).

Dabei wird plausibel gemacht, dass sich die Nahwirkungstheorie gerade aufgrund der Validität der Energieerhaltung durchgesetzt hat (vgl. Abschnitt 3.4.3).

Das Modell des Feldes wird vertieft, indem auf zwei Arten von Feldern hingewiesen wird: Das homogene Feld (HF) und das radialsymmetrische Feld (RSF).

Die Analogie zur Gravitation soll auch an dieser Stelle betont werden, da jede Masse ein Gravitationsfeld verursacht. Dass ein radialsymmetrisches Feld in einem kleinen Teilausschnitt als homogenes Feld anzusehen ist, kann am Beispiel des Gravitationsfeldes der Erde gut verdeutlicht werden: Aus hinreichender Entfernung gesehen verursacht die Erde ein radialsymmetrisches Feld, für uns als Erdenbewohner stellt es aber ein homogenes Feld dar, da wir nur einen vergleichsweise winzigen Teil wahrnehmen.

Fünfte Unterrichtssequenz: Die mathematische Beschreibung des Feldes

Um das elektrische Feld quantitativ beschreiben zu können, müssen weitere Begriffe festgelegt werden. Von besonderer Bedeutung ist der Begriff der Feldstärke E . Diese ist durch die Kraft F , die eine Probeladung im entsprechenden Feld erfährt, definiert. Durch die Analogie mit dem Gravitationsfeld können Schüler die neuen Begriffe mit den bereits bekannten Begriffen aus der Mechanik in Verbindung bringen (siehe dazu Tabelle 4.6). Konkret kann die Feldstärke E als Analogon zu der Beschleunigung im Gravitationsfeld (im Gravitationsfeld der Erde entspricht dies der Erdbeschleunigung g) aufgefasst werden, was das Verständnis erfahrungsgemäß um Einiges vereinfacht.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus dieser Analogie bezüglich des Begriffes der Äquipotentialfläche. Schülerinnen und Schülern sind Äquipotentialflächen als Höhenlinien in entsprechenden Landkarten bereits bekannt. Dieses Wissen lässt sich nutzen, um den Begriff der Äquipotentialfläche im elektrischen Feld zu verdeutlichen.

Auf diesen Betrachtungen aufbauend lässt sich auch der Begriff der elektrischen Spannung als Potentialdifferenz einführen. Dass eine Potentialdifferenz für die Probekörper ein Anreiz zur Bewegung darstellt, ist den Schülerinnen und Schülern aus der Alltagswelt bekannt. Weil z.B. die Regenwassertonne höher steht als der zu bewässernde Garten, fließt das Wasser durch den Schlauch von der Tonne in den Garten. So fließen auch Ladungen, wenn eine Potentialdifferenz, sprich eine Spannung, anliegt.

Die Beschreibung des radialsymmetrischen Feldes kann an dieser Stelle genutzt werden, um die Proportionalitätskonstante k aus dem Coulombgesetz näher zu bestimmen. Dabei spielt gerade die Ladungserhaltung eine tragende Rolle. Dazu folgendes Gedankenexperiment:

Eine Kugel habe den Radius r und die Ladung Q . Für die Flächenladungsdichte auf der Oberfläche gilt dann:

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2}. \quad (4.3)$$

Wenn nun die Kugel in den Mittelpunkt zusammenschrumpft, so ändert sich die Ladung nicht. Diese lässt sich mit der Feldstärke bestimmen, die im Abstand r herrscht. Sie beträgt

$$E = k \frac{Q}{r^2}. \quad (4.4)$$

Nach Q umgestellt gilt dann:

$$Q = \frac{Er^2}{k}. \quad (4.5)$$

4.3 und 4.5 zusammengenommen ergibt:

$$\sigma = \frac{E}{4\pi k}. \quad (4.6)$$

Daraus lässt sich die Proportionalität $\sigma \propto E$ mit der Proportionalitätskonstanten $\frac{1}{4\pi k}$ ablesen. Weil diese Proportionalitätskonstante so wichtig ist, wird sie auch als elektrische Feldkonstante bezeichnet und erhält das Formelzeichen ϵ_0 . Es gilt:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} \quad (4.7)$$

Oder anders ausgedrückt:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (4.8)$$

Damit ist die Proportionalitätskonstante im Coulombgesetz, die sich zweckmäßig aus dem gaußen Quellsatz in SI-Einheiten ergibt, genauer identifiziert. Die Vorgehensweise, im Coulombgesetz das k vorläufig zu benutzen, um die Analogie zum Gravitationsgesetz zu wahren und die genaue Form erst über das radialsymmetrische Feld anzugeben, macht nach Meinung des Verfassers didaktisch mehr Sinn, als den Koeffizienten $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ „vom Himmel fallen zu lassen“.

Ladung		Masse
$E = \frac{F}{q}$ im RSF der erzeugenden Ladung Q : $E = \frac{kQq}{qr^2} = \frac{kQ}{r^2}$	<i>Feldstärke := Kraft pro Probeladung bzw. Masse</i>	$a = \frac{F}{m}$ im Gravitationsfeld der Erde: $g = \frac{F_G}{m}$
HF: $E_{pot} = qEs$ RSF: $E_{pot} = kQq \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$	<i>Potentielle Energie $E_{pot} = \int \vec{F} d\vec{s}$</i>	HF der Erde: $E_{pot} = mgh$ RSF: $E_{pot} = GMm \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$
$\phi = \frac{E_{pot}}{q}$ HF: $\phi = Es$ RSF: $\phi = kQ \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$	<i>Potential (vom speziell betrachteten Körper unabhängig)</i>	$\phi = \frac{E_{pot}}{m}$ HF: $\phi = gh$ RSF: $\phi = GM \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

Tabelle 4.6: Die Analogie zwischen den Begriffen zur mathematischen Beschreibung des elektrischen Feldes und des Gravitationsfelds

Sechste Unterrichtssequenz: Aufgaben zur Vertiefung der mathematischen Beschreibung des Feldes

Zur Festigung der Inhalte wird an dieser Stelle eine Übungsstunde eingefügt. Dabei wird bewusst darauf eingegangen, wie elegant der Erhaltungsansatz greift. Die Schülerinnen und Schüler sollen dafür sensibilisiert werden, dass der bekannte Ansatz aus der Mechanik, bei dem man die potentielle Energie gleich der kinetischen Energie setzt, hier in gleicher Weise angewendet werden kann. An dieser Stelle seien zwei Aufgaben exemplarisch aufgeführt:

- Aufgabe 1

Eine Kugel mit der Ladung $Q_1 = 1,2 \cdot 10^{-8}$ C und der Masse $m = 2$ g hängt an einem langen isolierten Faden der Länge $l = 2$ m. Im Feld einer anderen

geladenen Kugel wird sie um $s = 0,2$ m aus der Lotrechten ausgelenkt (siehe Abbildung 4.3). Bestimmen sie die Ladung Q_2 der anderen Kugel (Bredthauer, 2010, S. 121).

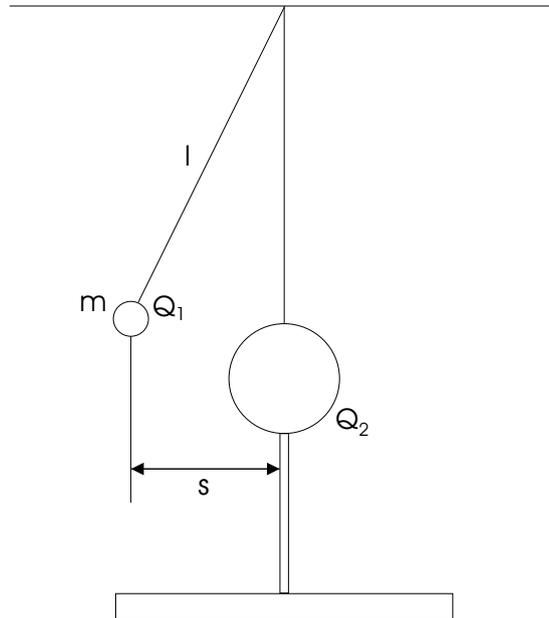


Abbildung 4.3: Skizze zur Aufgabe 1 zum elektrischen Feld

- Aufgabe 2

Ein Elektron verlasse den Ursprung mit der Geschwindigkeit $3 \cdot 10^6$ m/s in einem Winkel von $\alpha = 35^\circ$ zur x-Achse. Es bewege sich in einem homogenen elektrischen Feld, das parallel zur y-Achse mit der Feldstärke $E = 5 \cdot 10^4$ N/C in positiver Richtung wirkt. Wie weit entfernt sich das Elektron maximal von der x-Achse (vgl. Tipler und Gerlich, 2000, S. 640ff)?

Lösung der Aufgabe 1 In dieser Aufgabe haben wir ein elektrisches Feld im Gravitationsfeld der Erde. Den Zuwachs an potentieller Energie im Gravitationsfeld erfährt die Kugel durch das elektrische Feld. Mit dem Energieerhaltungsansatz kann man folglich formulieren⁵:

$$mgh = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 s} \quad (4.9)$$

⁵ s ist dabei der horizontale Abstand zur Pendelposition in der Ruhelage (siehe Abbildung 4.3). Richtiger wäre es, den genauen Abstand beider Ladungen zu verwenden, doch aufgrund der geringen Auslenkung des Pendels können diese beiden Strecken gleichgesetzt werden.

Nach Q_2 umgestellt gilt dann:

$$Q_2 = \frac{mgh \cdot 4\pi\epsilon_0 \cdot s}{Q_1} \quad (4.10)$$

Daraus ergibt sich für $Q_2 = 3,64 \cdot 10^{-7}$ C. Wählt man zur Lösung der Aufgabe den Ansatz über die Kräftebetrachtung, so gestaltet sich die Lösung als deutlich schwieriger, allein schon, weil mehr geometrisches Handwerkszeug benötigt wird.

Lösung der Aufgabe 2 Wenn die Lernenden die Analogien aus den letzten Stunden auf diese Aufgabe anwenden, so wird schnell die Ähnlichkeit zum schrägen Wurf deutlich. Die Formel für die Wurfhöhe lässt sich auch über die Kräfte herleiten. Der Weg über die Energieerhaltung stellt aber eine wesentlich elegantere Vorgehensweise dar. Bei der maximalen Höhe ist die komplette kinetische Energie, die von der y-Komponente der Geschwindigkeit herrührt, in potentielle Energie umgewandelt. Damit gilt:

$$\frac{1}{2}m_e v_y^2 = eEs \quad (4.11)$$

Die Schwierigkeit der Aufgabe besteht dann darin, die Geschwindigkeit in y-Richtung zu ermitteln. Durch das Superpositionsprinzip und geometrische Überlegungen ergibt sich, dass diese $v_y = v \cdot \sin\alpha$ betragen muss. Für s erhält man dann einen Wert von $s = 1,68 \cdot 10^{-4}$ m.

Siebte Unterrichtssequenz: Das elektrische Feld als Energiespeicher

Diese Unterrichtssequenz kann damit eingeleitet werden, dass man den Zweck von Energiespeichern bespricht. Dazu bietet sich eine Gruppenarbeit der Schülerinnen und Schüler an. Ziel dieser Einleitungsphase ist es, die Lernenden für die Frage zu motivieren, wie man elektrische Energie speichern kann. Es wird auch in Erinnerung gerufen, wie dies bei mechanischer Energie geschieht, nämlich z.B. durch eine Feder. In Analogie dazu soll in dieser Unterrichtssequenz der Kondensator besprochen werden⁶ (siehe dazu Tabelle 4.7). Bei der Einführung des elektrischen

⁶Bei dieser Analogie ist auch zu beachten, dass es sich, wie schon beim Gravitations- und dem Coulombgesetz, um eine formal mathematische Analogie handelt. Es sei daran erinnert, dass Analogiebetrachtungen in dieser Unterrichtsreihe nur als Vehikel zum Transport des Lerninhalts genutzt werden sollten.

Feldes wurde schon betont, dass die Feldlinien als Energiedichte ρ_E zu interpretieren sind. Demnach müsste in einem Volumen V die Energie $W = \rho_E \cdot V$ durch ein elektrisches Feld zu speichern sein⁷.

Zum tieferen Verständnis des Begriffs der Kapazität eines Kondensators spielt die Ladungs- und Energieerhaltung eine tragende Rolle. Die Kapazität ist dadurch definiert, wieviel Ladung bei einer bestimmten angelegten Spannung auf den Kondensator „passt“. An dieser Stelle wäre ein Exkurs zum Stichwort Durchschlagsfestigkeit sehr interessant. Ist eine bestimmte Ladungsdichte überschritten, so entlädt sich der Kondensator durch einen Lichtbogen⁸. Dadurch wird schon ersichtlich, dass die Kapazität eines Kondensators von dem Medium zwischen den Platten abhängig ist und wird durch die Dielektrizitätskonstante beschrieben. Ist das Medium ein Dielektrikum, so richten sich die Dipole zwischen den Kondensatorplatten aus, wodurch das Feld geschwächt wird und damit mehr Ladungen bei bestimmter Spannung auf die Platten passen. Desweiteren kann man aus den Überlegungen schließen, dass die Kapazität eines Kondensators von seiner Geometrie abhängig ist. Wenn sich z.B. die Fläche A vergrößert, sinkt die Ladungsdichte aufgrund der Ladungserhaltung, und es passen mehr Ladungen auf den Kondensator. Es gilt folglich: $C \propto A$. Vergrößert man den Abstand d , so müsste die Spannung U zunehmen, um in dem Kondensator ein Feld gleichbleibender Stärke zu wahren, da ja: $E = Ud$ gilt. Damit gilt: $C \propto \frac{1}{d}$. Insgesamt gilt folglich: $C \propto \frac{A}{d}$. Die Proportionalitätskonstante ist die elektrische Feldkonstante, so dass gilt: $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$.

Achte Unterrichtssequenz: Das ohmsche Gesetz

Die zeitliche Änderung der Ladung an einem bestimmten Ort spielt eine wichtige Rolle und wird als Stromstärke bezeichnet. Formal ausgedrückt gilt:

$$I = \frac{dQ}{dt}. \quad (4.12)$$

⁷Die Energie wird hier mit dem Formelzeichen W dargestellt, um Verwechslungen mit der Feldstärke E zu vermeiden.

⁸Man könnte diesen Sachverhalt noch vertiefen und ausrechnen, wie weit man sich einer Hochspannungsleitung nähern kann, ohne einen Stromschlag zu bekommen.

Ladung		Masse
Kondensator	<i>Energiespeicher</i>	Feder
Kapazität C $Q \propto U$ $Q = CU$	<i>Beschrieben durch charakteristische Größe</i>	Federkonstante D $F \propto s$ $F = Ds$
Arbeit um Ladung zu transportieren $W = \int QdU$ Dreiecksfläche im U-Q-Diagramm $W = \frac{1}{2}QU$ $W = \frac{1}{2}CU^2$	<i>Gespeicherte Energie</i> <i>aufgrund der Proportionalität</i>	Arbeit um Feder auszulenken $W = \int Fds$ Dreiecksfläche im F-s-Diagramm $W = \frac{1}{2}Fs$ $W = \frac{1}{2}Ds^2$

Tabelle 4.7: Die Analogie zwischen einem Kondensator als Energiespeicher und einer Feder als Energiespeicher

Bei der Beschreibung von Feldern spielt weniger der elektrische Strom als vielmehr die Stromdichte j eine Rolle⁹. Es gilt:

$$I = \int_A j dA. \quad (4.13)$$

Georg S. Ohm (1789-1854) beschrieb als Erster den Sachverhalt, dass die Stromdichte proportional zur elektrischen Feldstärke ist. Die Proportionalitätskonstante wird elektrische Leitfähigkeit genannt und trägt das Formelzeichen σ . Das ohmsche Gesetz lautet in seiner eigentlichen Form:

$$j = \sigma E. \quad (4.14)$$

Für einen stromdurchflossenen Leiter gelten die gleichen Gesetze wie für ein elektrisches Feld allgemein. Ein Draht kann als Kondensator mit kleinen Platten an den Drahtenden und großem Plattenabstand angesehen werden. Für einen Draht der Länge l , dem Querschnitt A und der Leitfähigkeit σ gilt durch Anlegen der Spannung U :

$$U = El. \quad (4.15)$$

Verwendet man für die Feldstärke nun den Ausdruck, der sich aus dem ohmschen Gesetz ergibt (4.14), so erhält man:

$$U = \frac{j}{\sigma} l. \quad (4.16)$$

⁹Der Vektorcharakter bestimmter Größen wird in diesem Abschnitt nicht berücksichtigt, da die entsprechenden Größen senkrecht zueinander gerichtet sind.

Dividiert man nun durch die Stromstärke $I = jA$, so gilt:

$$\frac{U}{I} = \frac{l}{\sigma A}. \quad (4.17)$$

Der Quotient auf der linken Seite wird auch elektrischer Widerstand genannt, und trägt das Formelzeichen R . Für diesen gilt folglich:

$$R = \frac{l}{\sigma A}. \quad (4.18)$$

Dieses Gesetz können die Schülerinnen und Schüler leicht experimentell nachvollziehen, indem sie in Gruppen den Widerstand eines Drahtes in Abhängigkeit von dem Querschnitt, der Länge und dem Material messen.

Neunte Unterrichtssequenz: Elektrische Netzwerke

In dieser Unterrichtssequenz geht es vor allem um die beiden kirchhoffschen Gesetze. Auch bei der Beschreibung von Netzwerken kann die Analogie zwischen Ladungs- und Massenerhaltung genutzt werden. Dabei greift man weniger auf die Theorie der Mechanik zurück, als mehr auf die Alltagserfahrung der Schülerinnen und Schüler (siehe Tabelle 4.8).

Ladung		Masse
Ladungserhaltung	<i>Erhaltungssatz</i>	Massenerhaltung
erstes kirchhoffsches Gesetz: Die Summe aller Ströme an einem Knoten ist null.	<i>Konsequenz</i>	Die Summe aller Massenströme an einem Knoten ist null (z.B. Verzweigung einer Wasserrohrleitung).
zweites kirchhoffsches Gesetz: Die Summe aller Spannungen ist null.	<i>Energieerhaltung</i>	Die Summe aller Potential- differenzen bei einem geschlossenen Weg in einem konser- vativem Kraftfeld ist null (z.B. ein Ball, der einmal auf eine Treppe gehoben wurde und dann schrittweise runterfällt).

Tabelle 4.8: Die Analogie zwischen Ladung und Masse zur Beschreibung elektrischer Netzwerke

4.2 Das didaktische Potential der Erhaltung als Denkprinzip

Aufgrund des weiten Gültigkeitsbereiches von Gesetzmäßigkeiten nehmen Denkprinzipien auf der Grundlage solcher Gesetzmäßigkeiten den Charakter eines universellen Schlüssels zum Lösen von Problemen an. Die erkenntnisleitende Funktion des a priori Denkprinzips wurde in Kapitel 3 dargestellt. Die gedankliche Verwendung der Erhaltung als Denkprinzip macht einen wesentlichen Teil des konzeptionellen Verständnisses von Physik aus (vgl. Abbildung 1.3). Gerade ein solches konzeptionelles Verständnis soll als zentrales Ziel im Physikunterricht erreicht werden. Es heißt etwa in den einheitlichen Prüfungsanforderungen (EPA):

„Die Prüflinge haben ein gefestigtes Wissen über physikalische Grundprinzipien (z.B. Erhaltungssätze, Kausalität, Systemgedanke) und über zentrale historische und erkenntnistheoretische Gegebenheiten.“ (Kultusministerkonferenz, 1989, i.d.F.v. 05.02.2004, S. 3)

Doch nicht nur die Vermittlung der Grundprinzipien als solche sollte Ziel des Physikunterrichts sein. Durch die erkenntnisleitende Wirkung kann ein Denkprinzip als Problemlösewerkzeug eingesetzt werden. Die Vermittlung solcher Denkprinzipien kann folglich als Weg genutzt werden, um Kompetenzen, wie die Problemlösekompetenz, zu vermitteln. In den EPA ist festgehalten:

„Die Prüflinge haben Erfahrungen mit Strategien der Erkenntnisgewinnung und Problemlösung (z.B. Beobachtung, intuitiv-spekulatives Entdecken, Hypothesen formulieren, induktives, deduktives Vorgehen, Übertragen, Modellbilden).“ (Kultusministerkonferenz, 1989, i.d.F.v. 05.02.2004, S. 3)

Wie in der Arbeit bisher gezeigt wurde, stellt gerade das Nutzen der physikalischen Denkprinzipien eine Strategie der Erkenntnisgewinnung und Problemlösung dar. Der Begriff des Denkprinzips umfasst verschiedene Aspekte dessen, was in den EPA zur Konkretisierung der Strategien der Erkenntnisgewinnung und Problemlösung genannt ist. Die Frage, die sich nun stellt, ist, wie die Vermittlung

von Denkprinzipien, vor allem unter dem Aspekt des Problemlösewerkzeugs, im Unterricht konkret geschehen kann. Als Antwort lassen sich zwei Punkte formulieren:

- Auf die Rolle von Denkprinzipien in der Physik kann durch historische Beispiele (wie sie in Kapitel 3 angeführt wurden) hingewiesen werden. Die Geschichte der Physik stellt für den Physikunterricht eine Quelle zur Verdeutlichung dar. Aus dem Vorgehen berühmter Physiker können/ sollen Schülerinnen und Schüler lernen, wie sie auch heute an Fragestellungen der Physik herangehen sollen.
- Ein weiterer Weg zur Vermittlung der Effektivität physikalischer Denkprinzipien ist das Durchdenken bzw. Durchdenken-Lassen von vielen physikalischen Problemstellungen, bei denen physikalische Denkprinzipien zielführend sind. Durch mehrfaches Vormachen und wiederholtes Üben festigt sich das Handhaben solcher Denkprinzipien.

Der zweite Punkt soll im Folgenden vertieft werden. Einleitend soll zunächst auf die Rolle von Aufgaben im Physikunterricht eingegangen werden (Abschnitt 4.2.1). Darauf aufbauend soll die didaktische Forderung nach offenen Aufgaben (Fermi-Aufgaben) aufgegriffen werden (4.2.2). In diesem Zusammenhang wird auch auf das Problemlösen in der Physik allgemein eingegangen (Abschnitt 4.2.3). Im Anschluss soll in Abschnitt 4.2.4 darauf hingewiesen werden, welche Rolle die Erhaltung als Denkprinzip im Prozess des Problemlösens spielt bzw. spielen kann. Zur Verdeutlichung sind in Abschnitt 4.2.5 einige Beispielaufgaben aufgelistet, die im Physikunterricht zur Vermittlung der Erhaltung als Denkprinzip dienlich sein könnten.

4.2.1 Zur Aufgabenkultur im Physikunterricht

Spätestens nach den Studien TIMMS und PISA ist Kritik an der Aufgabenkultur im Physikunterricht laut geworden. P. Häußler und G. Lind haben diese Kritik in dem Artikel „Aufgabenkultur‘ - was ist das?“ übersichtlich zusammengefasst (Häußler und Lind, 2000). Dabei mahnen sie nicht die Quantität der Aufgaben im Unterricht an, sondern ermutigen zu einem phantasievolleren Umgang

mit ihnen. Die Kritik an der Aufgabenkultur im Physikunterricht wird von der Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) in ihrem Gutachten zur Vorbereitung des Programms „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“ (Bund-Länder Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK), 1997, S. 85) in folgenden Punkten formuliert:

- Die Unterrichtsführung sei bisher überwiegend auf die Erarbeitung einer Lösung, die Beherrschung eines Algorithmus oder die Automatisierung einer Routine angelegt. Um zu einer größeren methodischen Variabilität zu kommen, sollten Aufgabentypen entwickelt und erprobt werden, die mehrere Vorgehensweisen und unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten zulassen oder geradezu anbieten.
- Die bisher gängige Übungspraxis sollte überdacht werden. Abwechslungsreiche Kontexte könnten dem Üben Reiz und Bedeutung geben und zur Konsolidierung des Wissens beitragen. Zusätzliche Strukturveränderungen in den Aufgaben würden anspruchsvolle Denk- und Übertragungsprobleme schaffen, die Wissen flexibilisieren.
- Bislang sei es noch nicht befriedigend gelungen, systematisches Wiederholen auch länger zurückliegender Stoffe so in den Unterricht zu integrieren, dass es sich harmonisch in die Erarbeitung, Konsolidierung und Übung des Stoffs einfügt. Ursachen seien u.a. die relativ geringe Vernetztheit der Themen und Stoffe untereinander und Leistungsnachweise, in denen im Wesentlichen nur der jüngst durchgenommene Stoff geprüft wird.

Der herkömmliche Einsatz von Aufgaben im Physikunterricht beschränkt sich meist auf Einsetzaufgaben zur Wiederholung des Unterrichtsinhalts. Dabei ist einerseits zu kritisieren, dass Aufgaben in weit mehr Unterrichtsphasen als nur der Wiederholung einzusetzen sind und dass der Aufgabentyp Einsetzaufgaben sehr wenig zum physikalischen Verständnis beiträgt. Wie Häußler und Lind weiter ausführen, sind solche Aufgaben mit den Lösungsstrategien der „Rückwärtssuche“ und dem Vergleich mit anderen Aufgaben lösbar. Bei der „Rückwärtssuche“ besteht die größte Hürde darin, die gegebenen und die gesuchten Größen

dem Aufgabentext zu entnehmen und eine Formel (durch Rückwärtsblättern der Unterlagen) zu finden, die die entsprechenden Größen miteinander verknüpft. Der Rest ist dann Umstellen und Einsetzen. Über das physikalische Problem braucht man dabei nicht nachzudenken und bei komplexeren Aufgaben versagt diese Methode. Desweiteren wird versucht, eine schon gelöste Aufgabe zu finden, die der zu lösenden Aufgaben ähnlich ist. Findet sich eine solche, so werden die Lösungsschritte analog durchgeführt. Dabei wird ebensowenig Physik vertieft, wie bei der „Rückwärtssuche“. Außerdem sind die so gewonnenen Lösungen nicht selten falsch.

Aus diesen Überlegungen folgt der deutliche Appell an die Didaktik der Physik, sich über eine verbesserte Aufgabekultur Gedanken zu machen. Dazu sind in den letzten Jahren zahlreiche Publikationen verfasst worden. Der wahrscheinlich meist genannte Verbesserungsvorschlag war der Einsatz von sogenannten Fermi-Aufgaben. Dieser Vorschlag wird im nächsten Abschnitt erläutert.

4.2.2 Fermiaufgaben als Vorschlag zur Verbesserung der Aufgabekultur

Rainer Müller hat in seinem Artikel „Fermiprobleme als Beitrag zu einer neuen Aufgabekultur“ (Müller, 2001) die eben angeführte Kritik an der gängigen Aufgabekultur aufgegriffen und schlägt vor, Fermi-Aufgaben¹⁰ als attraktive Ergänzung zu den herkömmlichen Aufgabentypen im Physikunterricht aufzufassen. Mit Fermi-Aufgaben sind realitätsbezogene, herausfordernde Aufgaben gemeint, die zu wenig Information für eine exakte Lösung beinhalten. Diese ist auch nicht das Ziel. Es geht dabei viel mehr um das größenordnungsmäßige Abschätzen. Dabei sind prinzipiell auch mehrere Lösungsansätze legitim. Müller sieht den Schwerpunkt beim Bearbeiten solcher Aufgaben darin, dass Schülerinnen und Schüler in richtiger Weise zum Kern des Problems vorstoßen und das Problem auf systematische Weise strukturieren und aufgliedern.

Bezüglich der Kritik an der bisherigen Aufgabekultur der BLK-Expertise (4.2.1) können folgende Vorteile der Fermi-Aufgaben genannt werden:

¹⁰Benannt ist dieser Aufgabentyp nach dem italienischen Physiker Enrico Fermi (1901-1954), der für seine geschickten Abschätzungen bekannt war.

- Durch ihre Offenheit sind Fermi-Aufgaben nicht auf eine Lösung und einen Lösungsweg versteift. Sicherlich gibt es auch bei Fermi-Aufgaben falsche Ansätze, doch können durch unterschiedliche Festlegungen und Modellierungen auch mehrere Wege als richtig angesehen werden.
- Fermi-Aufgaben umfassen die verschiedensten Zusammenhänge, daher ist die Forderung nach variierenden Kontexten erfüllt.
- Die Vernetzung mit länger zurückliegenden Inhalten und sogar anderen Fächern ist aufgrund der Komplexität der Fragestellung gegeben.

Der Einsatz von Fermi-Aufgaben ist trotz aller Vorteile aber nicht unproblematisch. Nicht nur weil die Bearbeitung in der Regel sehr zeitintensiv ist und die daraus entstehenden Diskussionen, die ja sehr fruchtbar und dadurch durchaus erwünscht sind, leicht ausufern können, sondern weil die Schülerinnen und Schüler mit diesen Aufgaben nicht selten gänzlich überfordert sind. Die Bearbeitung solcher Aufgaben setzt einen gewissen Grad an Denkfertigkeit voraus, den man mit genau diesen Aufgaben ausbilden möchte. Die didaktische Literatur lässt die Frage, wie solche Aufgaben geschickt bearbeitet werden können, meist unbeantwortet. Man baut auf Allgemeinwissen und gesunden Menschenverstand, doch wird die Frage nach fachlichem Werkzeug zum Bearbeiten solcher Aufgaben recht selten erörtert. Beim Einsatz von Fermi-Aufgaben im Unterricht wird schnell deutlich, dass Lernenden das physikalische Denken sehr schwer fällt. Das Diskutieren unter Verwendung rein physikalischer Aspekte fällt den Schülerinnen und Schülern wesentlich schwerer, als das Debattieren über eine politische oder ethische Frage. Auch im Physikunterricht sind politische oder ethische, gesellschaftliche Grundgedanken geläufiger als physikalische Leitideen. Dieser Sachverhalt wird z.B. sehr schnell deutlich, wenn die Frage nach der Energieversorgung im Physikunterricht diskutiert wird. Dass gesellschaftliche und politische Aspekte in diese Diskussion einfließen steht außer Frage, doch ist diese Debatte im Kern eine physikalische. Es ist zu beobachten, dass physikalische Denkschemata bei dieser Debatte nicht selten außen vor bleiben. Wie kann das physikalische Denken und Diskutieren gefördert werden, oder, um den Sprachgebrauch dieser Arbeit zu nutzen, wie werden physikalische Denkprinzipien vermittelt?

Diese Frage zielt im Kern auf mehr ab als nur die Vermittlung allgemeiner heuristischer Prinzipien. Es geht um eine spezifische Problemlösekompetenz, nämlich um das wissenszentrierte Problemlösen in der Physik.

4.2.3 Wissenszentriertes Problemlösen in der Physik

Zum wissenszentrierten Problemlösen in Physik haben P. Reinhold, G. Lind und G. Friege in ihrem gleichnamigen Artikel eine Übersicht über den aktuellen Forschungsstand publiziert (Reinhold u. a., 1999). Dieses Forschungsfeld unterscheidet sich von der allgemeinen Frage nach der Problemlösekompetenz, die eher in den Aufgabenbereich der Psychologie fällt. Es geht hier um das wissensbezogene Herangehen an Probleme. Die Antworten zum wissenszentrierten Problemlösen werden vor allem in der Expertise-Forschung gesucht. Dabei wird untersucht, worin genau sich der Experte vom Novizen unterscheidet.

Reinhold, Lind und Friege haben die gesammelten Erkenntnisse in einem Modell zusammengefasst (Abbildung 4.4).

Die Wissensstruktur lässt sich demnach aufteilen in das Fachwissen (Wissen über Begriffe, Gesetze etc.) einerseits und das Wissen über Beispiele andererseits. Der Novize stützt sich beim Lösen von Aufgaben eher auf das Wissen bereits bearbeiteter Aufgaben. Der Experte hingegen nutzt dabei mehr sein reiches Fachwissen, wobei er natürlich gelegentlich auch bereits gelöste Aufgaben als Muster verwendet. Sowohl das Fachwissen als auch das Wissen um Beispiele lassen sich strukturieren und zusammenfassen. Beim Fachwissen meint das die Hierarchisierung und Vernetzung der einzelnen Wissens Elemente und beim Wissen über Beispiele meint dies das Herausfiltern von immer wiederkehrenden Problemschemata. Dabei ist klar, dass der Experte dem Novizen in dieser Strukturierung um Einiges voraus ist.

Wird eine solche Wissensstruktur nun mit einem neuen Problem konfrontiert, so wird dieses zunächst durch das Fachwissen repräsentiert. Ist dann die eigentliche Fragestellung verstanden, wird ein Problemschema ausgewählt und erarbeitet. Dabei wird einerseits wieder das Fachwissen genutzt, aber auch das Wissen um bereits bearbeitete Probleme und die daraus bekannten Problemschemata sind in diesem Schritt von hoher Bedeutung. Ist dann für das neue Problem ein Pro-

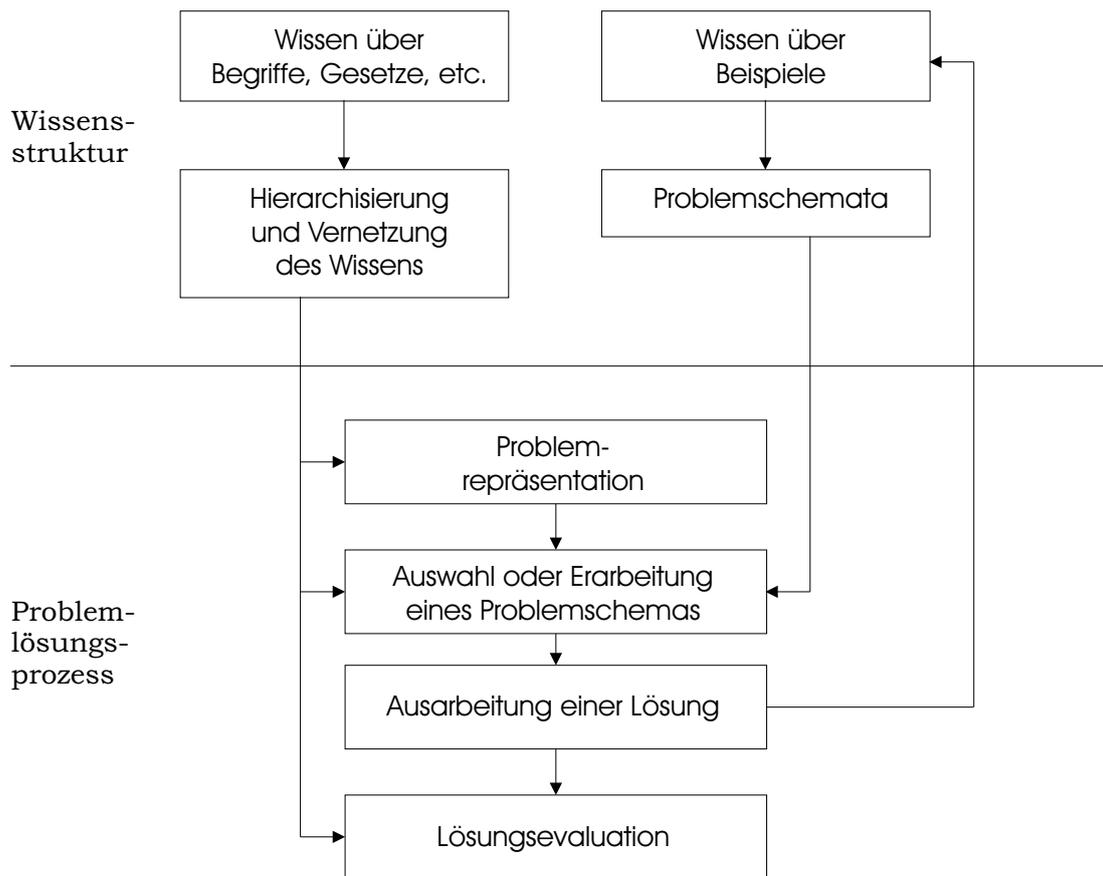


Abbildung 4.4: Ein Modell des wissenszentrierten Problemlösens (Reinhold u. a., 1999)

blemschema gefunden, so kann eine Lösung ausgearbeitet werden. Eine solche geht dann in das Repertoire des Wissens über Beispiele ein. Daraus wird deutlich, dass die Beziehung zwischen Wissensstruktur und Problemlösen wechselseitig ist. Zum Schluss wird die gewonnene Lösung noch mit dem Fachwissen evaluiert.

4.2.4 Die Erhaltung als Problemlösewerkzeug

In dem Modell zum wissenszentrierten Problemlösen kann die Erhaltung in dreierlei Weise verortet werden. Einmal ist die Erhaltung als Gesetz (z.B. als Impulserhaltungssatz, Energieerhaltungssatz der Mechanik, 1. Hauptsatz der Thermodynamik u.s.w.) Teil des Wissens im Block „Wissen über Begriffe, Gesetze, etc.“. Desweiteren „sortiert“ die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit die scheinbar unzählige Anzahl von Gesetzen zu wenigen Grundprinzipien¹¹. Durch Gesetzmäßigkeiten wie die der Erhaltung werden die einzelnen Gesetze und Begriffe miteinander verbunden. Das Verständnis der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Physik trägt folglich wesentlich zur Hierarchisierung und Vernetzung des Wissens bei. Doch die wohl wichtigste Rolle der Erhaltung beim wissenszentrierten Problemlösen ist die des Denkprinzips. Als ein solches ist die Erhaltung im Block „Problemschemata“ zu verorten. Aus den zahlreichen geschichtlichen Beispielen aus Kapitel 3 wurde bereits deutlich, wie effizient Probleme durch den Erhaltungsansatz gelöst wurden. Die Erhaltung fungiert als Denkprinzip ganz pragmatisch als Lösungswerkzeug.

Auf die Fermi-Aufgaben bezogen können wir demzufolge sagen, dass der Einsatz solcher Aufgaben erst dann Sinn macht, wenn wir unseren Schülerinnen und Schülern das entsprechende Lösungswerkzeug an die Hand geben. Die Erhaltung stellt dabei eine oft ungenutzte Möglichkeit dar. Im nächsten Abschnitt sind exemplarisch einige Aufgaben gezeigt, die die Effizienz der Erhaltung als Denkwerkzeug demonstrieren sollen. Durch den Einsatz solcher Aufgaben soll nicht nur die Problemlösekompetenz vermittelt werden, sondern auch „physikalisches Denken“. Die Schülerinnen und Schüler sollen dadurch in diversen Fragestellungen rein physikalisch abwägen lernen.

¹¹Siehe dazu Abbildung 2.2. Viele Gesetze können auf eine Gesetzmäßigkeit reduziert werden.

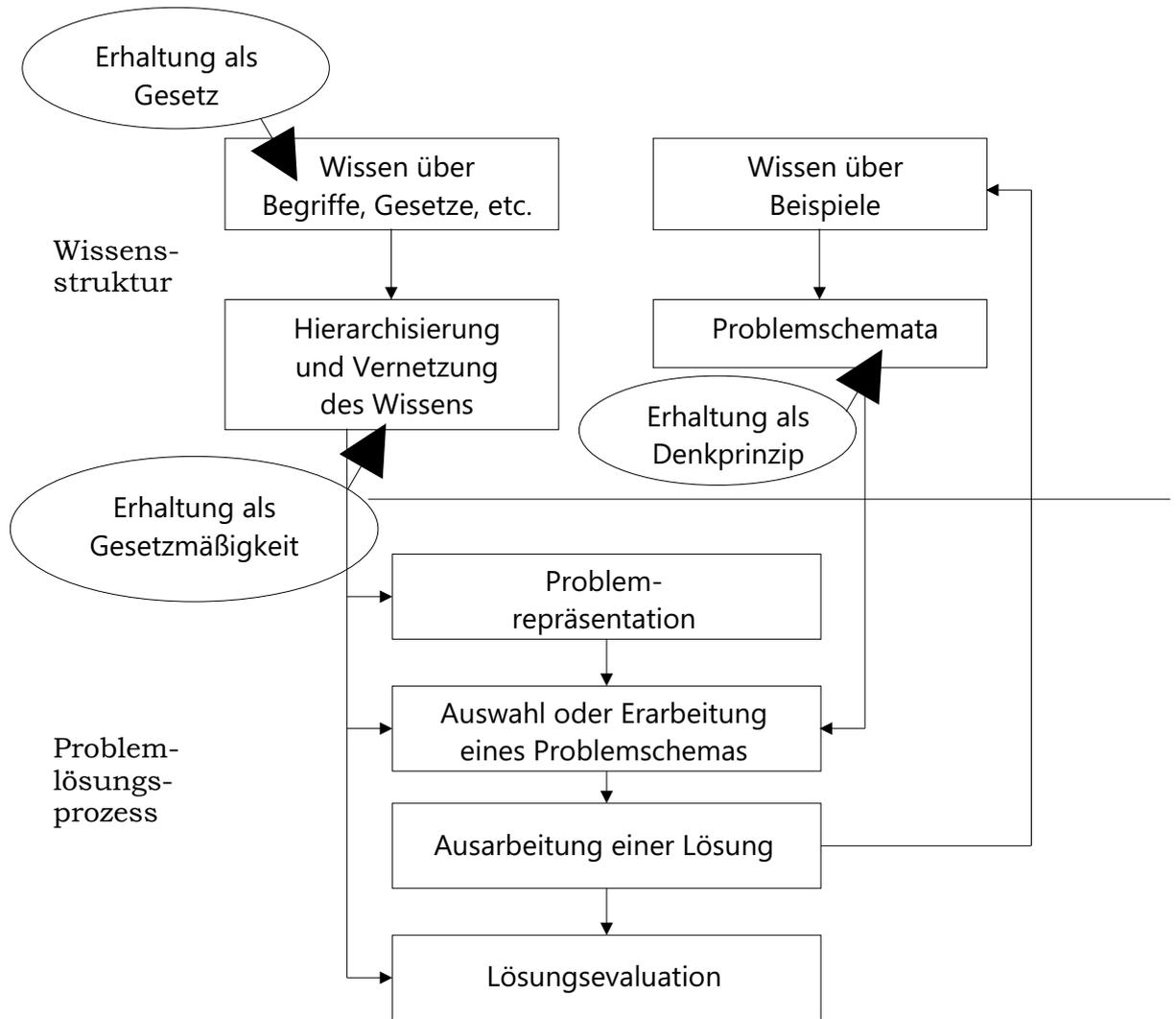


Abbildung 4.5: Die Erhaltung im Modell des wissenszentrierten Problemlösens

4.2.5 Beispiele zum Problemlösecharakter der Erhaltung als Denkprinzip

Im Folgenden wird auf einige Fragestellungen eingegangen, die im Unterricht als Fermiaufgaben aufgearbeitet werden könnten. Die Probleme sollen mit dem Erhaltungsansatz bewältigt werden.

4.2.5.1 Wieviele Sklaven waren zum Bau der Cheops-Pyramide nötig?

Die Idee dieser Aufgabe wurde dem Artikel zu Fermi-Aufgaben von R. Müller entnommen (Müller, 2001). Es soll aber in dieser Arbeit ein anderer Lösungsweg gewählt werden: Um zur Lösung zu kommen, werden die benötigte und die zur Verfügung stehende Energie bilanziert, um das Denkprinzip der Energieerhaltung zu nutzen. Bevor die Aufgabe aber richtig angegangen werden kann, muss zunächst einiges an zusätzlichen Informationen beschafft werden.

Informationen

Die ursprüngliche Höhe der Pyramide betrug 147 m und die Kantenlänge 233 m. Die Steine wurden von einem 400 m entfernten Steinbruch geholt. Den alten Ägyptern war das Rad noch nicht bekannt. Die Aufschichtung der Steine geschah, so wird allgemein angenommen, durch das Hochziehen auf einer Rampe. Es wird weiter angenommen, dass die Ägypter während der viermonatigen Überschwemmungszeit des Nils an den Pyramiden gearbeitet haben, da in dieser Zeit die landwirtschaftliche Arbeit ruhen musste, d.h. es wurde jährlich etwa 120 Tage an der Pyramide gearbeitet. Da der Pharaos Cheops etwa 23 Jahre regierte, können wir von einer Bauzeit von etwa 20 Jahren ausgehen¹². Insgesamt macht das eine Bauzeit von 2400 Tagen.

Die zur Verfügung stehende Energie

Die Energie, die beim Bau einer Pyramide entwertet wird, ist die Energie, die die Sklaven beim Arbeiten investieren. Diese entspricht, gemäß dem Denkprinzip der Erhaltung, dem, was die Arbeiter an Energie in Form von Nahrung zu sich nehmen. Eine tägliche Energiezufuhr von 3000 kcal ist eine realistische Annah-

¹²Bekanntlich wurden Pyramiden nach dem Tod des Pharaos nicht mehr weitergebaut.

me. Diese Energie wird aber größtenteils dafür verwendet, dass die Sklaven ihre Körpertemperatur halten können und ihre sonstigen Körperfunktionen damit am Laufen zu erhalten. Dieser sogenannte Grundumsatz beträgt beim Menschen etwa 2000 kcal/d. Damit bleiben zum Arbeiten etwa 1000 kcal/d. In anderen Einheiten ausgedrückt sind das pro Sklave 4187 kJ/d.

Die benötigte Energie

Die benötigte Energie setzt sich aus zwei Teilen zusammen: die Energie, die zum Transport der Steine benötigt wird und die Energie, die beim Aufschichten der Steine entwertet wurde.

Energie zum Transport der Steine Man kann die Steine als Würfel der Kantenlänge 1m annehmen. Die Anzahl der Steine ergibt sich zu $N = \frac{V_{Pyramide}}{V_{Stein}} = 2,65 \cdot 10^6$. Die Arbeit um die Steine zu transportieren ist $W_T = NFs$, wenn F die Haftreibung ist und s die Strecke vom Steinbruch bis zur Baustelle. Als Haftreibungskoeffizient wird $\mu_H = 0,3$ angenommen (Haftreibung Holz auf Stein mit Lehmfilm). Zur Ermittlung der Gewichtskraft wurde $\rho_{Stein} = 2500 \text{ kgm}^{-3}$ verwendet. Für die Arbeit W_T erhält man damit einen Wert von $W_T = 7,7616 \cdot 10^{12} \text{ J}$. Dividiert man diesen Wert durch die Anzahl der Bautage, so weiß man, wieviel Energie pro Tag zum Transport der Steine nötig war, nämlich $w_T = 3,234 \cdot 10^9 \text{ Jd}^{-1}$.

Energie zum Bau der Pyramide Um die Energie abzuschätzen, die zum Bau der Pyramide nötig war, wird die ganze Pyramide als Massepunkt modelliert. Die benötigte Energie entspricht nämlich der Energie, die benötigt wird um die Masse der Pyramide auf ihren Schwerpunkt zu heben. Bei einer Pyramide liegt der Schwerpunkt auf einem Viertel der Höhe, in unserem Fall also bei $H = 37 \text{ m}$. Damit ergibt sich die Arbeit zum Bau der Pyramide zu $W_B = N \cdot \rho_{Stein} \cdot V_{Stein} \cdot g \cdot H$. Mit den entsprechenden Werten erhält man $W_B = 2,4 \cdot 10^{12} \text{ J}$. Pro Tag ergibt das: $w_B = 10^9 \text{ Jd}^{-1}$.

Ergebnis

Pro Tag wurde $w = w_T + w_B$ benötigt. Nach den ausgeführten Überlegungen ist das $w = 4,234 \cdot 10^9 \text{ Jd}^{-1}$. Dividiert man diesen Wert durch den Leistungsumsatz eines Menschen, so erhält man die Anzahl der Arbeiter, die täglich nötig

waren. Das Ergebnis lautet damit: 1011 Sklaven pro Tag. Dieses Ergebnis scheint unrealistisch zu sein, da bei diesem Ergebnis im Mittel ein Sklave einen Stein vom Steinbruch zur Baustelle befördern müsste. So ist das Ergebnis aber nicht zu interpretieren. Es stellt vielmehr ein absolutes Minimum an Arbeitern pro Tag dar.

Nicht berücksichtigte Aspekte

Nicht berücksichtigt wurden viele nicht physikalische Aspekte, wie etwa das Ausbleiben von Arbeitern, aber auch um physikalische Gesichtspunkte könnten/müssten die Überlegungen erweitert werden. So sind sicherlich noch weit mehr Tätigkeiten angefallen, als nur der Transport und das Aufsichten. Auch die erwähnten Tätigkeiten lassen sich noch beliebig verfeinern. So könnte man beispielsweise beim Aufsichten der Steine noch die Reibung entlang der Rampe berücksichtigen oder auch die Verformungsarbeit an den Steinen im Steinbruch.

4.2.5.2 Wie weit kommt man mit einem vollgetankten Auto?

Informationen

Da die Antwort sehr vom konkreten Auto abhängt, wurde hier exemplarisch ein Golf IV TDI angenommen. Die Stirnfläche dieses Autos ist $2,11 \text{ m}^2$ und der c_w -Wert beträgt $0,31$. Ein Golf IV hat einen Tankinhalt von 55 l . Die Masse dieses Fahrzeugs beträgt 1350 kg .

Die zur Verfügung stehende Energie

Zur Verfügung steht die Energie, die in einem vollen Tank gespeichert ist. Um diese zu bestimmen, benötigt man die Energiedichte von Diesel. Diese wird meist in J/kg angegeben und beträgt bei Diesel $4,54 \cdot 10^7 \text{ J/kg}$. Um auf die Einheit Jm^{-3} zu kommen, müssen wir die Energiedichte mit der Massendichte von Diesel multiplizieren. Diese beträgt 820 kgm^{-3} . Damit hat Diesel eine auf das Volumen bezogene Energiedichte von $3,72 \cdot 10^{10} \text{ Jm}^{-3}$. In 55 l Diesel sind damit circa $E = 2,05 \cdot 10^9 \text{ J}$. Diese Energie kann leider nicht gänzlich in Bewegungsenergie des Autos umgesetzt werden. Zu berücksichtigen ist der Wirkungsgrad eines Dieselmotors. Dieser beträgt etwa $0,5$. Damit ergibt sich an zur Verfügung stehender Energie etwa 10^9 J

Die benötigte Energie

Um eine Obergrenze abschätzen zu können, wird angenommen, dass nur einmal auf 100 km/h beschleunigt wird und man dann mit diesem Tempo ohne Überwindung von Höhendifferenzen seinen Tank leer fährt. Dabei setzt sich der Energieaufwand aus drei Teilen zusammen: Die Energie zur Beschleunigung, die Energie zum Überwinden des Roll- und des Luftwiderstandes.

Beschleunigung Die Energie zur Beschleunigung ergibt sich zu $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1350kg}{2} \cdot (27m/s)^2 = 492075 \text{ J}$.

Luftwiderstand Der Energieaufwand zur Überwindung des Luftwiderstands entspricht der Kraft zur Überwindung des Strömungswiderstands über die komplette Reichweite d . Damit gilt: $E_L = F_L \cdot d = \frac{1}{2}\rho_{Luft}c_wAv^2 \cdot d$. Setzt man die entsprechenden Werte ein, so erhält man: $E_L = 307 \text{ [N]} \cdot d$

Rollwiderstand Der Energieaufwand zur Überwindung des Rollwiderstands ergibt sich analog zum Luftwiderstand aus dem Aufbringen der Kraft zur Überwindung des Rollwiderstands multipliziert mit der Reichweite d . Es gilt dabei: $E_R = F_R \cdot d = F_G \cdot c_R \cdot d$. Dabei ist der Rollreibungskoeffizient (Autoreifen auf Asphalt) $c_R = 0,011$. Daraus ergibt sich $E_R = 145 \text{ [N]} \cdot d$.

Ergebnis

Insgesamt ist also folgender Energieaufwand nötig: $E = E_{kin} + E_L + E_R = E_{kin} + (F_L + F_R) \cdot d$. Für die Reichweite d ergibt sich daraus: $d = \frac{E - E_{kin}}{F_L + F_R}$. Setzt man die Zahlenwerte ein, so erhält man $d = 2211300 \text{ m} = 2211,3 \text{ km}$.

Nicht berücksichtigte Aspekte

Dieses Ergebnis mutet zu hoch an, doch muss es als absolute Obergrenze interpretiert werden. Der wahre Wert ist natürlich geringer. Diesem kann man sich durch weitere Überlegungen nähern. Dazu wäre Folgendes zu überlegen:

Die Annahme, dass keine Höhendifferenz überwunden wurde, scheint zunächst unrealistisch. Gemittelt lässt sich diese Annahme aber halten. Weit gravierender ist der Fehler in der Annahme, dass nur einmal auf 100 km/h beschleunigt wurde. Aus dem Verkehrsalltag weiß man, dass Autofahren ein ständiges Bremsen und

Beschleunigen ist. An dieser Stelle kann man den Schülerinnen und Schülern gut deutlich machen, warum man im Stadtverkehr mehr verbraucht, als bei Überlandfahrten. Ein weiterer unberücksichtigter Aspekt ist die Energieentwertung weiterer Apparate im Auto, wie etwa die Heizung, Radio usw.. Es wurde auch nur der Wirkungsgrad des Motors berücksichtigt nicht aber der des Getriebes.

4.2.5.3 Wie tief ist ein Krater, den ein Meteorit beim Aufprall auf einen Planeten schlägt?

Informationen

Meteoriten haben üblicherweise eine Geschwindigkeit von circa 42 km/s . Das Bestimmen der Kratertiefe auf der Erde ist nicht ganz so einfach (vgl. Schwarz, 2009). Zur Vereinfachung wird die Kratertiefe beim Aufprall auf den Jupitermond Europa angenommen, da dieser eine sehr dicke Eisschicht hat. Die durchschnittliche Temperatur auf Europa beträgt $\bar{T} = 150 \text{ K}$. Da Europa eine Bahngeschwindigkeit von 15 km/s hat, ist zwischen Europa und einem Meteoriten eine relative Geschwindigkeit von $v = 57 \text{ km/s}$ möglich. Im Anschluss kann man sich Gedanken darüber machen, was bei einem Aufschlag auf der Erde anders wäre.

Die Ausgangsenergie

Die Ausgangsenergie ist die kinetische Energie des Meteoriten $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$.

Die umgewandelte Energie

Beim Aufprall des Meteoriten wird das Eis erwärmt und verdampft. Dabei ist Energie zur Erwärmung von $\bar{T} = 150 \text{ K}$ auf 373 K nötig und zusätzlich noch die Schmelz- und Verdampfungsenergie. Aufgrund der Energieerhaltung wird die kinetische Energie in folgender Weise umgewandelt: $E_{kin} = Q + Q_{schmelz} + Q_{verdampf}$. Wenn m die Masse des Meteoriten ist und M die Masse des verdampften Eises, so gilt: $\frac{1}{2}mv^2 = M(c_{Eis}(T_{schmelz} - \bar{T}) + c_w(T_{siede} - T_{schmelz}) + q_s + q_v)$. Mit den entsprechenden Werten für Wasser ($c_{Eis} = 2060 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $c_w = 4190 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $q_s = 330000 \text{ Jkg}^{-1}$, $q_v = 2200000 \text{ Jkg}^{-1}$) ergibt sich das Massenverhältnis zu $\frac{M}{m} \approx 507$, d.h. der Meteorit verdampft ungefähr das 507 -fache seiner Masse.

Ergebnis

Geht man nun von der Gleichung des Massenverhältnisses aus und idealisiert den Meteoriten als Kugel und den Krater als Halbkugel, so gilt: $507 \cdot \frac{4}{3}\pi R_{Meteorit}^3 \cdot \rho_{Meteorit} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3}\pi R_{Krater}^3 \cdot \rho_{Krater}$. Geht man von einem gesteinsartigen Meteoriten aus, so gilt: $\frac{\rho_{Meteorit}}{\rho_{Eis}} = 3$. Damit ergibt sich für die Radien: $R_{Krater} \approx 14,5 \cdot R_{Meteorit}$. Der Radius des Kraters ist demnach 14,5 mal größer, als der Radius des Meteoriten.

Weitere Diskussionspunkte

Bei der Diskussion darüber, was bei einem Aufprall auf der Erde anders wäre, könnten folgende Punkte genannt werden:

- Die Erde hat eine höhere Bahngeschwindigkeit. Die kinetische Energie wäre also (relativ gesehen) höher.
- Die Erde hat eine Atmosphäre. Diese würde kleine Meteoriten vor dem Aufprall abbremsen oder sogar gänzlich verglühen lassen.
- Für die Erde gelten (beim Aufprall auf Festland) andere thermodynamische Werte. Man müsste die spezifische Wärmekapazität von Stein nehmen usw. Dabei lässt sich auch die Frage diskutieren, ob die Annahme, das alles verdampft wird, realistisch ist. Ein Teil könnte einfach zersplittern, pulverisieren und weggeschleudert werden.

4.2.5.4 Ist das Szenario aus dem Film „Amageddon“ (1999) realistisch ?

Informationen

Die Story des Films könnte wie folgt beschrieben werden: Ein Asteroid, der so groß wie Texas ist, wird in 18 Tagen auf der Erde aufschlagen. Die einzige Rettung wäre ihn zu sprengen, sodass die Teile an der Erde vorbeifliegen. Diese Sprengung müsste nach Expertenmeinung spätestens 3 h und 37 min vor der Kollision erfolgen.

Ist diese Story physikalisch haltbar?

Zur Berechnung wird die absolut optimistische Annahme gemacht, dass der Asteroid durch die Sprengung in zwei gleichgroße Teile bricht. Die Energie der Bombe würde dann in kinetische Energie der Asteroiden umgewandelt werden, die sich

auf beide Teile gleich verteilt (vgl. Müller, 2010). Formal ausgedrückt bedeutet das: $E_{nuk} = \frac{1}{2}m(v_1^2 + v_2^2)$, wenn m die Masse des Asteroiden ist und v_1 und v_2 jeweils die Geschwindigkeit der Asteroidenteile sind. Da $v = v_1 = v_2$ ist, gilt: $E_{nuk} = \frac{1}{2}mv^2$. Für die Geschwindigkeit der Teile kann man sagen: $v = \sqrt{\frac{2E_{nuk}}{m}}$. Nähert man den Asteroiden als Kugel mit dem Radius $R = 1000 \text{ km}$ und der Dichte von Stein $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$, so hat der Asteroid eine Masse von circa $m = 3 \cdot 10^{20} \text{ kg}$. Für die Bombe nehmen wir die stärkste jemals gezündete Bombe an. Diese Wasserstoffbombe hatte eine Sprengkraft von 50 Mega-Tonnen TNT-Äquivalent. In Joule ausgedrückt ist das $E_{nuk} = 2 \cdot 10^{17} \text{ J}$. Setzt man diese Werte ein, um die Geschwindigkeit zu bestimmen, so erhält man $v = 3,7 \text{ cm/s}$. Unter der optimistischen Annahme, dass diese senkrecht zur ursprünglichen Bahn des Asteroiden steht, würden die Teile in dem besagten Zeitraum von 3 h und 37 min um eine Strecke von 480 m abweichen. Dieser Wert ist viel kleiner als der Erdradius, sodass beide Teile doch noch genau auf der Erde einschlagen würden.

Nicht berücksichtigte Aspekte

Die Annahme, dass der Asteroid nur in zwei Teile bricht ist absolut unrealistisch. Realistischer wäre ein Zerbersten in viele Einzelteile.

4.2.5.5 Kann sich Nordkorea im Falle eines totalen Wirtschaftsembargos selbst versorgen?

Da diese Aufgabe auch einen politischen Hintergrund hat, könnte sie mit folgendem (zwar nicht ganz aktuellen, aber dennoch interessanten) Zeitungsausschnitt motiviert werden:

„Im Oktober 2006 schockiert Nordkorea die Welt mit der Nachricht von einem Atomtest. Der Sicherheitsrat der Vereinten Nationen reagiert am 14. Oktober mit der Resolution 1718 (2006) und beschließt Embargomaßnahmen.“

Es ist zwar nie zu einem totalen Wirtschaftsembargo gekommen, doch könnte man sich die Frage stellen, ob Nordkorea sich im Falle eines totalen Wirtschaftsembargos selbst versorgen könnte.

Informationen

In Korea leben 23 Millionen Menschen. Aus Satellitenbildern kann man entnehmen, dass der Winter dort recht frostig ausfallen kann. Um die Menschen am Leben zu erhalten, müssten sie ausreichend zu essen haben und im Winter etwas zum Heizen - eine Minimalanforderung für die folgende Schätzung.

Die zur Verfügung stehende Energie

Langfristig kann man nicht mit den Ressourcen des Landes rechnen. Für ein dauerhaftes Überleben müsste Energie von außen kommen. Man kann Nordkorea zwar die Grenzen abschotten, was man ihnen aber nicht nehmen kann, ist der Sonnenschein. Als einziger Energieinput wäre langfristig also nur die Sonneneinstrahlung zu sehen. Diese beträgt pro Quadratmeter pro Jahr $1500 \text{ kWhm}^{-2}\text{a}^{-1}$. Multipliziert man diesen Wert mit dem Wirkungsgrad der Photosynthese (0,01-0,001), so hat man einen Wert dafür, wieviel Energie pro Quadratmeter pro Jahr in der Vegetation gespeichert wird, nämlich: $7,5 \text{ kWhm}^{-2}\text{a}^{-1}$. Aufgrund des eisigen Winters muss dieser Wert mit dem Faktor $7/12$ entsprechend der Vegetationsperiode nach unten korrigiert werden. Damit erhält man einen Wert von $4,37 \text{ kWhm}^{-2}\text{a}^{-1}$. Auf die nutzbare Fläche hochgerechnet kann man sagen, dass Nordkorea $1,4 \cdot 10^{11} \text{ kWh/a}$ zur Verfügung stehen.

Die benötigte Energie

Die benötigte Energie ergibt sich aus dem Produkt der Bevölkerungszahl und dem Grundumsatz des Menschen. Dieser beträgt etwa 60 W . Damit werden $1,4 \cdot 10^9 \text{ W}$ nötig, oder anders ausgedrückt $1,2 \cdot 10^{10} \text{ kWh/a}$.

Berechnet man dann noch, was an Energie zum Heizen benötigt wird, so kann man als Minimum annehmen, dass sich sechs Personen im Winter (5 Monate im Jahr, 12 Stunden am Tag) um einen kleinen Heizofen mit der Leistung von 2 kW scharen. Allein dafür wird eine Energie von $4,56 \cdot 10^{11} \text{ kWh/a}$ benötigt.

Ergebnisdiskussion

Die zur Verfügung stehende Energie würde ausreichen, um die 23 Millionen Menschen zu ernähren. Dabei wurde nur der Grundumsatz berücksichtigt. Wenn die Menschen mehr essen, um arbeiten zu können, könnte die zur Verfügung stehende Energie schnell an ihre Grenzen stoßen.

Spätestens aber, wenn man die Energie zum Heizen im Winter berücksichtigt, führt das zur Erkenntnis, dass es den Leuten in Nordkorea im Falle eines totalen Wirtschaftsembargos ziemlich schlecht gehen würde.

Auf dieser Aufgabe aufbauend kann mit den Schülerinnen und Schülern über die Problematik politischer Embargomaßnahmen diskutiert werden.

4.2.5.6 Schlussfolgerung aus den Beispielen zur Nutzung der Erhaltung als Denkprinzip

Aus diesen Aufgaben ergibt sich zum einen, dass sich der Erhaltungsansatz lange nicht nur bei mechanischen Fragestellungen als zielführend erweist, sondern auch in allen anderen Teilgebieten von großer Wichtigkeit ist. Aufgrund der Allgemeingültigkeit stellt sich der Erhaltungsaspekt bei vielen physikalischen Problembehandlungen als zweckmäßig heraus.

Desweiteren wird aus den betrachteten Abschätzungen deutlich, dass die Bilanzierung entsprechender Erhaltungsgrößen oft sehr schnell und einfach zu einer ersten Näherung führen kann. Komplizierte Sachverhalte können in physikalisch korrekter Weise so auf wenige reduziert werden.

Kapitel 5

Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

5.1 Allgemeines zur Schulbuchanalyse und die Zielsetzung in dieser Arbeit

Nachdem nun auf die Bedeutung der Erhaltung in der Physik aus fachlicher Sicht eingegangen wurde und daraus didaktische Möglichkeiten für den Physikunterricht formuliert wurden, soll nun ein Blick in die Unterrichtspraxis geworfen werden. Dabei soll aufgezeigt werden, wie die didaktischen Möglichkeiten der Erhaltung im Unterricht umgesetzt werden. Der Verfasser ist sich im Klaren darüber, dass auf die Frage nach der schulpraktischen Umsetzung im Rahmen einer solchen Arbeit nicht umfassend eingegangen werden kann¹, doch soll als erstes Herantasten an die Antwort auf diese Frage eine Schulbuchanalyse vorgestellt werden.

Die Schulbuchforschung ist ein relativ junges Forschungsfeld, das aber zunehmend als Untersuchungsinstrument eingesetzt wird. Zur Methodik der Schulbuchforschung sind dementsprechend in den letzten Jahren einige Werke erschienen². Speziell in der Physikdidaktik wurde die Schulbuchanalyse zunehmend zur For-

¹Zur genauen Untersuchung der Rolle der Erhaltung im Schulunterricht sind quantitative Methoden nötig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht umzusetzen sind.

²So etwa „Schulbuchforschung als Unterrichtsforschung“ von Martin Rauch und Ekkehard Wurster (Rauch und Wurster, 1997) oder „Schulbuchforschung - Ein Beitrag zur Schulentwicklung“ von Josef Thonhauser (Thonhauser, 1999).

schungsmethode³.

Die Schulbuchforschung lässt sich grob in drei Typen einteilen (vgl. Bacher, 2003, S. 110):

1. Die prozessorientierte Schulbuchforschung, die die Entwicklung eines Schulbuchs durch den Autor und Verlag analysiert.
2. Die produktorientierte Schulbuchforschung, die das Schulbuch als fertiges Produkt in der Funktion eines Unterrichtsmediums untersucht.
3. Die wirkungsorientierte Schulbuchforschung, die die Wirkung des Buches auf Lehrer und Schüler beschreiben möchte.

Die folgende Analyse beschränkt sich auf die produktorientierte Schulbuchforschung. Diese wiederum lässt sich noch folgendermaßen unterteilen:

- Totalanalyse versus Partialanalyse
- Bestandsanalyse versus Defizitanalyse
- qualitative versus quantitative Analyse

Die vorliegende Analyse ist eine qualitative Partialanalyse, da die Schulbücher nur auf ein bestimmtes Merkmal hin geprüft werden. Dabei wird der Bestand und nicht die Defizite in den Schulbüchern untersucht.

5.2 Die verwendete Methode

Die vorliegende Analyse orientiert sich an der strukturierenden Inhaltsanalyse (StIA), wie sie P. Mayring in seinem Werk zur Qualitativen Inhaltsanalyse (Mayring, 2008) vorgestellt hat. Dieses Verfahren hat zum Ziel, aus dem analysierten Inhalt durch ein theoriegeleitetes Kategoriensystem eine Struktur herauszufiltern. Dabei misst Mayring folgenden Punkten besondere Wichtigkeit bei (Mayring, 2008, S. 92):

- Die grundsätzlichen Strukturdimensionen müssen genau bestimmt werden, sie müssen der Fragestellung abgeleitet und theoretisch begründet werden.

³So z.B. in der Dissertation von Artraud Bacher (Bacher, 2003).

- Diese Strukturdimensionen werden dann zumeist weiter differenziert, indem sie in einzelne Ausprägungen aufgespalten werden. Die Dimensionen und Ausprägungen werden dann zu einem Kategoriensystem zusammengestellt.
- Wann nun ein Materialbestandteil unter eine Kategorie fällt, muss genau festgelegt werden. Dabei hat sich ein Verfahren bewährt, das in drei Schritten vorgeht:
 1. Definition der Kategorien
Es wird genau definiert, welche Textbestandteile unter eine Kategorie fallen.
 2. Ankerbeispiele
Es werden konkrete Textstellen angeführt, die unter eine Kategorie fallen und als Beispiele für diese Kategorie gelten sollen.
 3. Kodierregel
Es werden dort, wo Abgrenzungsprobleme zwischen Kategorien bestehen, Regeln formuliert, um eindeutige Zuordnungen zu ermöglichen.

Daraus ergibt sich für die StIA folgende Schrittabfolge:

1. Schritt der StIA:

Der erste Schritt der StIA besteht darin, die Analyseeinheit genau festzulegen. Das meint, dass genau festgelegt werden muss, wie lang eine Textstelle mindestens sein muss, um in die Wertung aufgenommen zu werden (Kodiereinheit). Desweiteren muss festgelegt werden, wie lang eine Textstelle höchstens sein darf, um lediglich als eine Fundstelle zu gelten (Kontexteinheit). Außerdem muss der Ablauf der Analyse festgelegt werden (wenn z.B. mehrere Schulbücher analysiert werden, ist festzusetzen, ob die Schulbücher nacheinander untersucht werden, oder ob analoge Fundstellen aus allen Schulbüchern nacheinander ausgewertet werden).

2. Schritt der StIA:

Der zweite Schritt der StIA beinhaltet die theoriegeleitete Festlegung der Strukturdimension. Es gibt folgende vier Formen (Dimensionen) der strukturierenden Inhaltsanalyse (Mayring, 2008, S. 94):

- Eine formale Strukturierung soll die innere Struktur des Materials nach bestimmten formalen Strukturierungsgesichtspunkten herausfiltern.
- Eine inhaltliche Strukturierung soll Material zu bestimmten Themen, zu bestimmten Inhaltsbereichen extrahieren und zusammenfassen.
- Eine typisierende Strukturierung soll auf einer Typisierungsdimension einzelne markante Ausprägungen im Material finden und diese genauer beschreiben.
- Eine skalierende Strukturierung soll zu einzelnen Dimensionen Ausprägungen in Form von Skalenpunkten definieren und das Material daraufhin einschätzen.

3. Schritt der StIA:

Die in Schritt 2 festgelegten inhaltlichen Hauptkategorien werden hier in Unterkategorien unterteilt.

4. Schritt der StIA:

An dieser Stelle werden konkrete Definitionen, Ankerbeispiele und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien festgelegt.

5. Schritt der StIA:

In diesem Schritt beginnt nun der Materialdurchlauf in Form eines groben Durchgangs, bei dem die Fundstellen markiert werden.

6. Schritt der StIA:

Hier wird das Material genauer durchgesehen und die Fundstellen den Unterkategorien zugeordnet.

7. Schritt der StIA:

Wenn in den Materialdurchläufen (Schritt 5 und 6) Mängel in den Unterkategorien und Kodierregeln festgestellt werden, müssen diese revidiert und die Schritte 3 bis 6 erneut durchlaufen werden.

8. Schritt der StIA:

Abschließend wird das Ergebnis der StIA aufbereitet.

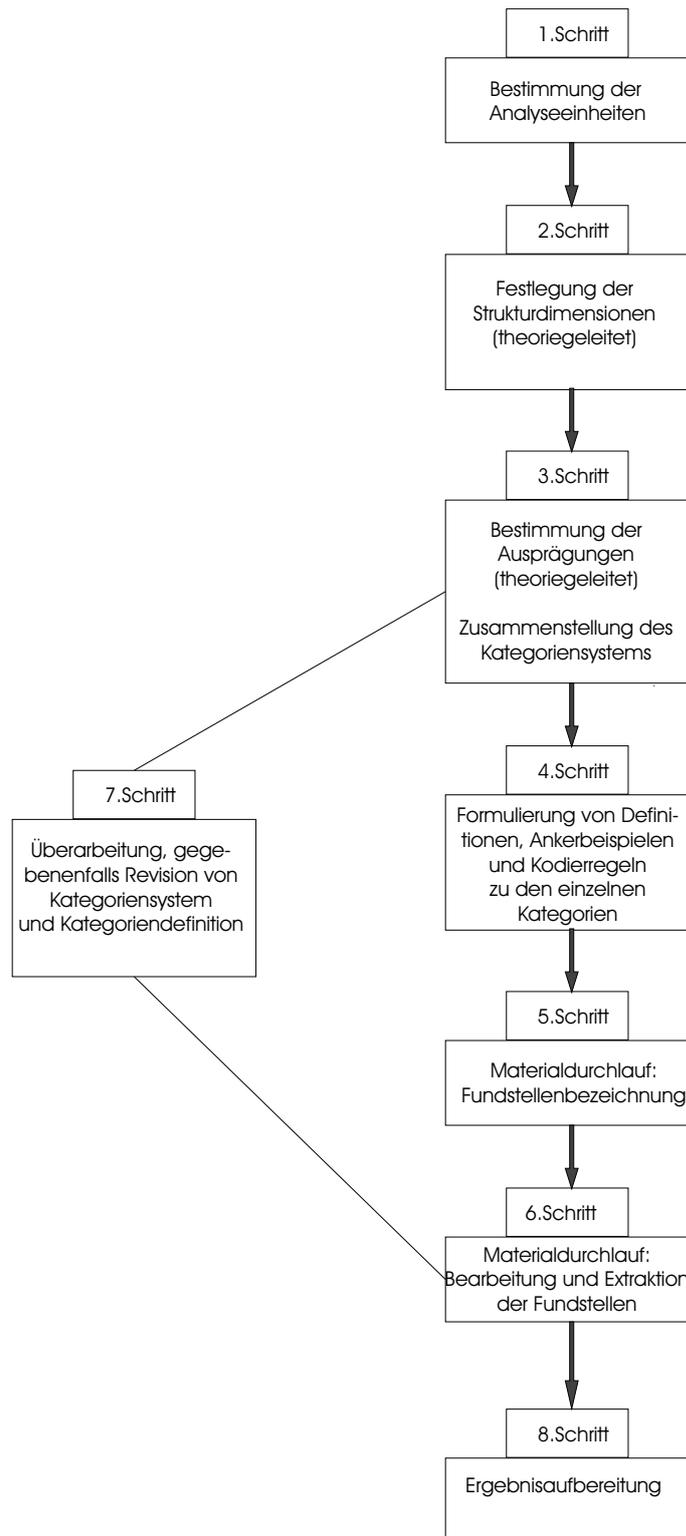


Abbildung 5.1: Ablaufplan der strukturierenden Inhaltsanalyse (Mayring, 2008, S. 93)

5.3 Analyse der Schulbücher

5.3.1 Auswahl der Schulbücher

Für die Analyse wurden exemplarisch sechs gängige Gesamtbände für die gymnasiale Oberstufe ausgewählt. Konkret sind dies:

- Metzler Physik vom Schroedel Verlag (Grehn und Krause, 2009a)
 - Erscheinungsjahr: 2009
 - Umfang: 569 Seiten
 - Inhaltlicher Aufbau des Schulbuchs
Die Kapitel des Schulbuchs sind: Mechanik; Gravitation; Mechanische Schwingungen und Wellen; Thermodynamik; Elektrische Ladungen und elektrisches Feld; Bewegte Ladungsträger und magnetisches Feld; Elektromagnetische Schwingungen und Wellen; Chaotische Vorgänge; Die spezielle Relativitätstheorie; Einführung in die Quantenphysik; Atomphysik; Festkörperphysik und Elektronik; Kernphysik; Elementarteilchenphysik; Astrophysik; Physik und Wissenschaftstheorie.
- Impulse Physik vom Klett Verlag (Bredthauer, 2010)
 - Erscheinungsjahr: 2010
 - Umfang: 369 Seiten
 - Inhaltlicher Aufbau des Schulbuchs
Die Kapitel des Schulbuchs sind: Beschreiben von Bewegungen; Ursache von Bewegungen; Erhaltungssätze; Gravitationsfeld; Elektrisches Feld; Magnetisches Feld; Induktion; Wellen; Wellenmodell des Lichts; Quantenobjekte; Atomphysik; Kernphysik; Thermodynamik; Relativitätstheorie.
- Physik Oberstufe Gesamtband vom Cornelsen Verlag (Diehl, 2008)
 - Erscheinungsjahr: 2008

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- Umfang: 546 Seiten
- Inhaltlicher Aufbau des Schulbuchs
Die Kapitel des Schulbuchs sind: Einfache Bewegungen; Dynamik; Kreis- und Drehbewegungen; Gravitation; Elektrische und magnetische Felder; Induktion und Leitungsvorgänge; Schwingungen; Wellen; Licht; Quantenphysik; Atome; Kerne und Elementarteilchen; Relativitätstheorie; Astrophysik; Thermodynamik.
- Kuhn Physik 2 vom Westermann Verlag (Bang und Kuhn, 2001)
 - Erscheinungsjahr: 2001
 - Umfang: 387 Seiten
 - Inhaltlicher Aufbau des Schulbuchs
Die Kapitel des Schulbuchs sind: Elemente der Mechanik; Mechanische Schwingungen und Wellen; Elemente der Thermodynamik; Elektrizitätslehre; Elektromagnetische Schwingungen und Wellen; Relativität; Quanten und Atome; Kernphysik und Ausblick.
- Physik vom Duden Paetec Verlag (Meyer und Hoche, 2003)
 - Erscheinungsjahr: 2008
 - Umfang: 558 Seiten
 - Inhaltlicher Aufbau des Schulbuchs
Die Kapitel des Schulbuchs sind: Die Physik - Eine Naturwissenschaft; Mechanik; Thermodynamik; Elektrizitätslehre und Magnetismus; Optik; Quantenphysik; Atom- und Kernphysik; Spezielle Relativitätstheorie; Ausblick und weitere Teilgebiete der Physik.
- Dorn Bader Physik vom Schroedel Verlag (Bader und Dorn, 2010a)
 - Erscheinungsjahr: 2010
 - Umfang: 474 Seiten
 - Inhaltlicher Aufbau des Schulbuchs
Die Kapitel des Schulbuchs sind: Elektrisches Feld; Magnetfeld und

Teilchen in Feldern; Induktion; Schwingungen; Wellen; Interferenzphänomene; Strahlungsphysik und Klima; Relativitätstheorie; Quanten, Atome, Festkörper; Thermodynamik und Entropie; Kernphysik; Weiterführende Themen; Mechanik und Mathematik.

- Bemerkung: In diesem Buch wurde die Mechanik nicht als gesondertes Thema behandelt.

5.3.2 Bestimmung der Analyseeinheit (1.Schritt der StIA)

Als Kodiereinheit wird das explizite wie auch das implizite Erwähnen einer Erhaltung im physikalischen Sinne definiert. Als Kontexteinheit wird ein gesamter inhaltlich zusammenhängender Text mit zugehörigen Bildern, Beispielen und Aufgaben festgelegt.

Die Schulbücher werden nacheinander ausgewertet.

5.3.3 Bestimmung der Hauptkategorien und Kategorien (2.und 3.Schritt der StIA)

Bei der vorliegenden Untersuchung handelt es sich um eine typisierende Strukturierung. Die Erwähnungen der Erhaltung in den Schulbüchern sollen entsprechend der Begriffe aus Kapitel 2.2 differenziert werden. Desweiteren soll unterschieden werden, ob die Fundstelle in einem ganz allgemeinen Kontext, in der Mechanik, in der Elektrodynamik, der Thermodynamik, der Astronomie oder der modernen Physik erwähnt werden.

Es gilt die Erwähnungen der Erhaltung im Material als markante Stellen folgenden Typen zuzuordnen (siehe dazu das Kapitel 2.2):

- (G) Erwähnung der Erhaltung als Gesetz
- (GM) Erwähnung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit
- (DP) Erwähnung der Erhaltung als Denkprinzip

Diesen Hauptkategorien sind nun folgende Kategorien zuzuordnen:

Als Gesetz kann die Erhaltung wie folgt erwähnt werden:

- Energieerhaltungssatz allgemein formuliert
- Massenerhaltungssatz allgemein formuliert
- Energieerhaltungssatz der Mechanik: Die Summe aus potentieller und kinetischer Energie ist konstant.
- Impulserhaltungssatz
- Drehimpulserhaltungssatz
- Schwerpunkterhaltung
- Ladungserhaltungssatz allgemein formuliert
- Energieerhaltungssatz der Elektrodynamik: Poyntingscher Satz
- Energieerhaltungssatz der Thermodynamik: 1. HS

Eine Erwähnung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit wird in dieser Analyse dann als gegeben gesehen, wenn die Erhaltung in impliziter Form als allgemeingültige Rahmenbedingung oder allgemeine Grundlage anderer speziellerer Gesetze erwähnt wird. Solche Erwähnungen könnten in einer der folgenden Formen geschehen:

- Reibung und Energieerhaltung
- Energie- und Impulserhaltung als Grundlage von Stoßprozessen
- Energieerhaltung beim Pendel
- Die Unmöglichkeit eines perpetuum mobile
- Drehimpulserhaltung beim Kreisel
- Anwendungen des Drehimpulserhaltungssatzes
- Massenerhaltung als grundlegendes Prinzip bei chemischen Reaktionen
- Anwendungen des Impulserhaltungssatzes
- Energieerhaltung beim harmonischen Oszillator

- Energieerhaltung im Interferenzbild
- Energieerhaltung bei Resonatorfluoreszenz
- Drehimpulserhaltungssatz als Grundlage des zweiten keplerschen Gesetzes
- Drehimpulserhaltung bei der Sternentstehung
- Impulserhaltung beim Raketenantrieb
- Energieerhaltung zur Festsetzung von Satellitenbahnen
- Kirchhoffsche Maschenregel als Anwendung der Energieerhaltung
- Kirchhoffsche Knotenregel als Anwendung der Ladungserhaltung
- Energieerhaltung als Grundlage der lenzschen Regel
- Energieerhaltung im Schwingkreis
- Energieerhaltung beim Aufladen eines Kondensators
- Energieerhaltung beim Transformator
- Energieerhaltung bei kreisenden Elektronen
- Energieerhaltung beim Energietransport von Wellen
- Erhaltung bei der Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- Impulserhaltung als Grundlage des rutherfordischen Streuversuches
- Impuls- und Energieerhaltung als Grenzen der Paarerzeugung
- Energie- und Impulserhaltung als Grundlage des Comptoneffekts
- Ladungs-, Baryonen- und Impulserhaltung zur Herleitung der relativistischen Impulsenergie
- Gammastrahlung bei Paarvernichtung aufgrund von Impulserhaltung
- Energieerhaltung und der Tunneleffekt

Eine Erwähnung der Erhaltung als Denkprinzip wird als gegeben angesehen, wenn aus der geschichtlichen Analyse betont wird, dass ein Problem mit dem Denken im Erhaltungsprinzip angegangen wurde oder wenn die Erhaltung als Problemlösewerkzeug zum Lösen physikalischer Aufgaben verwendet wird. Solche Erwähnungen sind:

- Findung des Antineutrinos zur Sicherstellung des Energie-, Impuls- und Drehimpulserhaltungssatzes
- Geschichte des Energieerhaltungssatzes
- Energieerhaltung als Lösungswerkzeug mechanischer Probleme
- Herleitung des Impulserhaltungssatzes nach Huygens
- Energieerhaltung führt zum Optimismus im 19. Jh.
- Grenzen der Anwendbarkeit der Energieerhaltung in der Mechanik
- Energieerhaltung zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Geschosses
- Erhaltungssätze als allgemeine Lösungswerkzeuge in der Physik
- Implizite Anspielung auf Massenerhaltung zum Aufgabenlösen
- Aufgabe soll mit Energieerhaltung gelöst werden
- Symmetrie und Erhaltungssätze
- Probleme der gegenwärtigen Energienutzung mit Energieerhaltung
- Implizite Anspielung auf Energieerhaltung zum Aufgabenlösen
- Gilt die Energieerhaltung in der speziellen Relativitätstheorie?
- Aufgabe zur Energieerhaltung
- Energieerhaltung als Denkwerkzeug in der Mechanik
- Bilanzierstrategie mit Energieerhaltung

5.3.4 Formulierung von Ankerbeispielen und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien (4. Schritt der StIA)

Jede Fundstelle wird nach folgendem Muster bezeichnet:

Zahl.Buchstabenfolge.Buchstabenfolge.Zahl.Buchstabenfolge.Buchstabenfolge.

Die erste Zahl (von links aus gesehen) bezieht sich auf das Buch (mit 01 für Metzger, 02 für Impulse Physik, 03 für Cornelsen Gesamtband Physik, 04 für Duden Physik, 05 für Dorn Bader und 06 für Kuhn Physik).

Der Buchstabencode an zweiter Stelle bezieht sich auf den Hauptkategorientyp (mit G für Gesetz, GM für Gesetzmäßigkeit und P für Denkprinzip). Die Buchstabenfolge an dritter Stelle bezieht sich auf das Kapitel des Buches (M steht für Mechanik, As für Astronomie, TD für Thermodynamik, E für Elektrodynamik und MP für moderne Physik. Ist der Zusammenhang ein ganz allgemeiner oder ein Themengebiet, dass nicht im jeweiligen Kapitel behandelt wurde, so wird die Fundstelle mit dem Buchstaben A versehen)

Die Zahl an der vierten Stelle ist die Nummerierung der Fundstelle. Der Buchstabencode an fünfter Stelle charakterisiert die Fundstelle entsprechend folgender Merkmale:

- A für Aufgabe
- B für Beispiel
- C für Computerzusatz
- G für Graphik oder Bild
- L für Lesetext
- T für Tabelle
- V für Versuch
- R für Randbemerkung

Die letzte Buchstabenkombination bezieht sich auf die Rolle der Fundstelle im Buch. Dabei steht Er für Ergänzung und tEr für teilweise Ergänzung, Ex für Exkurs und analog tEx für teilweise Exkurs.

Eine Fundstelle mit der Bezeichnung 05.GM.07.LA würde also eine Fundstelle im Dorn Bader meinen, bei der die Erhaltung in einem Text zum Lesen und einer dazugehörigen Aufgabe zum siebten Mal im Buch als Gesetzmäßigkeit erwähnt ist.

5.3.5 Materialdurchlauf (5. und 6. Schritt der StIA)

5.3.5.1 Der Erhaltungsgedanke im Metzler (01)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (01.G.M.01.LV) S. 39, 1. Spalte, Absatz 2 und S. 41, 1. Spalte, Absatz 1: Impulserhaltungssatz
- (01.G.M.02.L) S. 65, 1. Spalte, Absatz 1: Allgemeine Form des Energieerhaltungssatzes
- (01.G.M.03.LBA) S. 66-67: Der Energieerhaltungssatz der Mechanik (Die Summe aus kinetischer und potentieller Energie ist konstant)
- (01.G.M.04.LB.Er) S. 75: Der Drehimpulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Thermodynamik

- (01.G.TD.01.L) S. 152, Absatz 1: 1. Hauptsatz als Energieerhaltungssatz allgemein formuliert
- (01.G.TD.02.L.tEx) S. 163: Energieerhaltungssatz allgemein formuliert mit Exkurs über die Geschichte des 1. HS und damit des Energieerhaltungssatzes

...in der Elektrodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in der Elektrodynamik nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (01.G.MP.01.L) S. 366, 2. Spalte, Absatz 2: Die Identität des Massenerhaltungssatzes und des Energieerhaltungssatzes durch die Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- (01.G.MP.02.L.Er) S. 370, 2. Spalte, Absatz 1: Der Baryonenerhaltungssatz

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (01.GM.M.01.L) S. 41, 1. Spalte, Absatz 3: Der Impulserhaltungssatz zur Erklärung des Raketenantriebs
- (01.GM.M.02.L) S. 44, 1. Spalte, Absatz 1: Der Zusammenhang zwischen Impulserhaltungssatz und Trägheitsprinzip
- (01.GM.M.03.L) S. 47, 1. Spalte, Absatz 3: Der Zusammenhang zwischen Impulserhaltungssatz und dem 3. newtonschen Axiom
- (01.GM.M.04.LA) S. 70-71: Erklärung von Stoßprozessen mit dem Energie- und Impulserhaltungssatz
- (01.GM.M.05.L.Ex) S. 76, umrahmtes Feld: Beschreibung des Kreisels mit dem Drehimpulserhaltungssatz
- (01.GM.M.06.L.Er) S. 100, 2. Spalte, Absatz 2: Bestimmung einer Satellitenbahn mit dem Energieerhaltungssatz
- (01.GM.M.07.L) S. 112, 1. Spalte, Absatz 3: Energieerhaltung beim harmonischen Oszillator
- (01.GM.M.08.L) S. 134, 2. Spalte, Absatz 2: Energieerhaltung und die Energieverteilung im Interferenzbild

...in der Astronomie

- (01.GM.As.01.L) S. 552, 2. Spalte, Absatz 1: Drehimpulserhaltung bei der Sternentstehung

...in der Thermodynamik

- (01.GM.TD.01.LB.) S. 169, 1. Spalte, Absatz 4 und 5: Energieerhaltung als noch nicht hinreichende Grenze zur Beschreibung der Irreversibilität vieler Naturvorgänge

...in der Elektrodynamik

- (01.GM.E.01.L) S. 218, 2. Spalte, Absatz 1: Die Ladungserhaltung als grundlegendes Prinzip des ersten kirchhoffschen Gesetzes
- (01.GM.E.02.L) S. 218, 2. Spalte, Absatz 5: Die Energieerhaltung als grundlegendes Prinzip des zweiten kirchhoffschen Gesetzes
- (01.GM.E.03.LBV) S. 253, Absatz 5: Die Energieerhaltung als grundlegendes Prinzip der lenzschen Regel

...in der modernen Physik

- (01.GM.MP.01.L.Er) S. 370, 2. Spalte, Absatz 1: Impulserhaltung zur Beschreibung von Stoßprozessen von Elementarteilchen
- (01.GM.MP.02.L.Er) S. 385, 1. Spalte, Absatz 2: Energie- und Impulserhaltung zur Herleitung der Comptonformel
- (01.GM.MP.03.L) S. 412, 2. Spalte, Absatz 2: Erklärung des rutherfordschen Streuversuchs mit Hilfe des Impulserhaltungssatzes
- (01.GM.MP.04.L) S. 492, 2. Spalte, Absatz 1: Energie- und Impulserhaltung als Grenzbedingung der Paarerzeugung
- (01.GM.MP.05.L.Er) S. 509, 1. Spalte, Absatz 1: Emission von Positronen aufgrund der Erhaltungssätze
- (01.GM.MP.06.L.Er) S. 509, 1. Spalte, Absatz 3: Der Impulserhaltungssatz bei der Paarvernichtung

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in der Mechanik

- (01.P.M.01.LBA) S. 66-67: Energieerhaltung als Lösungswerkzeug bei der Behandlung mechanischer Probleme

...in der Astronomie

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (01.P.MP.01.L) S. 502, 2. Spalte, Abschnitt 4: Postulierung des Antineutrinos zur Sicherstellung der Erhaltungssätze

5.3.5.2 Der Erhaltungsgedanke in Impulse Physik (02)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (02.G.M.01.LBA) S. 44-47: Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (02.G.M.02.LBA) S. 54: Impulserhaltungssatz
- (02.G.M.03.LBA) S. 58: Drehimpulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (02.G.TD.01.L) S. 330, 2. Spalte, Absatz 1: 1. Hauptsatz als Energieerhaltungssatz

...in der Elektrodynamik

- (02.G.E.01.L) S. 99, 1. Spalte, Absatz 2: Ladungserhaltung

...in der modernen Physik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (02.G.M.01.LBA) S. 55: Beschreibung von Stoßprozessen mit dem Impulserhaltungssatz
- (02.G.M.02.A) S. 62: Energieerhaltung bei Regentropfen
- (02.G.M.03.L) S. 80-81, 1. Spalte, Absatz 2: Energieerhaltung beim harmonischen Oszillator

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Gesetzmäßigkeit wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- (02.GM.E.01.L) S. 145, 1. Spalte, Absatz 2: Die Energieerhaltung als grundlegendes Prinzip der lenz'schen Regel

...in der modernen Physik

- (02.GM.MP.01.L) S. 238, 2. Spalte, Absatz 1: Energie- und Impulserhaltung beim Comptoneffekt
- (02.GM.MP.02.L) S. 246: Der Tunneleffekt und Energieerhaltung
- (02.GM.MP.03.L) S. 255, 2. Spalte, Absatz 3: Rutherfords Streuversuch und Impulserhaltung

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in der Mechanik

- (02.P.M.01.L.Ex) S. 52: Die Geschichte des Energieerhaltungssatzes
- (02.P.M.02.L.Ex) S. 56: Die Geschichte des Impulserhaltungssatzes

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (02.P.MP.01.L) S. 295, 2. Spalte, Abschnitt 2: Postulierung des Antineutrinos zur Sicherstellung der Erhaltungssätze

5.3.5.3 Der Erhaltungsgedanke im Cornelsen Gesamtband (03)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (03.G.M.01.L) S. 44, 2. Spalte, Absatz 1: Allgemeine Form des Energieerhaltungssatzes
- (03.G.M.02.LBC) S. 45 und S. 59 : Der Energieerhaltungssatz der Mechanik (Die Summe aus kinetischer und potentieller Energie ist konstant)
- (03.G.M.03.LVC) S. 51 und S. 59: Der Impulserhaltungssatz
- (03.G.M.04.LA) S. 55: Der Impulserhaltungssatz in allgemeiner Form
- (03.G.M.05.L) S. 54 und S. 59, 2. Spalte, Absatz 1: Schwerpunkterhaltungssatz
- (03.G.M.06.LB) S. 71 und S. 75, 2. Spalte Absatz 2: Drehimpulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Thermodynamik

- (03.G.TD.01.L) S. 485, Spalte 2: 1. Hauptsatz als Energieerhaltungssatz allgemein formuliert

...in der Elektrodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (01.G.MP.01.L) S. 442, 2. Spalte, Absatz 2: Relativistische Formulierung des Energie- und Impulserhaltungssatzes

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (03.GM.M.01.L) S. 46, 1. Spalte, Absatz 2: Beschreibung des Fadenpendels durch Energieerhaltung
- (03.GM.M.02.L) S. 54, 1. Spalte, Absatz 1: Erklärung von Stoßprozessen mit dem Impulserhaltungssatz
- (03.GM.M.03.L) S. 186, 2. Spalte, Absatz 3: Energieerhaltung zur Beschreibung des harmonischen Oszillators
- (03.GM.M.04.L) S. 218, 2. Spalte: Energieerhaltung bei der Verteilung der Energie im Interferenzbild

...in der Astronomie

- (03.GM.As.01.LC.Ex) S. 72 und CD: Drehimpulserhaltung und das zweite keplersche Gesetz
- (03.GM.As.02.L.Ex) S. 96, 1. Spalte, Absatz 1: Swing-by-Technik und Energieerhaltung
- (03.GM.As.03.L) S. 469, 2. Spalte, Absatz 2: Sternentstehung und Drehimpulserhaltung

...in der Thermodynamik

- Als Gesetzmäßigkeit wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- (03.GM.E.01.LV) S. 139, 1. Spalte, Absatz 5: Die Energieerhaltung als grundlegendes Prinzip der lenz'schen Regel
- (03.GM.E.02.L) S. 197, 2. Spalte, Absatz 1: Energieerhaltung zur Beschreibung elektromagnetischer Schwingungen

...in der modernen Physik

- (03.GM.MP.01.L) S. 414, 1. Spalte, Absatz 2: Impulserhaltung zur Beschreibung von Elementarteilchen

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...im allgemeinen Teil

- (03.GM.AI.01.LC.Ex) S. 489 und CD: Die Rolle der Energieerhaltung in der 2. Hälfte des 19. Jh.

...in der Mechanik

- (03.P.M.01.C.Ex) S. 44 und CD: Die historische Entwicklung des Energieerhaltungssatzes
- (03.P.M.02.C.Ex) S. 51 und CD: Huygens und der Impulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (03.P.MP.01.L) S. 393 und CD, 2. Spalte, Abschnitt 1: Postulierung des Antineutrinos zur Sicherstellung der Erhaltungssätze

5.3.5.4 Der Erhaltungsgedanke im Duden (04)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (04.G.M.01.LRC.tEx) S. 51 und S. 112, Absatz 1: Massenerhaltungssatz
- (04.G.M.02.LRCB.tEx) S. 90 und S. 112, Absatz 3: Allgemeine Form des Energieerhaltungssatzes
- (04.G.M.03.LB) S. 92-93: Der Energieerhaltungssatz der Mechanik (Die Summe aus kinetischer und potentieller Energie ist konstant)
- (04.G.M.04.LRC.tEx) S. 112: Der Impulserhaltungssatz
- (04.G.M.05.L) S. 114, Absatz 1: Der Schwerpunkterhaltungssatz
- (04.G.M.06.LC) S. 120, Absatz 2: Der Drehimpulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt

...in der Thermodynamik

- (04.G.TD.01.L) S. 212, Absatz 3: 1. Hauptsatz als Energieerhaltungssatz allgemein formuliert
- (04.G.TD.02.L.tEx) S. 163: Energieerhaltungssatz allgemein formuliert mit Exkurs über die Geschichte des 1. HS und damit des Energieerhaltungssatzes

...in der Elektrodynamik

- (04.G.E.01.LRC.Ex) S. 259 und S. 112: Der Ladungserhaltungssatz

...in der modernen Physik

- (04.G.MP.01.LR) S. 543 und S. 545: Die Identität des Massenerhaltungssatzes und des Energieerhaltungssatzes durch die Äquivalenz zwischen Energie und Masse

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (04.GM.M.01.R) S. 92: Unmöglichkeit eines perpetuum mobile aufgrund des Energieerhaltungssatzes
- (04.GM.M.02.T) S. 116: Der Impulserhaltungssatz zur Beschreibung von Stoßvorgängen
- (04.GM.M.03.RB.Ex) S. 120: Der Drehimpulserhaltungssatz zur Beschreibung von Kreiseln

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (04.GM.TD.01.R) S. 198, Randbemerkung: Massenerhaltung als Grenze aller chemischer Reaktionen
- (04.GM.TD.02.R) S. 232, Randbemerkung: Energieerhaltung als noch nicht hinreichende Grenze zur Beschreibung der Irreversibilität vieler Naturvorgänge
- (04.GM.TD.03.R) S. 236, Randbemerkung: Energieerhaltung und das perpetuum mobile 2. Art

...in der Elektrodynamik

- (04.GM.E.01.L) S. 271, Absatz 1: Die Energieerhaltung beim Aufladen eines Kondensators
- (04.GM.E.02.L) S. 299, Absatz 3: Die Energieerhaltung als grundlegendes Prinzip der lenzschen Regel
- (04.GM.E.03.L) S. 345, Absatz 3: Die Energieerhaltung im Schwingkreis

...in der modernen Physik

- (04.GM.MP.01.L) S. 450, Absatz 2: Energie- und Impulserhaltung zur Beschreibung des Comptoneffekts
- (04.GM.MP.02.L) S. 412, 2. Spalte, Absatz 2: Erklärung des rutherford'schen Streuversuchs mit Hilfe des Impulserhaltungssatzes
- (04.GM.MP.03.L) S. 492, 2. Spalte, Absatz 1: Energie- und Impulserhaltung als Grenzbedingung der Paarerzeugung
- (04.GM.MP.04.L.Er) S. 509, 1. Spalte, Absatz 1: Emission von Positronen aufgrund der Erhaltungssätze
- (04.GM.MP.05.L.Er) S. 509, 1. Spalte, Absatz 3: Der Impulserhaltungssatz bei der Paarvernichtung

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...im Allgemeinen Teil

- (04.P.AI.01.R) S. 37, Randbemerkung: Erhaltungssätze als Ansatz zum Lösen physikalischer Probleme

...in der Mechanik

- (04.P.M.01.LBA) S. 117: Energieerhaltung zur Abschätzung der Geschwindigkeit eines Geschosses
- (04.P.M.02.A) S. 162, Aufgabe 9b: Massenerhaltung als Lösungsansatz

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

5.3.5.5 Der Erhaltungsgedanke im Dorn Bader (05)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- Die Mechanik wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (05.G.TD.01.A) S. 338, Kasten: Energieerhaltung allgemein
- (05.G.TD.02.L) S. 340, 2. Spalte, Absatz 7: 1. Hauptsatz als Energieerhaltungssatz allgemein formuliert

...in der Elektrodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (05.G.MP.01.L) S. 252, 2. Spalte, Absatz 2: Die Identität der Massenerhaltungssatzes und des Energieerhaltungssatzes durch die Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- (01.G.MP.02.L.Er) S. 370, 2. Spalte, Absatz 1: Der Baryonenerhaltungssatz

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- Die Mechanik wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Gesetzmäßigkeit wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- (05.GM.E.01.LBV) S. 70-71: Die Energieerhaltung als grundlegendes Prinzip der lenzschen Regel
- (05.GM.E.02.L) S. 78, Absatz 2: Die Energieerhaltung zur Bestimmung des Magnetfelds einer Spule
- (05.GM.E.03.L) S. 98, 2. Spalte, Absatz 2: Energieerhaltung zur Beschreibung von Schwingungen.
- (05.GM.E.04.L) S. 103, 2. Spalte, Absatz 2: Energieerhaltung im Schwingkreis
- (05.GM.E.05.L) S. 126, 2. Spalte, Absatz 2: Energieerhaltung beim Energietransport durch Wellen
- (05.GM.E.06.L) S. 182, 1. Spalte, Absatz 4: Energieerhaltung im Interferenzbild

...in der modernen Physik

- (05.GM.MP.01.L) S. 272, 2. Spalte, Absatz 3: Energie- und Impulserhaltung zur Erklärung des Comptoneffekts

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (05.GM.MP.02.L) S. 291, 1. Spalte, Absatz 3: Energieerhaltung und Resonatorfluoreszenz
- (05.GM.MP.03.L) S. 372: Energieerhaltung als Grenzbedingung der Paarerzeugung
- (05.GM.MP.04.L.Er) S. 509, 1. Spalte, Absatz 1: Emission von Positronen aufgrund der Erhaltungssätze
- (05.GM.MP.05.L.Er) S. 509, 1. Spalte, Absatz 3: Der Impulserhaltungssatz bei der Paarvernichtung

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...im allgemeinen Teil

- (05.GM.A1.01.L) S. 266, 2. Spalte, Absatz 1: Die Rolle der Energieerhaltung in der 2.Hälfte des 19.Jh.
- (05.GM.A1.02.L) S. 447, 1. Spalte, Absatz 1: Erhaltungssätze und Kausalstrategie in der Geschichte der Physik
- (05.GM.A1.03.LAB) S. 468-469: Erhaltungssätze als Werkzeuge in der Physik

...in der Mechanik

- Die Mechanik wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (05.P.MP.01.L) S. 250, 2. Spalte, Absatz 3: Einführung der Realitivität der Masse zur Rettung des Impulserhaltungssatzes
- (05.P.MP.02.L.Ex) S. 396, 2. Spalte, Abschnitt 4: Postulierung des Antineutrinos zur Sicherstellung der Erhaltungssätze

5.3.5.6 Der Erhaltungsgedanke in Kuhn Physik 2 (06)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (06.G.M.01.L) S. 32: Allgemeine Form des Energieerhaltungssatzes
- (06.G.M.02.LBA) S. 35-36: Der Energieerhaltungssatz der Mechanik (Die Summe aus kinetischer und potentieller Energie ist konstant)
- (06.G.M.03.LBA) S. 38-39: Der Impulserhaltungssatz
- (06.G.M.04.LBA) S. 55: Der Drehimpulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (06.G.TD.01.L) S. 111, 1. Spalte, Absatz 1: 1. Hauptsatz als Energieerhaltungssatz allgemein formuliert
- (06.G.TD.02.LBA) S. 113: 1. HS als Energieerhaltungssatz

...in der Elektrodynamik

- (06.G.E.01.T) S. 152, 2. Spalte, Absatz 3: Ladungserhaltungssatz

...in der modernen Physik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (06.GM.M.01.L) S. 32, 1. Spalte, Absatz 3: Unmöglichkeit eines perpetuum mobile aufgrund der Energieerhaltung
- (06.GM.M.02.L) S. 37, 1. Spalte, Absatz 7: Energieerhaltung und Reibung
- (06.GM.M.03.LB) S. 39, 1. Spalte, Absatz 6: Der Zusammenhang zwischen Impulserhaltungssatz und dem 3.newtonschen Axiom
- (06.GM.M.04.LBA) S. 40-41: Erklärung von Stoßprozessen mit dem Energie- und Impulserhaltungssatz
- (06.GM.M.05.LBA) S. 42-43: Anwendungen des Impulserhaltungssatzes
- (06.GM.M.06.LBA) S. 79: Schwingungen mit Energieerhaltung erklärt
- (06.GM.M.07.L) S. 112, 1. Spalte, Absatz 3: Energieerhaltung beim harmonischen Oszillator
- (06.GM.M.08.L) S. 134, 2. Spalte, Absatz 2: Energieerhaltung und die Energieverteilung im Interferenzbild

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (06.GM.TD.01.LB) S. 125, 2. Spalte, Absatz 2: Energieerhaltung als noch nicht hinreichende Grenze zur Beschreibung der Irreversibilität vieler Naturvorgänge

...in der Elektrodynamik

- (06.GM.E.01.A) S. 218, 2. Spalte, Aufgabe 3: Energieerhaltung beim Aufladen eines Kondensators

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (06.GM.E.02.L) S. 198, 2. Spalte, Absatz 3: Die Energieerhaltung als grundlegendes Prinzip der lenz'schen Regel
- (06.GM.E.03.L) S. 223, 1. Spalte, Absatz 1: Energieerhaltung beim Transformator

...in der modernen Physik

- (06.GM.MP.01.L) S. 306, 1. Spalte, Absatz 4: Energie- und Impulserhaltung zur Beschreibung des Comptoneffekts
- (06.GM.MP.02.A) S. 329, 2. Spalte, Aufgabe 3: Energieerhaltung und der Tunneleffekt

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in allgemeinen Teilen

- (06.P.A1.01.L) S. 136-137: Probleme der gegenwärtigen Energienutzung mit Energieerhaltung bedacht

...in der Mechanik

- (06.P.M.01.L) S. 56: Erhaltung als grundlegendes Prinzip der Physik (Zusammenhang zum Symmetrieprinzip)

...in der Astronomie

- Die Mechanik wurde in diesem Buch nicht behandelt

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (06.P.MP.01.LB) S. 370: Postulierung des Antineutrinos zur Sicherstellung der Erhaltungssätze

5.3.6 Überarbeitung und Revision des Kategoriensystems und der Kategoriedefinition (7. Schritt der StIA)

Die Änderungen, die am Kategoriensystem durchgeführt wurden, werden hier nicht explizit erwähnt. Die in Schritt 3 bis Schritt 6 dargestellte Form des Kategoriensystems beinhaltet schon alle Änderungen, die vorgenommen wurden.

5.3.7 Ergebnisinterpretation (8. Schritt der StIA)

Das Ergebnis der Schulbuchanalyse wird zunächst für jede Hauptkategorie gesondert besprochen.

5.3.7.1 Die Rolle der Erhaltung als Gesetz in den Schulbüchern

Die Nennungen der Erhaltung als Gesetz in den untersuchten Schulbüchern können tabellarisch wie folgt dargestellt werden (Tabelle 5.1)⁴: In Abbildung 5.2 ist

	Metzler	Impulse	Cornelsen	Duden	Dorn Bader	Kuhn	insgesamt
Mechanik	4	3	6	6	n.b.	4	23
Astronomie	0	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.	0
Thermodynamik	2	1	1	2	2	2	10
Elektrodynamik	0	1	0	1	0	1	3
Moderne Physik	2	0	1	1	2	0	6
insgesamt	8	5	8	10	4	7	42

Tabelle 5.1: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den Schulbüchern (tabellarisch).

dieses Ergebnis als Histogramm illustriert. Von den insgesamt 42 Erwähnungen sind 23 in der Mechanik verortet, das sind über die Hälfte. Am zweithäufigsten

⁴ „n.b.“ bedeutet, dass dieses Thema in dem Buch nicht behandelt wurde.

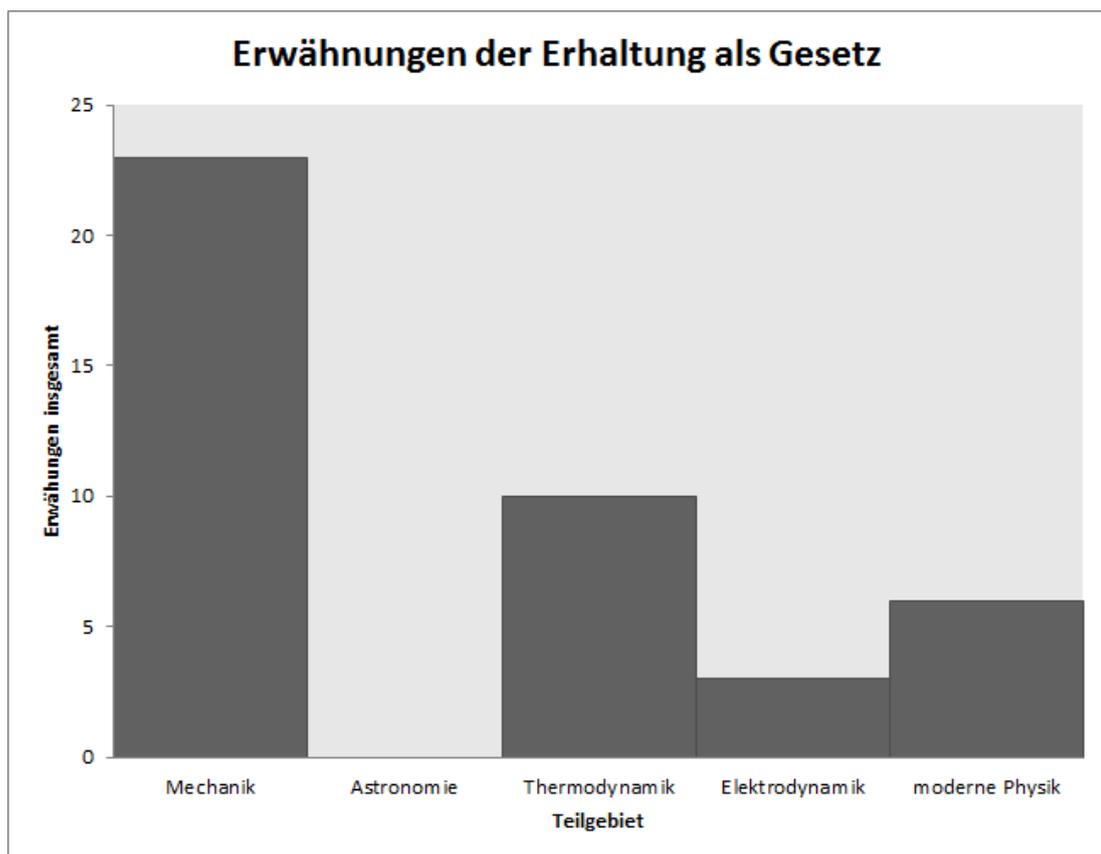


Abbildung 5.2: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den Schulbüchern (graphisch).

wurde die Erhaltung mit zehn Erwähnungen als Gesetz in der Thermodynamik genannt. In der modernen Physik wurde die Erhaltung als Gesetz sechsmal, in der Elektrodynamik drei mal und in der Astronomie gar nicht erwähnt. Es ist folglich ein deutlicher Schwerpunkt der Erwähnungen der Erhaltung als konkretes Gesetz in der Mechanik festzuhalten. Diese Tatsache spiegelt sicher teilweise die historische Entwicklung der Physik wieder während der - wie in dieser Arbeit dargestellt (siehe dazu Kapitel 3) - im Rahmen rein mechanischer Theoriebildungen aufgefunden und später auf andere Teilgebiete übertragen worden.

Eine weitere Ursache dafür liegt sicherlich auch darin, dass die Physik in der Schule nicht in einer solchen mathematischen Tiefe behandelt werden kann, wie dies in Kapitel 3 erfolgt ist. Deshalb ist es verständlich, dass etwa der Poyntingsche Satz nicht als Energieerhaltungssatz der Elektrodynamik in den Schulbüchern erwähnt wird.

Die Nennungen der Erhaltung als Gesetz in den Schulbüchern ist als zufriedenstellend zu bewerten. Die Erhaltung wurde in den Schulbüchern in den dem Schulniveau entsprechenden Formen genannt.

5.3.7.2 Die Rolle der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Schulbüchern

Wie auch bei dem Begriff des Gesetzes lassen sich die Nennungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den analysierten Schulbüchern in einer Tabelle verdeutlichen (Tabelle 5.2)⁵. Die Erwähnung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den

	Metzler	Impulse	Cornelsen	Duden	Dorn Bader	Kuhn	insgesamt
Mechanik	8	3	4	3	n.b.	8	26
Astronomie	1	n.b.	3	n.b.	n.b.	n.b.	4
Thermodynamik	1	0	0	3	0	1	5
Elektrodynamik	3	1	2	3	6	3	18
Moderne Physik	6	3	1	5	5	2	22
insgesamt	19	7	10	14	11	14	75

Tabelle 5.2: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Schulbüchern (tabellarisch).

⁵ „n.b.“ bedeutet dabei, dass dieses Thema in dem Buch nicht behandelt wurde.

untersuchten Schulbüchern ist in Abbildung 5.3 als Histogramm dargestellt. Die

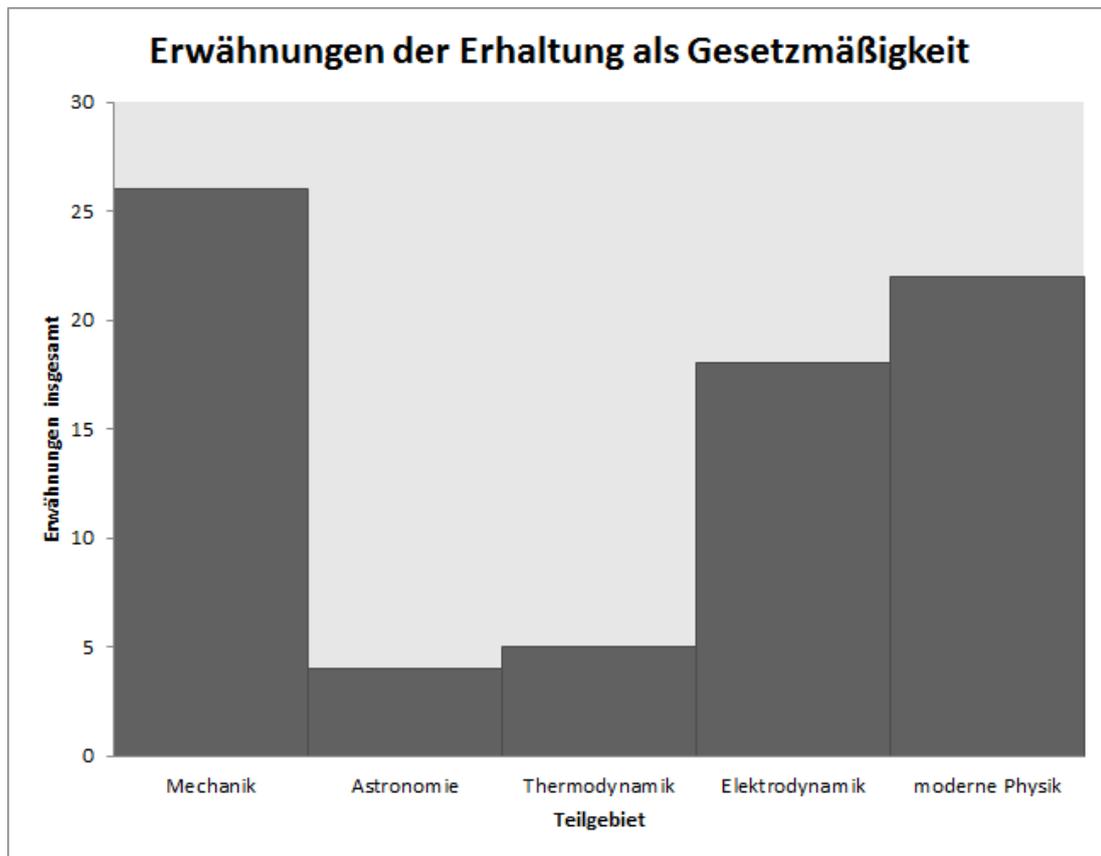


Abbildung 5.3: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Schulbüchern (graphisch).

Erhaltung wird als Gesetzmäßigkeit insgesamt 75 mal erwähnt. Dabei ist wieder die Mechanik das Teilgebiet der Physik mit den meisten Erwähnungen, nämlich 26. Mit nur wenigen Erwähnungen weniger, nämlich 22, ist die moderne Physik das Teilgebiet mit den zweit meisten Nennungen. Mit 18 Fundstellen ist die Erhaltung in der Elektrodynamik auffällig oft erwähnt worden. In der Thermodynamik (fünf Fundstellen) und der Astronomie (vier Fundstellen) ist die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit nicht oft zur Sprache gekommen.

Insgesamt lässt sich dazu sagen, dass 75 Fundstellen auf mehr als 3000 Schulbuchseiten nicht sehr viel sind, wenn man bedenkt, dass die Erhaltung verschiedener Erhaltungsgrößen zu den fundamentalen Rahmenbedingungen aller physikalischer Prozesse gehört. Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, ist die Bedeutung der Gesetzmäßigkeit der Erhaltung in allen Teilgebieten dieselbe. Der Befund stützt die Hypothese, dass die Schulphysik den Wirkungsbereich der Erhaltung vermehrt

auf die Mechanik reduziert. Es sind zwar auch relativ viele Fundstellen im Teilgebiet der modernen Physik vorhanden, doch diese gehören zumeist zum Gebiet „Mechanik im Mikroskopischen“.

Durch dieses Defizit lassen die Schulbücher viele Möglichkeiten, Querverbindungen zwischen den Teilgebieten herzustellen, ungenutzt. Ungenutzt bleibt dadurch auch die Möglichkeit, die vielen Wissens Elemente der Physik zu strukturieren und damit das Theoriegeflecht der Physik zu systematisieren.

5.3.7.3 Die Rolle der Erhaltung als Denkprinzip in den Schulbüchern

Das Ergebnis der Schulbuchanalyse bezüglich des Begriffes des Denkprinzips wird, wie schon bei den beiden anderen Begriffen, tabellarisch angeführt (Tabelle 5.3)⁶.

	Metzler	Impulse	Cornelsen	Duden	Dorn Bader	Kuhn	insgesamt
Mechanik	1	2	2	2	n.b.	1	8
Astronomie	0	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.	0
Thermodynamik	0	0	0	0	0	0	0
Elektrodynamik	0	0	0	0	0	0	0
Moderne Physik	1	1	1	0	2	1	6
allgemein	0	0	1	1	3	1	6
insgesamt	2	3	4	3	5	3	20

Tabelle 5.3: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den Schulbüchern (tabellarisch).

In Abbildung 5.4 ist dieses Resultat in Form eines Histogramms verdeutlicht.

⁶ „n.b.“ bedeutet dabei, dass dieses Thema in dem Buch nicht behandelt wurde.

Insgesamt sind 20 Nennungen der Erhaltung als Denkprinzip aufzufinden. Diese

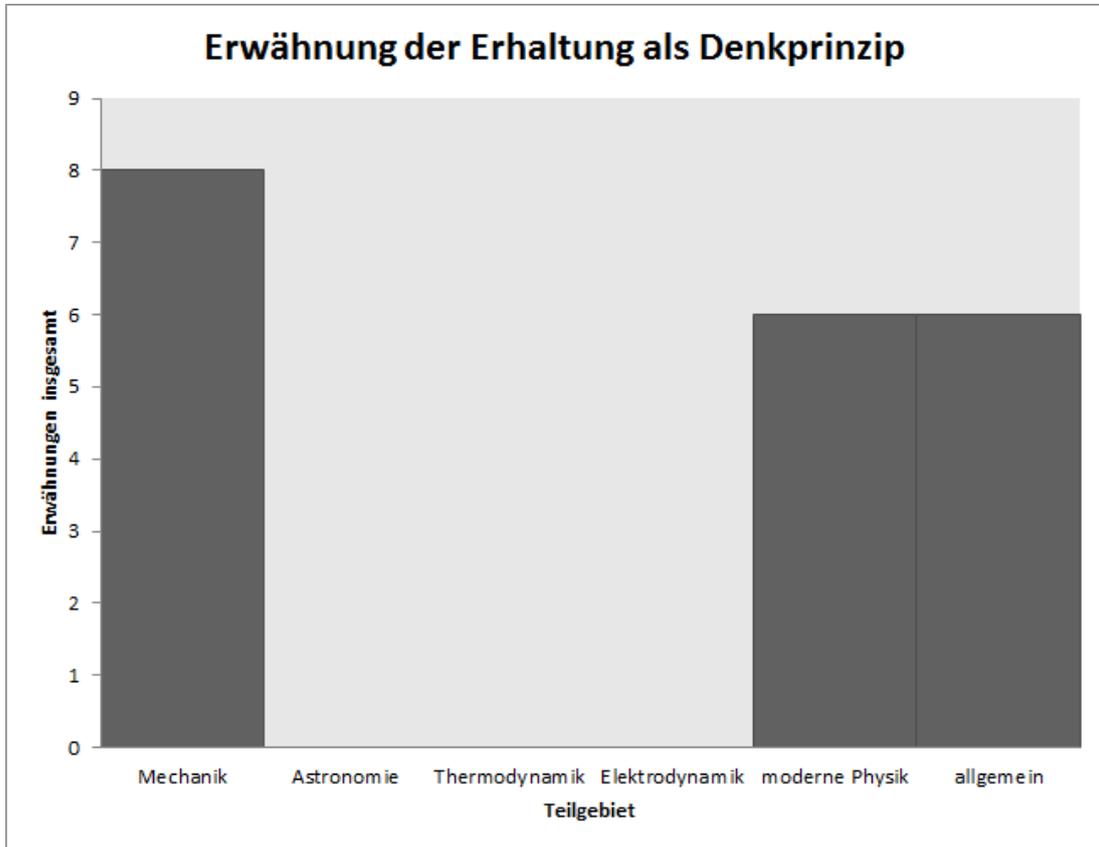


Abbildung 5.4: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den Schulbüchern (graphisch).

Zahl ist gemessen am analysierten Seitenumfang sehr gering. Unter diesen Fundstellen kommen keine astronomischen, thermodynamischen und elektrodynamischen Teilgebiete vor. Jeweils sechs mal wurde die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der modernen Physik und in allgemeinen Teilen, wie etwa dem Buchanfang oder Exkursen, erwähnt. Die Mechanik steht wieder an erster Stelle. Dort wurde die Erhaltung insgesamt achtmal als Denkprinzip genutzt.

Dieser Sachverhalt spricht sehr deutlich dafür, dass die Erhaltung als Problemlösewerkzeug fast nur in der Mechanik genutzt wird - und auch hier nicht sehr intensiv. Die Erwähnungen im allgemeinen Teil geben nicht den pragmatischen Werkzeugcharakter des Erhaltungsprinzips wieder und die Fundstellen in der mo-

dernen Physik sind meist aus der Mechanik bekannte Anwendungen im Mikroskopischen. In den weiteren Teilgebieten blieb dieses effektive Werkzeug gänzlich ungenutzt.

Damit lässt sich sagen, dass der Beitrag zum physikalischen Denken und damit zur höchsten Ebene des konzeptionellen Verständnisses der Physik (vgl. Abbildung 1.3) in den untersuchten Schulbüchern recht mager ausfällt. Damit wird auch die Möglichkeit, grundlegende Ideen der Physik zur Entwicklung der physikalischen Problemlösekompetenz zu nutzen, vernachlässigt.

5.3.7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schulbuchanalyse zeigen recht deutlich, dass die Erhaltung überwiegend in der Mechanik verortet wird und in anderen Teilgebieten nur relativ selten erwähnt wird. Die Querverbindungen zwischen den Teilgebieten, die sich durch die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit bieten, bleiben in der Regel unerwähnt. Die erste Stufe zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses (vgl. Abbildung 1.3) wird damit ebenfalls kaum beschrritten.

Die zweite Stufe, die Verinnerlichung der grundlegenden Ideen der Physik zur Generierung von physikalischen Denkprinzipen, unterbleibt noch deutlicher. Die Form des konzeptionellen Verständnisses, die zum eigenständigen, kreativen Denken befähigt, wird damit zumeist nicht erreicht.

Um vor allem die Rolle der Erhaltung als Denkprinzip in den Schulbüchern noch weitgehender zu analysieren, wurden die entsprechenden Lösungsbücher der Schulbücher analysiert. Die Nutzung der Erhaltung als Problemlöseswerkzeug lässt sich vor allem am konkreten Lösen von Aufgaben erkennen. In den Schulbüchern werden nur wenige Aufgaben gelöst, deshalb sollen im Folgenden noch die Lösungsbücher unterucht werden.

5.4 Analyse der Lösungsbücher

5.4.1 Allgemeines zu den Lösungsbüchern

Untersucht wurden die Lösungsbücher, die den untersuchten Schulbüchern entsprechen. Konkret sind dies:

- Das Lösungsbuch zu Metzler Physik vom Schroedel Verlag (Grehn und Krause, 2009b)
 - Erscheinungsjahr: 2009
 - Umfang: 222 Seiten
 - Inhaltlicher Aufbau des Buchs
Die Kapitel des Schulbuchs sind: Mechanik; Gravitation; Mechanische Schwingungen und Wellen; Thermodynamik; Elektrische Ladungen und elektrisches Feld; Bewegte Ladungsträger und magnetisches Feld; Elektromagnetische Schwingungen und Wellen; Chaotische Vorgänge; Die spezielle Relativitätstheorie; Einführung in die Quantenphysik; Atomphysik; Festkörperphysik und Elektronik; Kernphysik; Elementarteilchenphysik; Astrophysik; Physik und Wissenschaftstheorie

- Das Lösungsbuch zu Impulse Physik vom Klett Verlag (Bredthauer u. a., 2010)
 - Erscheinungsjahr: 2010
 - Umfang: 245 Seiten
 - Inhaltlicher Aufbau des Lösungsbuchs
Die Kapitel des Lösungsbuches entsprechen denen des Schulbuchs: Beschreiben von Bewegungen; Ursache von Bewegungen; Erhaltungssätze; Gravitationsfeld; Elektrisches Feld; Magnetisches Feld; Induktion; Wellen; Wellenmodell des Lichts; Quantenobjekte; Atomphysik; Kernphysik; Thermodynamik; Relativitätstheorie

- Das Lösungsbuch zu Physik Oberstufe Gesamtband vom Cornelsen Verlag (Diehl, 2009)
 - Erscheinungsjahr: 2009
 - Umfang: 574 Seiten

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- Inhaltlicher Aufbau des Lösungsbuchs

Die Kapitel des Lösungsbuches entsprechen denen des Schulbuchs: Einfache Bewegungen; Dynamik; Kreis- und Drehbewegungen; Gravitation; Elektrische und magnetische Felder; Induktion und Leitungsvorgänge; Schwingungen; Wellen; Licht; Quantenphysik; Atome; Kerne und Elementarteilchen; Relativitätstheorie; Astrophysik; Thermodynamik

- Das Lösungsbuch zu Kuhn Physik 2 vom Westermann Verlag (Bang und Euler, 2001)

- Erscheinungsjahr: 2001

- Umfang: 69 Seiten

- Inhaltlicher Aufbau des Lösungsbuchs

Die Kapitel des Lösungsbuches entsprechen denen des Schulbuchs: Elemente der Mechanik; Mechanische Schwingungen und Wellen; Elemente der Thermodynamik; Elektrizitätslehre; Elektromagnetische Schwingungen und Wellen; Relativität; Quanten und Atome; Kernphysik und Ausblick

- Das Lösungsbuch zu Physik vom Duden Paetec Verlag (Meyer und Hoche, 2004)

- Erscheinungsjahr: 2004

- Umfang: 183 Seiten

- Inhaltlicher Aufbau des Lösungsbuchs

Die Kapitel des Lösungsbuches entsprechen denen des Schulbuchs: Die Physik - Eine Naturwissenschaft; Mechanik; Thermodynamik; Elektrizitätslehre und Magnetismus; Optik; Quantenphysik; Atom- und Kernphysik; Spezielle Relativitätstheorie; Ausblick und weitere Teilgebiete der Physik

- Das Lösungsbuch zu Dorn Bader Physik vom Schroedel Verlag (Bader und Dorn, 2010b)

- Erscheinungsjahr: 2010

- Umfang: 116 Seiten
- Inhaltlicher Aufbau des Lösungsbuchs
Die Kapitel des Lösungsbuches entsprechen denen des Schulbuchs: Elektrisches Feld; Magnetfeld und Teilchen in Feldern; Induktion; Schwingungen; Wellen; Interferenzphänomene; Strahlungsphysik und Klima; Relativitätstheorie; Quanten, Atome, Festkörper; Thermodynamik und Entropie; Kernphysik; Weiterführende Themen; Mechanik und Mathematik
- Bemerkung: In diesem Buch wurde die Mechanik nicht als gesondertes Thema behandelt.

5.4.2 Bestimmung der Analyseeinheit (1.Schritt der StIA)

Die Bestimmung der Analyseeinheit zur Untersuchung der Lösungsbücher ist analog zur Bestimmung der Analyseeinheit zur Untersuchung der Schulbücher erfolgt (siehe 5.3.2)

5.4.3 Bestimmung der Hauptkategorien und Kategorien (2.und 3.Schritt der StIA)

Die Bestimmung der Hauptkategorien und Kategorien zur Untersuchung der Lösungsbücher ist analog zur Bestimmung der Hauptkategorien und Kategorien zur Untersuchung der Schulbücher erfolgt (siehe 5.3.3)

5.4.4 Formulierung von Ankerbeispielen und Kodierregeln zu den einzelnen Kategorien (4. Schritt der StIA)

Zur Bezeichnung der Fundstellen bei der Analyse der Lösungsbücher wurden die gleichen Kodierregeln verwendet, wie bei der Analyse der Schulbücher (siehe 5.3.4). Den Fundstellen wurde lediglich ein „LB.“ vorangestellt, um die Fundstellen der Lösungsbuchanalyse von denen der Schulbuchanalyse zu unterscheiden.

5.4.5 Materialdurchlauf (5. und 6. Schritt der StIA)

5.4.5.1 Der Erhaltungsgedanke im Metzler (01)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (LB.01.G.M.01.A.) S. 20, 1. Spalte, Nr. 2 (von S. 39), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.02.A.) S. 20, 1. Spalte, Nr. 3 (von S. 39), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.03.A.) S. 20, 1. Spalte, Nr. 1 (von S. 41), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.04.A.) S. 20, 2. Spalte, Nr. 2 (von S. 41), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.05.A.) S. 20, 2. Spalte, Nr. 3 (von S. 41), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.06.A.) S. 20, 2. Spalte, Nr. 4a,b,c (von S. 41), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.07.A.) S. 20, 2. Spalte, Nr. 6 (von S. 41), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.08.A.L.) S. 21, 1. Spalte, Nr. 7, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.09.A.) S. 21, 1. Spalte, Nr. 8, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.10.A.) S. 21, 2. Spalte, Nr. 9 (Beginn 1. Spalte), Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.11.A.L.) S. 21, 2. Spalte, Nr. 1, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.12.A.) S. 22, 1. Spalte, Nr. 3a,b, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.13.A.) S. 28, 1./2. Spalte, Nr. 5, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.14.A.) S. 29, 2. Spalte, Nr. 1a, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.15.A.) S. 30, 2. Spalte, Nr. 9, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.M.16.A.) S. 31, 1. Spalte, Nr. 1 (von S. 67), Energieerhaltungssatz der Mechanik

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.01.G.M.17.A.) S. 31, 1. Spalte, Nr. 2 (von S. 67), Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.18.A.) S. 31, 2. Spalte, Nr. 3, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.19.A.) S. 31, 2. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.20.A.) S. 31, 2. Spalte, Nr. 5, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.21.A.) S. 31, 2. Spalte, Nr. 6, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.22.A.) S. 32, 1. Spalte, Nr. 7a, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.23.A.) S. 32, 1. Spalte, Nr. 7b, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.M.24.A.L.) S. 32, 2. Spalte, Nr. 10a,b, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.25.A.) S. 32, 2. Spalte, Nr. 12, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.26.A.) S. 33, 2. Spalte, Nr. 6a, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.M.27.A.) S. 34, 1. Spalte, Nr. 4, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.28.A.) S. 34, 2. Spalte, Nr. 7, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.29.A.L.) S. 36, 1. Spalte, Nr. 2, Impulserhaltungssatz mit Worten formuliert
- (LB.01.G.M.30.A.L.) S. 37, 1. Spalte, Nr. 6, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.M.31.A.) S. 38, 1. Spalte, Nr. 9a,b, Impulserhaltungssatz

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.01.G.M.32.A.) S. 38, 2. Spalte, Nr. 10a, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.M.33.A.L.) S. 38 und S. 39, 2. und 1. Spalte, Nr. 11, Impuls- und Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.M.34.A.L.) S. 39, 2. Spalte, Nr. 13a, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.35.A.L.) S. 40, 1. Spalte, Nr. 14, Impulserhaltungssatz
- (LB.01.G.M.36.A.) S. 57, 1. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.G.M.37.A.) S. 65, 2. Spalte, Nr. 1b, Energieerhaltungssatz der Mechanik

...in der Astronomie

- (LB.01.G.As.01.A.) S. 46, 1./2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.As.02.A.) S. 47, 1. Spalte, Nr. 6a, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.As.03.A.) S. 54/55, 2./1. Spalte, Nr. 10b, Energieerhaltungssatz allgemein

...in der Thermodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in der Thermodynamik nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- (LB.01.G.E.01.A.) S. 80, 1. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.E.02.A.) S. 97, 2. Spalte, Nr. 9c, Impulserhaltungssatz

...in der modernen Physik

- (LB.01.G.MP.01.A.L.) S. 156, 1. Spalte, Nr. 11, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.MP.02.A.) S. 158, 2. Spalte, Nr. 17, Impuls- und Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.MP.03.A.) S. 161, 1. Spalte, Nr. 5, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.MP.04.A.) S. 161, 1./2. Spalte, Nr. 6b, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.MP.05.A.) S. 162, 1. Spalte, Nr. 8, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.01.G.MP.06.A.) S. 164, 1. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltungssatz allgemein

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (LB.01.GM.M.01.A.) S. 30, 2. Spalte, Nr. 7, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.01.GM.M.02.A.) S. 31, 1. Spalte, Nr. 2 (von S. 64), Energieerhaltung (Beschleunigen)
- (LB.01.GM.M.03.A.) S. 32, 1. Spalte, Nr. 9, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.01.GM.M.04.A.L.) S. 32, 2. Spalte, Nr. 11, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.01.GM.M.05.A.L.) S. 33, 1. Spalte, Nr. 13a,b, Energieerhaltung (Beschleunigen)
- (LB.01.GM.M.06.A.) S. 33, 1. Spalte, Nr. 14a,b, Energieerhaltung (Beschleunigen)

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.01.GM.M.07.A.) S. 34, 1. Spalte, Nr. 2, Impulserhaltung beim Anstoßen mehrerer Kugeln
- (LB.01.GM.M.08.A.L.) S. 35, 1. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltung bei Rotation
- (LB.01.GM.M.09.A.L.) S. 36, 2. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung beim Wurf
- (LB.01.GM.M.10.A.L.) S. 38, 1. Spalte, Nr. 9b, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.01.GM.M.11.A.) S. 57, 2. Spalte, Nr. 3, Energieerhaltung bei einem Federpendel
- (LB.01.GM.M.12.A.) S. 65, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung beim galileischen Pendel

...in der Astronomie

- (LB.01.GM.As.01.A.) S. 51, 2. Spalte, Nr. 3c, Energieerhaltung beim Bestimmen der kosmischen Geschwindigkeit

...in der Thermodynamik

- (LB.01.GM.TD.01.A.) S. 72, 1. Spalte, Nr. 1a, Energieerhaltung
- (LB.01.GM.TD.02.A.) S. 72, 1. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung
- (LB.01.GM.TD.03.A.) S. 72, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung

...in der Elektrodynamik

- (LB.01.GM.E.01.A.) S. 84, 1. Spalte, Nr. 5, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.01.GM.E.02.A.) S. 87, 2. Spalte, Nr. 1 (von S. 217), Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.01.GM.E.03.A.) S. 87, 2. Spalte, Nr. 2 (von S. 217), Energieerhaltung im elektrischen Feld

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.01.GM.E.04.A.) S. 88, 1. Spalte, Nr. 3, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.01.GM.E.05.A.L.) S. 88, 1. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.01.GM.E.06.A.) S. 88, 1./2. Spalte, Nr. 6a, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.01.GM.E.07.A.) S. 98, 1. Spalte, Nr. 10a, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.01.GM.E.08.A.) S. 103, 1. Spalte, Nr. 5, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.01.GM.E.09.A.) S. 104, 2. Spalte, Nr. 3b, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.01.GM.E.10.A.) S. 105, 1. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.01.GM.E.11.A.) S. 105, 1. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung im magnetischen Feld

...in der modernen Physik

- (LB.01.GM.MP.01.A.) S. 153, 1. Spalte, Nr. 4, Erhaltung bei der Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- (LB.01.GM.MP.02.A.) S. 153, 2. Spalte, Nr. 1, Erhaltung bei der Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- (LB.01.GM.MP.03.A.) S. 153, 2. Spalte, Nr. 3, Erhaltung bei der Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- (LB.01.GM.MP.04.A.) S. 156, 2. Spalte, Nr. 10, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.01.GM.MP.05.A.) S. 159, 2. Spalte, Nr. 5, Energieerhaltung

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.01.GM.MP.06.A.) S. 159, 2. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltung bei der Bestimmung der Wellenlänge von em-Strahlung
- (LB.01.GM.MP.07.A.) S. 160, 1. Spalte, Nr. 1b, Energieerhaltung bei der Bestimmung der Wellenlänge von em-Strahlung
- (LB.01.GM.MP.08.A.) S. 160, 2. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung bei der Bestimmung der Wellenlänge von em-Strahlung
- (LB.01.GM.MP.09.A.) S. 165, 2. Spalte, Nr. 2b, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.01.GM.MP.10.A.) S. 165, 2. Spalte, Nr. 3a,b, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.01.GM.MP.11.A.) S. 166, 2. Spalte, Nr. 6b, Energieerhaltung
- (LB.01.GM.MP.12.A.) S. 170, 1. Spalte, Nr. 2a, Energieerhaltung beim Franck-Hertz Versuch
- (LB.01.GM.MP.13.A.) S. 171, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung bei Stoß von Teilchen
- (LB.01.GM.MP.14.A.L.) S. 180, 1./2. Spalte, Nr. 5c, Impulserhaltung
- (LB.01.GM.MP.15.A.L.) S. 183, 1./2. Spalte, Nr. 10a,b,c,d, Energieerhaltung beim lichtelektrischen Effekt
- (LB.01.GM.MP.16.A.) S. 194, 2. Spalte, Nr. 2, Impuls- und Energieerhaltung als Grenzen der Paarerzeugung
- (LB.01.GM.MP.17.A.) S. 217, 2. Spalte, Nr. b, Energieerhaltung
- (LB.01.GM.MP.18.A.) S. 219, 1. Spalte, Nr. e, Energieerhaltungssatz bei der Äquivalenz zwischen Energie und Masse

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in der Mechanik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in der Mechanik nicht erwähnt.

...in der Astronomie

- (LB.01.P.As.01.A.) S. 53, 2. Spalte, Nr. 6a,b, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- (LB.01.P.E.01.A.L.) S. 83, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug

...in der modernen Physik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in der modernen Physik nicht erwähnt.

5.4.5.2 Der Erhaltungsgedanke in Impulse Physik (02)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (LB.02.G.M.01.A.) S. 47, Nr. 2, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.02.G.M.02.A.) S. 48, Nr. 1, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.02.G.M.03.A.) S. 50, Nr. 2, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.02.G.M.04.A.) S. 50, Nr. 1 (von S. 54), Impulserhaltungssatz in Worten
- (LB.02.G.M.05.A.) S. 56/57, Nr. 4b, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.02.G.M.06.A.) S. 57, Nr. 5a, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.02.G.M.07.A.) S. 58, Nr. 8, Impulserhaltungssatz
- (LB.02.G.M.08.A.) S. 58, Nr. 9a, Impulserhaltungssatz

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.02.G.M.09.A.) S. 58, Nr. 10a, Impulserhaltungssatz
- (LB.02.G.M.10.A.) S. 58/59, Nr. 10b, Impulserhaltungssatz
- (LB.02.G.M.11.A.) S. 59, Nr. 11, Energie- und Impulserhaltungssatz bei Stoßprozessen
- (LB.02.G.M.12.A.L.) S. 59, Nr. 12, Energie- und Impulserhaltungssatz bei Stoßprozessen
- (LB.02.G.M.13.A.) S. 61, Nr. 14b, Impulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in der Thermodynamik nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in der Elektrodynamik nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (LB.02.GM.M.01.A.) S. 47, Nr. 1 (von S. 45), Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.02.GM.M.02.A.) S. 47, Nr. 1 (von S. 46), Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.02.GM.M.03.A.) S. 48/49, Nr. 2, Energieerhaltung beim springenden Ball
- (LB.02.GM.M.04.A.) S. 54, Nr. 2, Energieerhaltung bei geneigter Ebene

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.02.GM.M.05.A.) S. 56, Nr. 2, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.02.GM.M.06.A.) S. 56, Nr. 3, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.02.GM.M.07.A.) S. 57, Nr. 5b, Energieerhaltung bei geneigter Ebene
- (LB.02.GM.M.08.A.) S. 60, Nr. 13b, Energieerhaltung (Bremsvorgang)
- (LB.02.GM.M.09.A.) S. 61, Nr. 14a, Energieerhaltung bei Stoßprozessen

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Gesetzmäßigkeit wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- (LB.02.GM.E.01.A.) S. 94, Nr. 2 (von S. 112), Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.02.GM.E.02.A.) S. 100, Nr. 22, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.02.GM.E.03.A.) S. 101, Nr. 24, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.02.GM.E.04.A.) S. 102, Nr. 25, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.02.GM.E.05.A.) S. 108, Nr. 5, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.02.GM.E.06.A.) S. 110, Nr. 11a,b, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.02.GM.E.07.A.) S. 116/117, Nr. 1f, Energieerhaltung bei Induktion
- (LB.02.GM.E.08.A.) S. 122, Nr. 3, Energieerhaltung als Grundlage der lenzschen Regel
- (LB.02.GM.E.09.A.L.) S. 127, Nr. 22b, Energieumwandlung beim Kondensator

...in der modernen Physik

- (LB.02.GM.MP.01.A.L.) S. 164/165, Nr. 1 (von S. 231), Energieerhaltung bei der Bestimmung von h
- (LB.02.GM.MP.02.A.) S. 167, Nr. 2, Energiebilanz
- (LB.02.GM.MP.03.A.) S. 167, Nr. 3, Energie- und Impulserhaltung bei Wellen
- (LB.02.GM.MP.04.A.) S. 172, Nr. 7b,c,d, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.02.GM.MP.05.A.) S. 172, Nr. 8, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.02.GM.MP.06.A.) S. 172, Nr. 9a, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.02.GM.MP.07.A.) S. 172, Nr. 10a, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.02.GM.MP.08.A.) S. 174, Nr. 24a, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.09.A.) S. 174, Nr. 25a, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.10.A.) S. 177, Nr. 30a, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.11.A.) S. 177, Nr. 31a, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.12.A.) S. 177, Nr. 33, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.13.A.) S. 178, Nr. 36, Energie- und Impulserhaltung beim Comptoneffekt
- (LB.02.GM.MP.14.A.L.) S. 179/180, Nr. 39d,e, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.15.A.L.) S. 187, Nr. 1 (von S. 268), Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.16.A.) S. 192, Nr. 7a, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.17.A.) S. 197, Nr. 32c, Energieerhaltung
- (LB.02.GM.MP.18.A.L.) S. 200, Nr. 45, Energieerhaltung bei emittiertem Licht

- (LB.02.GM.MP.19.A.L.) S. 211, Nr. 9a, Energieumwandlung bei Atomkernen

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in der Mechanik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in der Mechanik nicht erwähnt.

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (LB.02.P.MP.01.L.) S. 191, Nr. 3, Geschichtliches zur Erhaltung der Masse
- (LB.02.P.MP.02.L.) S. 211/212, Nr. 10c, Energieerhaltung beim β -Zerfall

5.4.5.3 Der Erhaltungsgedanke im Cornelsen Gesamtband (03)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (LB.03.G.M.01.A.) S. 18, 1. Spalte, Nr. 1a (von S. 46), Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.02.A.) S. 18, 2. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltungssatz der Mechanik

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.03.G.M.03.A.) S. 18, 2. Spalte, Nr. 1a, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.04.A.) S. 21, 1. Spalte, Nr. 7, Impulserhaltungssatz
- (LB.03.G.M.05.A.) S. 21, 2. Spalte, Nr. 8, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.06.A.L.) S. 25, 2. Spalte, Nr. 11b, Impulserhaltungssatz (in Worten)
- (LB.03.G.M.07.A.) S. 26, 1. Spalte, Nr. 13b, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.08.A.) S. 27, 1. Spalte, Nr. 16a, Impulserhaltungssatz
- (LB.03.G.M.09.A.) S. 31, 1. Spalte, Nr. 7b, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.M.10.A.) S. 33, 2. Spalte, Nr. 7a, Drehimpulserhaltungssatz
- (LB.03.G.M.11.A.) S. 34, 1. Spalte, Nr. 8, Drehimpulserhaltungssatz
- (LB.03.G.M.12.A.) S. 34, 1./2. Spalte, Nr. 9a, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.M.13.A.) S. 35, 1. Spalte, Nr. 2b, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.M.14.A.) S. 35, 1./2. Spalte, Nr. 2c, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.M.15.A.) S. 191, Nr. 2a, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.16.A.) S. 191/192, Nr. 3a, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.17.A.) S. 198, Nr. 2, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.18.A.) S. 204, Nr. 1, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.19.A.) S. 204, Nr. 2, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.M.20.A.) S. 204, Nr. 3, Energieerhaltungssatz der Mechanik

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.03.G.M.21.A.) S. 222, Nr. 2, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.M.22.L.) S. 431/435/436/438/441/445, Checkliste Erhaltungssätze
- (LB.03.G.M.23.A.) S. 438, Nr. a, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.M.24.A.) S. 438, Nr. c, Impulserhaltungssatz
- (LB.03.G.M.25.A.) S. 439, Nr. c, Impulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Thermodynamik

- (LB.03.G.TD.01.A.) S. 570, Nr. a, 1. HS

...in der Elektrodynamik

- (LB.03.G.E.01.A.) S. 72, 2. Spalte, Nr. 4b, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.E.02.A.) S. 75, 1. Spalte, Nr. 3b, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.E.03.A.) S. 75, 1. Spalte, Nr. 5a, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.03.G.E.04.A.) S. 79, 2. Spalte, Nr. 18b, Energieerhaltungssatz allgemein

...in der modernen Physik

- (LB.03.G.MP.01.A.L.) S. 339, Nr. 3, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.03.G.MP.02.A.) S. 341, Nr. 3, Energieerhaltungssatz der Mechanik

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (LB.03.GM.M.01.A.) S. 19, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.03.GM.M.02.A.) S. 20, 1. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.03.GM.M.03.A.) S. 26, 1. Spalte, Nr. 13a, Energieumwandlung beim Stoß
- (LB.03.GM.M.04.A.L.) S. 26, 1. Spalte, Nr. 13c, Energieumwandlung
- (LB.03.GM.M.05.A.) S. 26, 2. Spalte, Nr. 14, Energieumwandlung beim Trampolin
- (LB.03.GM.M.06.A.) S. 44, 1. Spalte, Nr. 2b, Energieumwandlung im Gravitationsfeld
- (LB.03.GM.M.07.A.) S. 45, 2. Spalte, Nr. 10a, Energieerhaltung/-umwandlung
- (LB.03.GM.M.08.A.) S. 198, Nr. 1, Energieumwandlung beim Stabhochsprung
- (LB.03.GM.M.09.A.L.) S. 198, Nr. 5, Energieumwandlung beim Stabhochsprung
- (LB.03.GM.M.10.A.L.) S. 199, Argumentation B, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.03.GM.M.11.A.L.) S. 200, Nr. 1, Energieerhaltung bei einer Feder (Energiebilanz)
- (LB.03.GM.M.12.A.L.) S. 200, Nr. 2, Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.03.GM.M.13.A.L.) S. 260, Medien auf der DVD, Energieerhaltung beim Doppelpendel
- (LB.03.GM.M.14.A.) S. 426, Nr. c, Energieerhaltung bei einer Feder

...in der Astronomie

- (LB.03.GM.A.01.C.) S. 211, Drehimpulserhaltung und zweites keplersches Gesetz

...in der Thermodynamik

- (LB.03.GM.TD.01.A.) S. 157, Nr. 4a, Energieerhaltung beim Osmosekraftwerk
- (LB.03.GM.TD.02.A.L.) S. 404, Nr. 1, Energieumwandlung Wärmekraftmaschine
- (LB.03.GM.TD.03.A.L.) S. 404, Nr. 2, Energieumwandlung Wärmekraftmaschine (bildlich)
- (LB.03.GM.TD.04.A.L.) S. 404, Nr. 3a, Energieumwandlung Wärmekraftmaschine

...in der Elektrodynamik

- (LB.03.GM.E.01.A.L.) S. 74, 1. Spalte, Nr. 1 (von S. 203), Energieumwandlung (Schwingquarze)
- (LB.03.GM.E.02.L.) S. 475, Checkliste, Energieerhaltung als Grundlage der lenzschen Regel

...in der modernen Physik

- (LB.03.GM.MP.01.A.) S. 97, 2. Spalte, Nr. 3b, Energieerhaltung
- (LB.03.GM.MP.02.A.) S. 97, 2. Spalte, Nr. 5, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.03.GM.MP.03.A.) S. 97, 2. Spalte, Nr. 6, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.03.GM.MP.04.A.L.) S. 104, 1. Spalte, Nr. 9a, Energieerhaltung beim Photoeffekt

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.03.GM.MP.05.A.) S. 104, 2. Spalte, Nr. 10, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.03.GM.MP.06.A.) S. 143, 1. Spalte, Nr. 6, Energieerhaltung
- (LB.03.GM.MP.07.A.) S. 143, 2. Spalte, Nr. 8, Energieerhaltung
- (LB.03.GM.MP.08.A.L.) S. 361/362, Erhaltungssätze der Elementarteilchenphysik
- (LB.03.GM.MP.09.A.) S. 515, Nr. a, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.03.GM.MP.10.A.) S. 522, Nr. c (Erwartungshorizont), Erhaltung als Äquivalenz zw. Energie und Masse
- (LB.03.GM.MP.11.A.) S. 523, Checkliste, Energieerhaltung bei Elementarteilchen
- (LB.03.GM.MP.12.A.) S. 523, Checkliste, Impulserhaltung bei Elementarteilchen
- (LB.03.GM.MP.13.A.) S. 524, Nr. c (Erwartungshorizont), Energieerhaltung
- (LB.03.GM.MP.14.A.) S. 557, Nr. a (Erwartungshorizont), Energieerhaltung

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in der Mechanik

- (LB.03.P.M.01.A.L.) S. 20, 2. Spalte, Nr. 5, Impulserhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.M.02.A.) S. 27, 2. Spalte, Nr. 17b, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.M.03.C.) S. 173, historische Texte zur Energieerhaltung
- (LB.03.P.M.04.A.L.) S. 199, Argumentation A, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.03.P.M.05.A.L.) S. 437, Energie- und Impulserhaltung (am Skihang) als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.M.06.A.L.) S. 439, Impulserhaltung (im Weltall) als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.M.07.A.) S. 444, Nr. a,c,d (Erwartungshorizont), Energieerhaltung als Lösungswerkzeug

...in der Astronomie

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Thermodynamik

- (LB.03.P.TD.01.A.L.) S. 157, 1. Spalte, Nr. 1 (von S. 507) Energieerhaltung Osmosekraftwerk

...in der Elektrodynamik

- (LB.03.P.E.01.A.L.) S. 60, 2. Spalte, Nr. 5b, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug

...in der modernen Physik

- (LB.03.P.MP.01.A.L.) S. 111, 2. Spalte, Nr. 3, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.MP.02.A.L.) S. 114/115, 2./1. Spalte, Nr. 2a, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.MP.03.A.L.) S. 116, 2. Spalte, Nr. 8a, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.MP.04.A.L.) S. 118, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.03.P.MP.05.A.L.) S. 120, 1. Spalte, Nr. 3, Energieerhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.03.P.MP.06.A.L.) S. 130, 1. Spalte, Nr. 2 (von S. 404, Impulserhaltung als Lösungswerkzeug)
- (LB.03.P.MP.07.A.L.) S. 132, 2. Spalte, Nr. 2 (von S. 414, Erhaltung als Lösungswerkzeug)
- (LB.03.P.MP.08.A.L.) S. 137, 2. Spalte, Nr. 17, Energie- und Impulserhaltung beim β -Zerfall
- (LB.03.P.MP.09.A.L.) S. 307, Nr. 4, Energie- und Impulserhaltung beim Compton-Effekt
- (LB.03.P.MP.10.A.L.) S. 307, Nr. 5, Energie- und Impulserhaltung beim Compton-Effekt

5.4.5.4 Der Erhaltungsgedanke im Duden (04)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (LB.04.G.M.01.A.) S. 20, Nr. 36, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.04.G.M.02.A.) S. 29/30, Nr. 54a,c,d, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.04.G.M.03.A.) S. 31, Nr. 57b, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.04.G.M.04.A.) S. 32, Nr. 58b, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.04.G.M.05.A.) S. 43, Nr. 73, Impulserhaltungssatz
- (LB.04.G.M.06.A.) S. 45, Nr. 77a, Impuls- und Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.04.G.M.07.A.) S. 45, Nr. 78a, Impulserhaltungssatz
- (LB.04.G.M.08.A.) S. 46, Nr. 80a, Impulserhaltungssatz

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (LB.04.G.MP.01.A.L.) S. 170, Nr. 6, Masse- und Impulserhaltungssatz

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (LB.04.GM.M.01.A.) S. 32, Nr. 58a, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.M.02.A.) S. 35, Nr. 63d, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.M.03.A.) S. 40, Nr. 69b, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.M.04.A.) S. 41, Nr. 70a, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.M.05.A.) S. 46, Nr. 78b, Energieumwandlung beim Stoß

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (LB.04.GM.TD.01.A.L.) S. 73, Nr. 31, Energieumwandlung (Beispiele)

...in der Elektrodynamik

- (LB.04.GM.E.01.A.) S. 90, Nr. 18, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.04.GM.E.02.A.L.) S. 122, Nr. 70a, Energieumwandlung (Drosselspule)
- (LB.04.GM.E.03.A.L.) S. 126, Nr. 73a, Energieerhaltung bei Schwingungen

...in der modernen Physik

- (LB.04.GM.MP.01.A.) S. 142, Nr. 37a, Energieerhaltung bei Licht
- (LB.04.GM.MP.02.A.) S. 148, Nr. 8b, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.MP.03.A.) S. 149, Nr. 12a, Energieerhaltung bei Röntgenstrahlung
- (LB.04.GM.MP.04.A.) S. 150, Nr. 13b, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.MP.05.A.) S. 150, Nr. 15a, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.MP.06.A.) S. 151, Nr. 17, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.MP.07.A.) S. 152, Nr. 19a, Energieerhaltung bei Interferenz
- (LB.04.GM.MP.08.A.) S. 153, Nr. 21a, Energieerhaltung
- (LB.04.GM.MP.09.A.) S. 165, Nr. 19b, Energie-, Impulserhaltung bei Elementarteilchen

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in der Mechanik

- (LB.04.P.M.01.A.L.) S. 5, Nr. 9b, Massenerhaltung
- (LB.04.P.M.02.A.L.) S. 45, Nr. 76, Energie- und Impulserhaltungssatz als Lösungswerkzeug

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

5.4.5.5 Der Erhaltungsgedanke im Dorn Bader (05)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- Die Mechanik wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in der Thermodynamik nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (LB.05.G.MP.01.A.) S. 95/96, 2./1. Spalte, Nr. 5b, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.05.G.MP.02.A.) S. 99, 1. Spalte, Nr. 2, Impuls- und Energieerhaltungssatz allgemein, Ladungserhaltungssatz in Worten
- (LB.05.G.MP.03.A.) S. 107, 1./2. Spalte, Nr. 1c, Impulserhaltungssatz

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- Die Mechanik wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (LB.05.GM.TD.01.A.L.) S. 88, 1. Spalte, Nr. 2, Energieumwandlung (Sport)

...in der Elektrodynamik

- (LB.05.GM.E.01.A.) S. 5, 1. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.05.GM.E.02.A.) S. 9, 2. Spalte, Nr. 6a,b,c, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.05.GM.E.03.A.) S. 13, 1. Spalte, Nr. 1,b, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.05.GM.E.04.A.) S. 13, 1. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.05.GM.E.05.A.) S. 13, 2. Spalte, Nr. 3c, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.05.GM.E.06.A.) S. 15, 2. Spalte, Nr. 4b,c, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.05.GM.E.07.A.) S. 25, 1. Spalte, Nr. 1c, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.05.GM.E.08.A.L.) S. 35, 1. Spalte, Nr. 7a, Energieerhaltung bei Schwingungen
- (LB.05.GM.E.09.A.) S. 39, 2. Spalte, Nr. 3a, Energieerhaltung bei Schwingungen

...in der modernen Physik

- (LB.05.GM.MP.01.A.L.) S. 63, 1. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltung bei Schwarzkörperstrahlung
- (LB.05.GM.MP.02.A.) S. 71, 1./2. Spalte, Energieerhaltung beim Photoeffekt

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.05.GM.MP.03.A.) S. 77, 2. Spalte, Nr. 1a, Energieerhaltung beim Photoeffekt
- (LB.05.GM.MP.04.A.) S. 93/94, 2./1. Spalte, Nr. 1, Erhaltung als Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- (LB.05.GM.MP.05.A.) S. 98, 1. Spalte, Nr. 1, Erhaltung als Äquivalenz zwischen Energie und Masse
- (LB.05.GM.MP.06.A.) S. 99, 1. Spalte, Nr. 4e, Energieerhaltung
- (LB.05.GM.MP.07.A.) S. 99, 2. Spalte, Nr. 4f, Energie- und Impulserhaltung

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in der Mechanik

- Die Mechanik wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- (LB.05.P.MP.01.L.) S. 73, 2. Spalte, Nr. 1d, Energieerhaltung
- (LB.05.P.MP.02.L.) S. 99, 2. Spalte, Nr. 4f, Energie- und Impulserhaltung
- (LB.05.P.MP.03.L.) S. 107, 1. Spalte, Nr. 1c, Energie- und Impulserhaltung beim β -Zerfall

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.05.P.MP.04.L.) S. 108, 2. Spalte, Nr. 2b, Energie- und Impulserhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.05.P.MP.05.L.) S. 109, 2. Spalte, Nr. 6, Energie- und Impulserhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.05.P.MP.06.L.) S. 110/111, 2./1. Spalte, Nr. 2d, Impulserhaltung als Lösungswerkzeug
- (LB.05.P.MP.07.L.) S. 112/113, 2./1. Spalte, Nr. 6a,b, Impulserhaltung als Lösungswerkzeug

5.4.5.6 Der Erhaltungsgedanke in Kuhn Physik 2 (06)

Die Erhaltung als Gesetz...

...in der Mechanik

- (LB.06.G.M.01.A.L.) S. 11, 1. Spalte, Nr. 2 (von S. 35), Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.06.G.M.02.A.) S. 12, 2. Spalte, Nr. 2 (von S. 39), Impulserhaltungssatz
- (LB.06.G.M.03.A.) S. 12, 2. Spalte, Nr. 3, Impulserhaltungssatz
- (LB.06.G.M.04.A.) S. 12/13, 2./1. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltungssatz allgemein
- (LB.06.G.M.05.A.) S. 13, 1. Spalte, Nr. 1, Impulserhaltungssatz
- (LB.06.G.M.06.A.) S. 13, 1. Spalte, Nr. 2, Impulserhaltungssatz
- (LB.06.G.M.07.A.L.) S. 13, 1. Spalte, Nr. 3, Impulserhaltungssatz (in Worten)
- (LB.06.G.M.08.A.L.) S. 13, 1./2. Spalte, Nr. 4, Impulserhaltungssatz (in Worten)
- (LB.06.G.M.09.A.L.) S. 13, 2. Spalte, Nr. 5, Impulserhaltungssatz (in Worten)

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.06.G.M.10.A.) S. 21, 1. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.06.G.M.11.A.) S. 21, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltungssatz der Mechanik
- (LB.06.G.M.12.A.) S. 25, 2. Spalte, Nr. 2, Impuls- und Energieerhaltungssatz allgemein

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (LB.06.G.TD.01.A.L.) S. 30, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltungssatz allgemein

...in der Elektrodynamik

- Als Gesetz wurde die Erhaltung nicht erwähnt

...in der modernen Physik

- (LB.06.G.MP.01.A.) S. 68, 2. Spalte, Nr. 1 (von S. 377), Energieerhaltungssatz der Mechanik

Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit...

...in der Mechanik

- (LB.06.GM.M.01.L.A.) S. 11, 2. Spalte, Nr. 3 (von S. 35), Energieerhaltung bei geneigter Ebene
- (LB.06.GM.M.02.L.A.) S. 11, 2. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung beim Pendel
- (LB.06.GM.M.03.A.) S. 11, 2. Spalte, Nr. 2 (von S. 36), Energieerhaltung bei einer Feder

Kapitel 5 Schulbuchuntersuchung zur Beschreibung des Ist-Zustandes

- (LB.06.GM.M.04.A) S. 11, 2. Spalte, Nr. 3 (von S. 36), Energieerhaltung bei einer Feder
- (LB.06.GM.M.05.A.L.) S. 12, 1. Spalte, Heimversuch, Energieerhaltung beim springenden Ball
- (LB.06.GM.M.06.A.L.) S. 12, 1. Spalte, Nr. 1, Energieerhaltung beim Motor/Auto
- (LB.06.GM.M.07.A.L.) S. 12, 1. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung beim Motor/Auto

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt.

...in der Thermodynamik

- (LB.06.GM.TD.01.A.L.) S. 27, 1. Spalte, Nr. 1, Energieumwandlung beim Verbrennungsmotor
- (LB.06.GM.TD.02.A.L.) S. 30, 1. Spalte, Nr. 2, Energieumwandlung (fallender Stein)
- (LB.06.GM.TD.03.A.L.) S. 30, 2. Spalte, Nr. 3, Energieumwandlung

...in der Elektrodynamik

- (LB.06.GM.E.01.A.) S. 40, 1. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung im elektrischen Feld
- (LB.06.GM.E.02.A.) S. 41, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.06.GM.E.03.A.) S. 41, 2. Spalte, Nr. 3, Energieerhaltung im magnetischen Feld
- (LB.06.GM.E.04.A.) S. 41, 2. Spalte, Nr. 4, Energieerhaltung im magnetischen Feld

...in der modernen Physik

- (LB.06.GM.MP.01.A.) S. 58, 2. Spalte, Nr. 2, Energieerhaltung

Die Erhaltung als Denkprinzip...

...in allgemeinen Teilen

- (06.P.A1.01.L) S. 136-137: Probleme der gegenwärtigen Energienutzung mit Energieerhaltung bedacht

...in der Mechanik

- Als Gesetzmäßigkeit wurde die Erhaltung in der Mechanik nicht erwähnt

...in der Astronomie

- Die Astronomie wurde in diesem Buch nicht behandelt

...in der Thermodynamik

- (LB.06.P.TD.01.A.L.) S. 31, 2. Spalte, Nr. 2 (von S. 131), Energieerhaltung als Lösungswerkzeug

...in der Elektrodynamik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in diesem Themengebiet nicht erwähnt.

...in der modernen Physik

- Als Denkprinzip wurde die Erhaltung in der modernen Physik nicht erwähnt.

5.4.6 Überarbeitung und Revision des Kategoriensystems und der Kategoriedefinition (7. Schritt der StIA)

Die Änderungen, die an dem Kategoriensystem durchgeführt wurden, werden hier nicht explizit erwähnt. Die in Schritt 3 bis Schritt 6 dargestellte Form des Kategoriensystems beinhaltet schon alle Änderungen, die vorgenommen wurden.

5.4.7 Ergebnisinterpretation (8. Schritt der StIA)

Das Ergebnis der Lösungsbuchanalyse wird zunächst für jede Hauptkategorie gesondert betrachtet.

5.4.7.1 Die Rolle der Erhaltung als Gesetz in den Lösungsbüchern

Das Ergebnis der Lösungsbuchanalyse bezüglich des Begriffes Gesetz ist nochmal übersichtlich in Tabelle 5.4 dargestellt⁷: In Abbildung 5.5 ist die Erwähnung der

	Metzler	Impulse	Cornelsen	Duden	Dorn Bader	Kuhn	insgesamt
Mechanik	37	13	25	8	n.b.	4	87
Astronomie	3	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.	3
Thermodynamik	0	0	1	0	0	2	3
Elektrodynamik	2	0	4	0	0	1	7
Moderne Physik	6	0	2	1	3	0	12
insgesamt	48	13	32	9	3	7	112

Tabelle 5.4: Die Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den untersuchten Lösungsbüchern (tabellarisch).

Erhaltung als Gesetz in den untersuchten Lösungsbüchern als Histogramm verdeutlicht.

Von den insgesamt 112 Erwähnungen sind 87 in der Mechanik wiederzufinden. 12 mal wird die Erhaltung als Gesetz in der modernen Physik, sieben mal in der Elektrodynamik und jeweils dreimal in der Astronomie und Thermodynamik erwähnt. Dieser Befund macht die Wichtigkeit der Erhaltung als Gesetz deutlich. Die Erhaltungssätze in ihren konkreten, fachspezifischen Formulierungen gehören für den Lernenden der Physik zu den grundlegendsten Gesetzen. Beim Lösen vieler Aufgaben wird sich dieser Sätze bedient. Auffällig ist hier wieder das deutliche Übergewicht der Mechanik im Vergleich zu den anderen Teilgebieten. Wie aber bereits gesagt wurde, deckt sich dieser Sachverhalt mit der historischen Entwicklung der Physik und der Darstellung in Kapitel 3. Die Erwähnungen in den

⁷ „n.b.“ bedeutet dabei, dass dieses Thema in dem Buch nicht behandelt wurde.

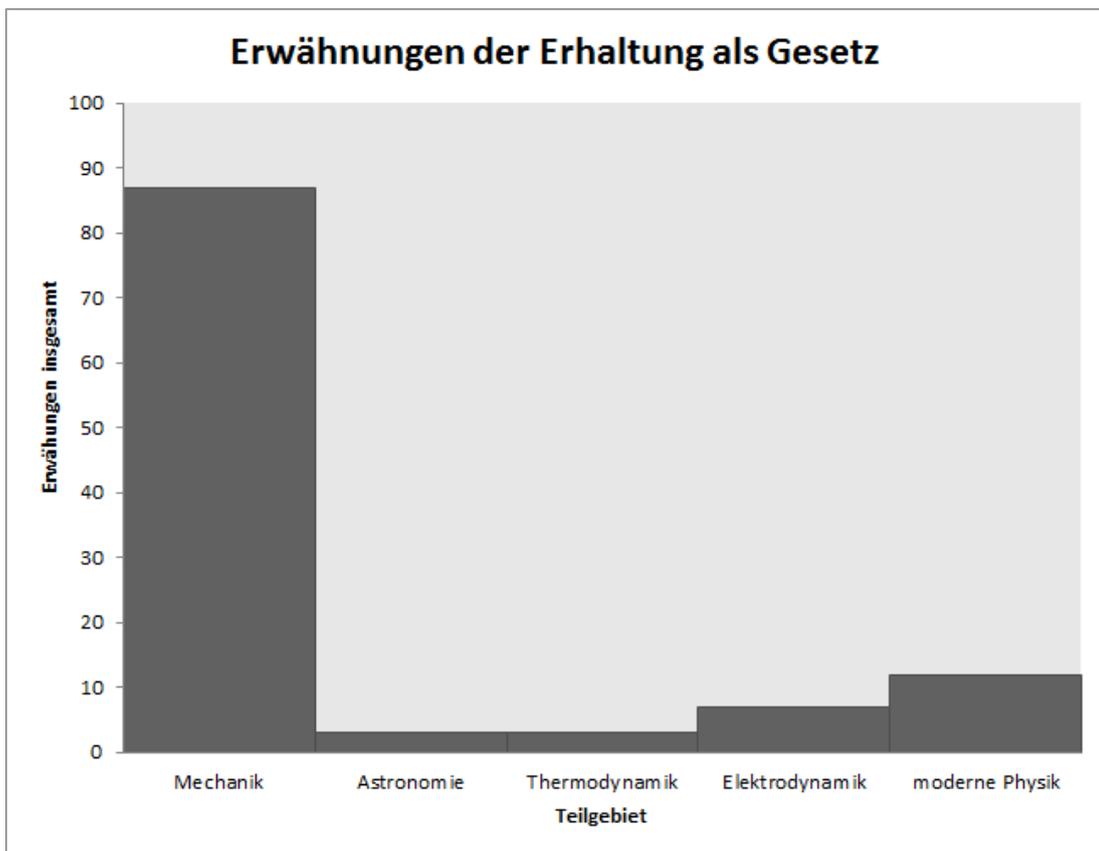


Abbildung 5.5: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den Lösungsbüchern (graphisch).

anderern Teilgebieten sind zudem für Schulbücher meist von zu hohem mathematischen Anspruch.

Damit kann die Verwendung der Erhaltung als Gesetz in den Lösungsbüchern insgesamt als ausreichend bewertet werden.

5.4.7.2 Die Rolle der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Lösungsbüchern

In Tabelle 5.5 sind die Nennungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Lösungsbüchern nochmal übersichtlich angeführt⁸: In Abbildung 5.6 ist das Ergebnis

	Metzler	Impulse	Cornelsen	Duden	Bader Bader	Kuhn	insgesamt
Mechanik	12	9	14	5	n.b.	12	52
Astronomie	1	n.b.	1	n.b.	n.b.	n.b.	2
Thermodynamik	3	0	4	4	1	1	13
Elektrodynamik	11	9	2	3	9	0	34
Moderne Physik	18	19	14	9	7	1	68
insgesamt	45	37	35	18	17	14	166

Tabelle 5.5: Die Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den untersuchten Lösungsbüchern (tabellarisch).

Lösungsbuchanalyse bezüglich dem Begriff Gesetzmäßigkeit als Histogramm illustriert. Als Gesetzmäßigkeit wird die Erhaltung in den Lösungsbüchern 166 mal erwähnt. Am häufigsten ist sie in der modernen Physik genannt (68 Fundstellen). In der Mechanik wurde sie 52 mal erwähnt, 34 mal in der Elektrodynamik, 13 mal in der Thermodynamik und nur zweimal in der Astronomie. Die häufige Erwähnung in der modernen Physik ist darauf zurückzuführen, dass viele Fundstellen sich auf Mechanik im Mikroskopischen beziehen. Positiv ist die relativ häufige Erwähnung in der Elektrodynamik hervorzuheben. Die Nennungen in der Thermodynamik erscheinen recht wenig, da doch beispielsweise der 1. Hauptsatz der Thermodynamik nichts anderes als die Erhaltung der Energie aussagt. Darauf aufbauend wird die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in der Thermodynamik recht selten verwendet.

Es lässt sich ableiten, dass beim Lösen von Aufgaben zu wenig die Verwoben-

⁸ „n.b.“ bedeutet dabei, dass dieses Thema in dem Buch nicht behandelt wurde.

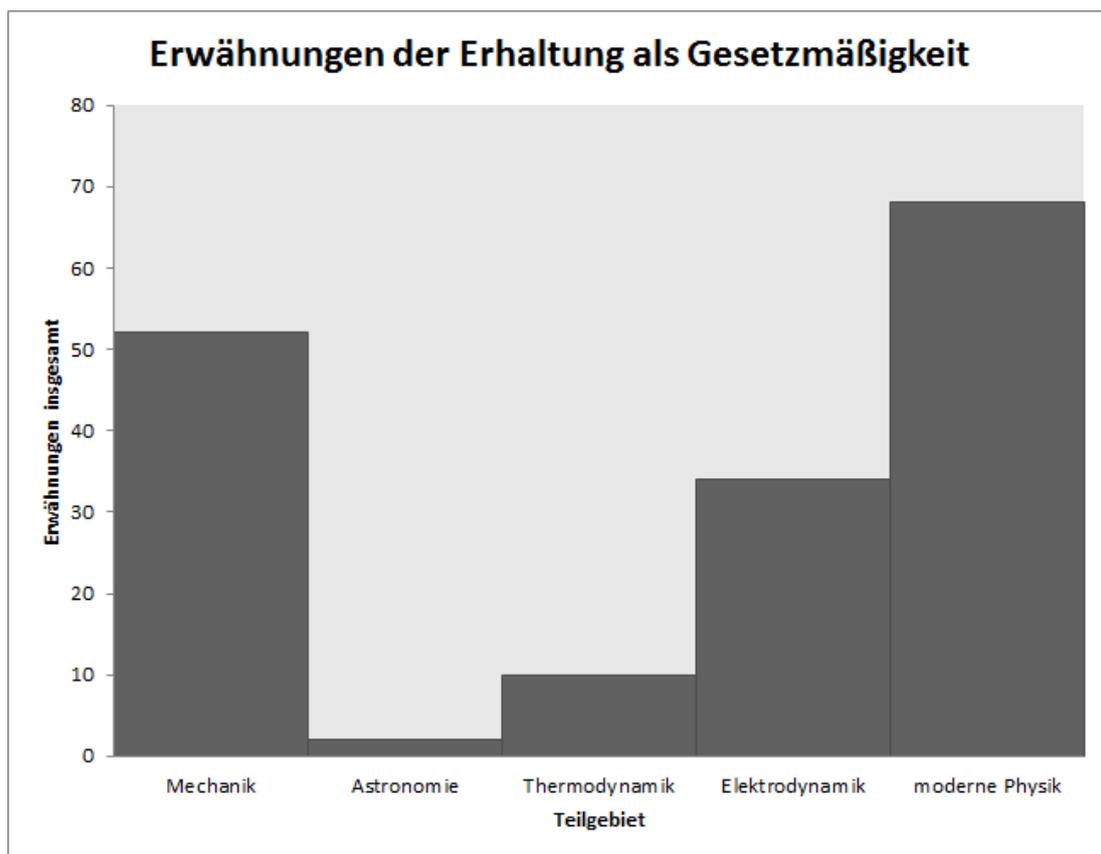


Abbildung 5.6: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Lösungsbüchern (graphisch).

heit der Physik genutzt wird. Gerade die Erhaltung bietet die Möglichkeit, ein physikalisches Problem in Analogie zu einem bekannteren oder einfacheren Teilgebiet anzugehen, bei dem die gleiche Gesetzmäßigkeit der Erhaltung gilt. Diese Möglichkeit bleibt weitestgehend ungenutzt.

5.4.7.3 Die Rolle der Erhaltung als Denkprinzip in den Lösungsbüchern

Die Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den untersuchten Lösungsbüchern ist in Tabelle 5.6 übersichtlich dargelegt⁹: In Abbildung 5.7 ist dieses

	Metzler	Impulse	Cornelsen	Duden	Dorn Bader	Kuhn	insgesamt
Mechanik	0	0	7	2	n.b.	7	16
Astronomie	1	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.	1
Thermodynamik	0	0	1	0	0	1	2
Elektrodynamik	1	0	1	0	0	1	2
Moderne Physik	0	2	10	0	7	0	19
allgemein	0	0	0	0	0	1	1
insgesamt	2	2	19	2	7	10	42

Tabelle 5.6: Die Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den untersuchten Lösungsbüchern (tabellarisch).

Resultat in Form eines Histogramms dargestellt. Insgesamt 42 mal wurde die Erhaltung als Denkprinzip in den Lösungsbüchern erwähnt. Etwa in der Hälfte der Fälle (19 mal) wurde sie in der modernen Physik genannt. Die Mechanik weist 16 Fundstellen auf, die Thermodynamik zwei, Elektrodynamik drei und die Astronomie eine. Einmal ist die Erhaltung als Denkprinzip in einem allgemeinen Teil des Buches erwähnt. Gerade der Charakter des Problemlösewerkzeugs der Erhaltung sollte eine hohe Anzahl von Nennungen in den Lösungsbüchern vermuten lassen. Diese fällt mit 42 Fundstellen aber sehr ernüchternd aus. Dieser Sachverhalt erhärtet die Hypothese, dass die Erhaltung als Denkprinzip kaum bekannt ist, und damit auch ungenutzt bleibt. Gewisse Ansätze sind nur in der Mechanik (oder bei mechanischen Problemen, wie in der modernen Physik) zu erkennen. In anderen Teilgebieten bleibt die Erhaltung als Problemlösewerkzeug unerwähnt.

⁹ „n.b.“ bedeutet dabei, dass dieses Thema in dem Buch nicht behandelt wurde.

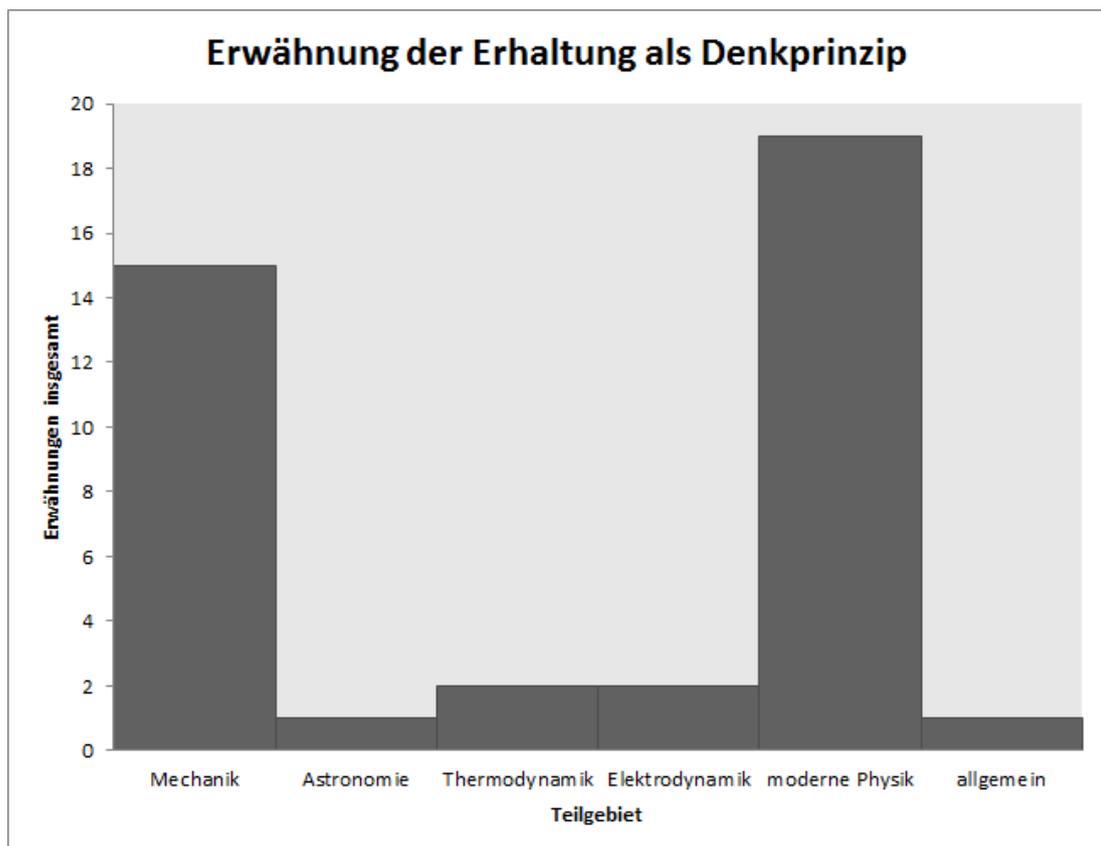


Abbildung 5.7: Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den Lösungsbüchern (graphisch).

5.4.7.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Setzt man insgesamt die 319 Fundstellen in Relation zu der Anzahl der in den Lösungsbüchern besprochenen Aufgaben, so wird deutlich, dass Lösungsansätze nicht so häufig auf der Grundlage des Erhaltungsgedankens erfolgen. Beim Lösen mechanischer Fragestellungen ist die Erhaltung vielleicht noch in ausreichendem Maße zu finden, das jedoch meist in der Form konkreter Gesetze. Die vielen Verflechtungen der Physik bleiben beim Lösen der Aufgaben unbeachtet. Dadurch wird der Beitrag, den die Bearbeitung von Aufgaben zur Strukturierung und Vernetzung der Wissens Elemente leisten soll, außer Acht gelassen.

Aber noch deutlicher anzumerken ist der Sachverhalt, dass die von den Lösungsbüchern vorgegebenen Lösungen kaum einen Beitrag zur Verinnerlichung der grundlegenden physikalischen Ideen, und damit zur Förderung physikalischen Denkens leisten. Selbstständiges und kreatives Lösen von Problemen ist das erklärte Ziel der Schulphysik. Der Weg dahin bleibt aber, zumindest was die ureigenen Arbeitsmittel der Physik betrifft, unbeschritten. Es wird sich beim Bearbeiten von Aufgaben mit allgemeinen heuristischen Prinzipien begnügt. Die physikspezifischen Problemlösewerkzeuge, die viel zugeschnittener sind, bleiben unberührt im „Werkzeugkasten“ des physikalischen Denkens.

Kapitel 6

Ergebnisse und Empfehlungen

Die Ergebnisse der Arbeit werden nachfolgend als Antworten auf die eingangs gestellten Forschungsfragen zusammengefasst. Dabei sollen auch Empfehlungen und Ausblicke formuliert werden.

- **(F1) Welche Rolle spielt die Erhaltung als Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkprinzip im Rahmen der Entwicklung der Fachsystematik der Physik?**

Dieser Frage wird in Kapitel 3 nachgegangen. Die Antwort umfasst folgende drei Teilaspekte:

- Es wird gezeigt, dass die Erhaltung in vielen Gesetzen der Physik von Bedeutung ist. Unter dem Begriff „Gesetz“ ist in der vorliegenden Arbeit die physikalische Beschreibung eines Naturphänomens mit begrenztem Gültigkeitsbereich gemeint. Eine Vielzahl solcher Gesetze sind Erhaltungsgesetze. Dabei treten Erhaltungsgesetze in unterschiedlichen Teilgebieten der Physik in unterschiedlicher Gestalt auf, auch wenn sie sich auf dieselbe Erhaltungsgröße beziehen. So gibt es beispielsweise nahezu für jedes Teilgebiet der Physik eine konkrete Gesetzesformulierung, die sich auf die Erhaltungsgröße Energie bezieht ($E_{kin} = E_{pot}$, $dU = \delta Q + \delta W$, Poynting'scher Satz,...).
- Desweiteren wird in der Arbeit festgestellt, dass die Erhaltung neben den konkreten Nennungen als Gesetz auch als allgemeingültige Regel-

mäßigkeit der Physik zu verstehen ist. Solche universellen Regelmäßigkeiten werden in dieser Arbeit „Gesetzmäßigkeiten“ genannt. Sie stellen die Grundlage konkret formulierter Gesetze dar. In Kapitel 3 wird gezeigt, dass die Erhaltung als eine solche Gesetzmäßigkeit aufzufassen ist. Viele Gesetze und Phänomene der Physik, die auf den ersten Blick nichts mit Erhaltung zu tun haben, lassen sich auf die Gesetzmäßigkeit der Erhaltung zurückführen. Die Betonung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit ermöglicht ein tieferes Verständnis der Phänomene und eine strukturierte Übersicht über die Fülle physikalischer Gesetze.

- Durch die besondere Betonung der historischen Entwicklung der Fachsystematik der Physik wird in Kapitel 3 die Rolle der Erhaltung als Denkprinzip hervorgehoben. Der Begriff des „Denkprinzips“ fasst in dieser Arbeit erkenntnisleitende Ideen der geschichtlichen Entwicklung der Physik und auch den pragmatischen Aspekt des Lösungswerkzeugs zusammen. Es wird gezeigt, dass sich die Erhaltung in der Geschichte der unterschiedlichen Teilgebiete der Physik als eine solche erkenntnisleitende Idee erwiesen hat. Durch die Beispielaufgaben in Abschnitt 4.2.5 wird nachgewiesen, dass sich die Erhaltung als physikalisches Denkschemata beim kreativen Problemlösen in der Physik als zielführend erweist. Dabei wird besonders betont, dass es sich beim Gebrauch der Erhaltung als Denkprinzip um mehr als ein allgemeines heuristisches Prinzip handelt. Das Denkprinzip der Erhaltung stellt ein physikspezifisches Lösungswerkzeug dar.

Diese Resultate eröffnen neue Forschungsfragen für die Physikdidaktik. Die Physik wurde in dieser Arbeit bezüglich der Begriffe Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkprinzip am Beispiel der Erhaltung systematisch durchgesehen. Diese Herangehensweise an die Physik kann auch mit anderen Prinzipien der Physik umgesetzt werden. Betrachtungen dieser Art würden sich für die Ausarbeitung einer fachspezifischen Heuristik als nützlich erweisen, denn aus den Leitideen der Geschichte der Physik lassen sich wichtige Denkwerkzeuge für das Problemlösen im Physikunterricht gewinnen.

- **(F2) Welchen Beitrag kann die Erhaltung zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses von Physik im Physikunterricht leisten?**

In der Arbeit wird gezeigt, dass sich das konzeptionelle Verständnis in drei Ebenen einteilen lässt (Abbildung 1.3). Die Kenntnis der Gesetze, Begriffe, Phänomene usw. macht die unterste Stufe des konzeptionellen Verständnisses aus.

Die zweite Stufe wird an dem tieferen Verständnis der Physik ausgemacht. Verständnis meint dabei, dass man hinter der Fülle von Gesetzen, Phänomenen usw. grundlegende Regelmäßigkeiten (oder, mit dem Vokabular dieser Arbeit ausgedrückt, - Gesetzmäßigkeiten) erkennt. Diese Stufe des konzeptionellen Verständnisses ist durch den sinnvoll strukturierten Überblick über die Physik gekennzeichnet.

Über dieses vernetzte Verständnis der Physik hinausgehend ergibt sich die dritte Stufe des konzeptionellen Verständnisses als Ebene des physikalischen Denkens. Diese umfasst das selbständige und kreative Herleiten, Argumentieren und Problemlösen mithilfe physikalischer Denkprinzipien.

Die Übergänge zwischen diesen Ebenen sollen besonders betont werden:

Übergang von der ersten zur zweiten Ebene: Dieser erfolgt durch die Strukturierung und Vernetzung des Fachwissens. Eine solche Systematisierung geschieht durch die bewusste Betonung allgemeingültiger Regelmäßigkeiten der Physik. In den Bildungsstandards werden Basiskonzepte zur Bewältigung dieses Übergangs vorgeschlagen, in der vorliegenden Arbeit liegt die Betonung auf den Grundkonzepten der Physik in Form allgemeingültiger Gesetzmäßigkeiten.

Übergang von der zweiten zur dritten Ebene: Lernende gelangen durch das Verinnerlichen der Leitideen der Physik zum physikalischen Denken. Leider findet dieser Übergang nur selten Betonung. So ist beispielsweise in den Bildungsstandards zwar die Rede von Problemlösen und Erkenntnisgewinnung, das jedoch nur im allgemein heuristischen Sinne. Von fachspezifischen „Werkzeugen“, die zur Erkenntnisgewinnung und Problem-

lösung genutzt werden können, ist nicht die Rede. Das Verinnerlichen der Leitideen der Physik ist auf unterschiedlichen Wegen möglich. Diese umfassen im Schulunterricht vor allem das Lernen aus der Physikgeschichte und das Üben entsprechender Aufgaben.

Angelehnt an dieses Modell des konzeptionellen Verständnisses können die weiteren Ergebnisse der Arbeit wie folgt formuliert werden:

- In Abschnitt 4.1 wird aufgewiesen, wie bei Lernenden durch die Betonung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit im Physikunterricht der Übergang von der ersten zur zweiten Stufe des konzeptionellen Verständnisses erfolgen kann. Die Erhaltung als Gesetzmäßigkeit ermöglicht Querverbindungen zwischen den einzelnen Teilgebieten der Physik und ermöglicht so vernetztes Lernen (wie es die Theorie des sinnvollen Lernens von Ausubel fordert). Dadurch, dass sich eine Vielzahl von Gesetzen, Phänomenen usw. auf die Gesetzmäßigkeit der Erhaltung zurückführen lassen, wird das Theoriegeflecht der Physik systematisiert und strukturiert. Dabei wird auch darauf hingewiesen, dass Gesetzmäßigkeiten wie die Erhaltung eine wichtige Grundlage für Analogiebetrachtungen darstellen können. Zur möglichen Umsetzung wird der Entwurf einer Unterrichtsreihe zum elektrischen Feld angefügt.
- Dass die Vermittlung der Erhaltung als Denkprinzip die Verinnerlichung einer Leitidee der Physik darstellt - und damit zum Übergang von der zweiten zur dritten Stufe des konzeptionellen Verständnisses beiträgt -, wird in Abschnitt 4.2 gezeigt. Die erkenntnisleitende Funktion der Erhaltung offenbart sich nicht nur an zahlreichen Beispielen aus der Physikgeschichte, sondern wird auch an vielen offenen Aufgaben, wie sie in 4.2.5 erwähnt werden, verdeutlicht.

Auch diese Ergebnisse regen zu neuen Fragestellungen der physikdidaktischen Forschung an. So würde z.B. die empirische Untersuchung des konzeptionellen Verständnisses bei Schülerinnen und Schülern, Lehrerinnen und Lehrern oder Physik-Lehramtsstudentinnen und -studenten eine lohnenswerte Forschungsaufgabe darstellen. Dazu müsste ein Verfahren entwickelt

und erprobt werden, das die Verwobenheit des physikalischen Wissens und die Fähigkeit physikalische Leitideen in einem physikalisch-kreativem Denken selbstständig anzuwenden erfasst.

Desweiteren wäre es interessant zu überprüfen, ob die Betonung der Erhaltung über einen längeren Zeitraum zu einem Fortschritt des konzeptionellen Verständnisses führt.

- **(F3) Wird der Erhaltung in den Physikbüchern für die gymnasiale Oberstufe eine hinreichende Bedeutung zur Förderung des konzeptionellen Verständnisses der Physik beigemessen?**

Diese Frage wird mit einer qualitativen Inhaltsanalyse von Schulbüchern in Kapitel 5 beantwortet. Wie wir aus der fachlichen und historischen Betrachtung sehen, ist es sinnvoll, die Bedeutung der Erhaltung in der Physik bezüglich der Begriffe Gesetz, Gesetzmäßigkeit und Denkprinzip zu unterteilen. Entsprechend dieser Unterteilung werden nachfolgend die Ergebnisse der Schul- und Lösungsbuchanalyse separat verfasst.

- Als Gesetz wird die Erhaltung in den schultypischen Formen - d.h. soweit der mathematische Rahmen des Schulniveaus es ermöglicht - hinreichend erwähnt. In der Mechanik wird die Erhaltung am häufigsten genannt. Dieser Umstand deckt sich mit der historischen Entwicklung der Physik und spiegelt sich auch in der fachlichen Betrachtung dieser Arbeit wider (Kapitel 3).
- Die Schulbuchanalyse ergibt, dass viele Möglichkeiten physikalische Inhalte durch die Betonung der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit zu vernetzen und zu strukturieren in den Schulbüchern ungenutzt bleiben. Als Gesetzmäßigkeit findet die Erhaltung meist nur in der Mechanik und in der modernen Physik Erwähnung.
- Als Denkprinzip wird die Erhaltung nahezu ausschließlich in der Mechanik verwendet. Das hat auch die Analyse der Lösungsbücher bestätigt. In anderen Teilgebieten der Physik kommt dieses effiziente „Werk-

Kapitel 6 Ergebnisse und Empfehlungen

zeug“ praktisch gar nicht zum Einsatz.

Dieses Ergebnis regt dazu an, die in dieser Arbeit vorgestellten didaktischen Schwerpunktsetzungen bei der zukünftigen Entwicklung von Lehrmaterial verstärkt zu betonen.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Das zugrundeliegende Verständnis von Didakik der Physik	9
1.2	Die Dimensionen des Kompetenzmodells	10
1.3	Hierarchie des konzeptionellen Verständnisses von Physik	13
2.1	Das T-E-M-Diagramm nach Holton	20
2.2	Zur Verdeutlichung der Definition von Gesetzmäßigkeit	25
3.1	Die geneigte Ebene	40
3.2	Galileis Pendelversuch	41
3.3	Zur Geometrie einer Ellipse	47
3.4	Das zweite keplersche Gesetz	49
3.5	Swing-by-Manöver am Jupiter	50
3.6	Beispiel zur Knotenregel	65
3.7	Beispiel zur Maschenregel	65
3.8	Die Energieerhaltung als Grundlage zahlreicher Gesetze der Physik	88
4.1	Der schematische Aufbau einer kognitiven Struktur	93
4.2	Die Ebenen der Verknüpfungen eines bekannten Wissensgebiets mit einem Unbekannten	104
4.3	Skizze zur Aufgabe zum elektrischen Feld	114
4.4	Ein Modell des wissenszentrierten Problemlösens	125
4.5	Die Erhaltung im Modell des wissenszentrierten Problemlösens . .	127
5.1	Ablaufplan der strukturierenden Inhaltsanalyse	141
5.2	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den Schulbüchern (graphisch)	168

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

5.3	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Schulbüchern (graphisch)	170
5.4	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den Schulbüchern (graphisch)	172
5.5	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den Lösungsbüchern (graphisch)	206
5.6	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Lösungsbüchern (graphisch)	208
5.7	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den Lösungsbüchern (graphisch)	210

Tabellenverzeichnis

2.1	Erkenntnisleitende Ideen als Gemeinsamkeit aller wissenschaftstheoretischen Sichtweisen auf die Physik	23
4.1	Analogien auf der Grundlage der Erhaltung	103
4.2	Handreichungen zum Thema „Das elektrische Feld“ des Kultusministeriums des Landes Hessen für den Physik-Leistungskurs der Klasse 12	107
4.3	Lernsequenzabfolge der Unterrichtseinheit zum elektrischen Feld .	108
4.4	Masse und Ladung als fundamentale Eigenschaften der Materie .	109
4.5	Die Analogie zwischen Coulombgesetz und Gravitationsgesetz . .	110
4.6	Die Analogie zwischen den Begriffen zur mathematischen Beschreibung des elektrischen Feldes und des Gravitationsfeldes	113
4.7	Die Analogie zwischen einem Kondensator als Energiespeicher und einer Feder als Energiespeicher	117
4.8	Die Analogie zwischen Ladung und Masse zur Beschreibung elektrischer Netzwerke	118
5.1	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den Schulbüchern (tabellarisch)	167
5.2	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den Schulbüchern (tabellarisch)	169
5.3	Die Anzahl der jeweiligen Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den Schulbüchern (tabellarisch)	171
5.4	Die Erwähnungen der Erhaltung als Gesetz in den untersuchten Lösungsbüchern (tabellarisch)	205

TABELLENVERZEICHNIS

5.5	Die Erwähnungen der Erhaltung als Gesetzmäßigkeit in den untersuchten Lösungsbüchern (tabellarisch)	207
5.6	Die Erwähnungen der Erhaltung als Denkprinzip in den untersuchten Lösungsbüchern (tabellarisch)	209

Literaturverzeichnis

- [Kernlehrplan 12.03.2007] : *Kernlehrplan für das Fach Physik: für die Jahrgangsstufen 5-10 in Realschulen: Entwurfsfassung der Lehrplangruppen.* 12.03.2007
- [Ausubel 1978] AUSUBEL, David P.: *Educational Psychology: A Cognitiv View.* 1. New York : Holt, Rinehart and Wilson, 1978
- [Bacher 2003] BACHER, Arntraud H.: *Untersuchung und Vorschläge zum schülerorientierten Astronomieunterricht an gymnasialen Oberstufen.* Innsbruck, Leopold-Franzens-Universität, Dissertation, 2003
- [Bader und Dorn 2010a] BADER, Franz ; DORN, Friedrich: *Physik.* [Hessen, Nordrhein-Westfalen], Gymnasium, Sek II, Dr. A 1. Braunschweig : Schroedel, 2010. – ISBN 9783507107724-
- [Bader und Dorn 2010b] BADER, Franz ; DORN, Friedrich: *Physik: Gymnasium SEK II: Lösungen.* 1. Braunschweig : Schroedel, 2010. – ISBN 9783507107588
- [Bang und Euler 2001] BANG, Gunter ; EULER, Leonard: *Physik: Lösungen mit CD-Rom.* 1. Aufl., Dr. 1. Braunschweig : Westermann, 2001. – ISBN 9783141591415
- [Bang und Kuhn 2001] BANG, Gunter ; KUHN, Wilfried: *Physik.* Neubearb., 1. Aufl., [2. Dr.]. Braunschweig : Westermann, 2001. – ISBN 3141521417
- [Bergmann u. a. 1990] BERGMANN, Ludwig ; SCHÄFER, Clemens ; KASSING, Rainer ; BLÜGEL, Stefan ; GOBRECHT, Heinrich: *Lehrbuch der Experimentalphysik: Zum Gebrauch bei akademischen Vorlesungen und zum Selbststudium.* 10. Berlin [u.a.] : de Gruyter, 1990. – ISBN 3110123916

LITERATURVERZEICHNIS

- [Bernoulli 1738] BERNOULLI, Daniel: *Hydrodynamica*. Straßburg, 1738
- [Bohr 1923] BOHR, Niels: Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau. In: *Zeitschrift für Physik* (1923), Nr. 13, S. 117–165
- [Bohr 1925] BOHR, Niels: Über die Wirkung von Atomen bei Stößen: Nachschrift. In: *Zeitschrift für Physik* (1925), Nr. 34, S. S.154–157
- [Bohr 1927] BOHR, Niels: *Fundamental problems of the quantum theory: Manuscript vom 13.09.1927*. Kopenhagen : Niel Bohr Archiv, 1927 (Sources of History of Quantum Physics)
- [Born 1926] BORN, Max: Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge. In: *Zeitschrift für Physik* (1926), Nr. 37, S. 862–867
- [Born u. a. 1925] BORN, Max ; HEISENBERG, Werner ; JORDAN PASCUAL: Zur Quantenmechanik. In: *Zeitschrift für Physik* (1925), Nr. 31, S. 411–430
- [Brandt Siegmund und Dahmen Hans 1986] BRANDT SIEGMUND UND DAHMEN HANS: *Physik: Eine Einführung in Experiment und Theorie*. Bd. 2. 2. New York and Berlin and Heidelberg : Springer Verlag, 1986
- [Bredthauer 2010] BREDTHAUER, Wilhelm: *Impulse Physik*. Stuttgart : Klett, 2010. – ISBN 9783127726008
- [Bredthauer u. a. 2010] BREDTHAUER, Wilhelm ; BRUNS, Klaus G. ; DORN, Hans-Jerg: *Impulse Physik - Oberstufe: Lehrerband mit DC_ROM*. 1. Stuttgart and Leipzig : Klett, 2010. – ISBN 9783127726091
- [Broglie 1924] BROGLIE, Louis d.: *Annales des Physique*. Bd. 3: *Recherches sur la Theorie des Quanta: Dissertation*. Paris, 1924
- [Bund-Länder Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) 1997] BUND-LÄNDER KOMMISSION FÜR BILDUNGSPLANUNG UND FORSCHUNGSFÖRDERUNG (BLK): *Gutachten zur Vorbereitung des Programms zur Steigerung der Effizienz des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts: Materialien zur Bildungsplanung und Forschungsförderung*. 1997

LITERATURVERZEICHNIS

- [Carnot 1850] CARNOT, Sadi: *Oswalds Klassiker der Physik*. Bd. 79: *Betrachtungen die Bewegende Kraft des Feuers*. Leipzig : Engelmann Verlag, 1850. – ISBN 114864699X
- [Carnot 1872] CARNOT, Sadi: *Réflexion sur la puissance motorice du feu. Ser.II*. Gauthier-Villars, 1872 (Annalen scientifique de l'école normale supérieure)
- [Clausius 1850] CLAUSIUS, Rudolf: *Pogendorfs Annalen der Physik*. Bd. 79: *Über die bewegende Kraft der Wärme*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1850
- [Clausius 1857] CLAUSIUS, Rudolf: *Pogendorfs Annalen der Physik*. Bd. 100: *Über die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1857
- [Clausius 1865] CLAUSIUS, Rudolf: *Pogendorfs Annalen der Physik*. Bd. 100: *Über die verschiedenen für die Anwendung bequeme Formen der mechanischen Wärmetheorie*. Verlag Johann Ambrosius Barth, 1865
- [Demtröder 1995] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Bd. 2. 1. New York and Berlin and Heidelberg : Springer Verlag, 1995
- [Diehl 2008] DIEHL, Bardo: *Gesamtband Oberstufe - mit DVD-ROM*. 9. Aufl. Berlin : Cornelsen, 2008 (Physik Oberstufe - Neue Ausgabe). – ISBN 9783060130061
- [Diehl 2009] DIEHL, Bardo: *Physik Oberstufe: Handreichungen für den Unterricht: Gesamtband*. Berlin : Cornelsen, 2009. – ISBN 9783060130078
- [Dirac 1930] DIRAC, Paul: *Proceedings of the Royal Society*. Bd. 126: *A Theory of Electrons and Protons: Series A*. London : The Royal Society, 1930
- [Duhem 1908] DUHEM, Pierre: *Ziel und Struktur der physikalischen Theorien*. Leipzig, 1908

LITERATURVERZEICHNIS

- [Duit und Glynn 1995] DUIT, Reinders ; GLYNN, Shawn: Analogien - Brücken zum Verständnis. In: *Naturwissenschaften im Unterricht. Physik* 6 (1995), Nr. 27, S. 4–10
- [Ebeling und Feistel Rainer 1994] EBELING, Werner ; FEISTEL RAINER: *Chaos und Kosmos: Prinzipien der Evolution*. Heidelberg and Berlin and Oxford : Spektrum Akademischer Verlag, 1994
- [Edelmann 2000] EDELMANN, Walter: *Lernpsychologie: [Lehrbuch]*. 6. Weinheim : Beltz, PVU, 2000. – ISBN 3621274650
- [Eigler u. a. 1975] EIGLER, Gunther ; JUDITH, Heiko ; KÜNZEL, Marianne ; SCHÖNWÄLDER, Anke: *Grundkurs Lehren und Lernen*. Weilheim und Basel : Beltz Verlag, 1975
- [Einstein 1905a] EINSTEIN, Albert: *Annalen der Physik*. Bd. 17: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energiegehalt abhängig?* Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1905
- [Einstein 1905b] EINSTEIN, Albert: *Annalen der Physik*. Bd. 17: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1905
- [Einstein 1905c] EINSTEIN, Albert: *Annalen der Physik*. Bd. 17: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1905
- [Einstein 1907] EINSTEIN, Albert: *Annalen der Physik*. Bd. 23: *Die vom Relativitätsprinzip geforderte Trägheit der Energie*. 1907
- [Euler 1769] EULER, Leonard: *Briefe an eine deutsche Prinzessin: Über verschiedene Gegenstände aus der Physik und Philosophie: Aus dem Französischen übersetzt. Zweyter Teil*. Leipzig : Johann Friedrich Junius, 1769
- [Falk und Ruppel 1983] FALK, Gottfried ; RUPPEL, Wolfgang: *Mechanik, Relativität, Gravitation: Die Physik des Naturwissenschaftlers ; ein Lehrbuch*. 3. Berlin [u.a.] : Springer, 1983. – ISBN 3-540-12086-6

LITERATURVERZEICHNIS

- [Fleck 1980] FLECK, Ludwig: *Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache: Einf. in d. Lehre von Denkstil u. Denkkollektiv*. 1. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1980. – ISBN 3518079123
- [Franck und Jordan Pascual 1926] FRANCK, James ; JORDAN PASCUAL: *Anregung von Quantensprüngen durch Stöße*. Berlin : 6, 1926
- [Grehn und Krause 2009a] GREHN, Joachim ; KRAUSE, Joachim: *Metzler Physik*. 4. Aufl., Dr. A 3. Braunschweig : Schroedel, 2009. – ISBN 9783507107106
- [Grehn und Krause 2009b] GREHN, Joachim ; KRAUSE, Joachim: *Metzler Physik: Lösungen*. [Zur 4. Aufl.], Dr. A,1. Braunschweig : Schroedel, 2009. – ISBN 9783507107113
- [Greiner 1978] GREINER, Walter: *Theoretische Physik: Klassische Elektrodynamik*. Bd. 3. 2. Thun : Harri Deutsch, 1978
- [Grosser 1970] GROSSER, Morton: *Entdeckung des Neptun*. Frankfurt a.M. : Suhrkamp, 1970
- [Häußler und Lind 2000] HÄUSSLER, Peter ; LIND, Gunter: Aufgabenkultur - Was ist das? In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 49 (2000), Nr. 4, S. 2–7
- [Heisenberg 1925] HEISENBERG, Werner: Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen. In: *Zeitschrift für Physik* (1925), Nr. 33
- [Helmholtz 07.02.1984] HELMHOLTZ, Hermann: *Über die Wechselwirkung der Naturkräfte und die darauf bezüglichen neuesten Ermittlungen der Physik*. 07.02.1984
- [Helmholtz 1871] HELMHOLTZ, Hermann: *Über die Entstehung des Planetensystems*. 1871
- [Helmholtz 1902] HELMHOLTZ, Hermann: *Oswalds Klassiker der Physik*. Bd. 1: *Über die Erhaltung der Kraft*. Leipzig : Engelmann Verlag, 1902

LITERATURVERZEICHNIS

- [Hermann 1969] HERMANN, Armin: *Frühgeschichte der Quantentheorie: (1899 - 1913): Zugl.: München, Univ., Habil.-Schr., 1968.* Mosbach in Baden : Physik-Verl., 1969
- [Hermann 1972] HERMANN, Armin: *Lexikon Geschichte der Physik A - Z: Biographien Sachwörter Originalschriften und Sekundärliteratur.* Köln : Aulis-Verlag Deubner, 1972
- [Hessisches Kultusministerium 2011] HESSISCHES KULTUSMINISTERIUM: *Handreichungen: Physik.* 2011. – URL http://www.hessen.de/irj/HKM_Internet?cid=1758bb47f59d5b6e239c270b9abe5437
- [Holton 1981] HOLTON, Gerald: *Thematische Analyse der Wissenschaft.* 1. Frankfurt a.M. : Suhrkamp Taschenbuch Verlag, 1981
- [Holton 1984] HOLTON, Gerald: *Zur Ideengeschichte der Physik.* Braunschweig : Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft, 1984
- [Hübner 1978] HÜBNER, Kurt: *Kritik der wissenschaftlichen Vernunft.* 1. Freiburg [Breisgau] and München : Alber, 1978. – ISBN 978-3495473849
- [Hund 1972] HUND, Friedrich: *Geschichte der physikalischen Begriffe.* Mannheim : Bibliographisches Institut AG, 1972
- [Jammer 1964] JAMMER, Max: *Der Begriff der Masse in der Physik.* Darmstadt, 1964
- [Kilian und Weber 2000] KILIAN, Ulrich ; WEBER, Christine: *Lexikon der Physik: Kil.* Bd. 4. Heidelberg : Spektrum Akademischer Verlag, 2000
- [Kittel u. a. 1973] KITTEL, C. ; KNIGHT, W. D. ; RUDERMAN, M. A.: *Mechanik.* Braunschweig : Vieweg, 1973. – ISBN 3528083514
- [Kuhn 1977] KUHN, Thomas S.: *Die Entstehung des Neuen: Studien zur Struktur d. Wissenschaftsgeschichte.* 1. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1977. – ISBN 978-3518278369

LITERATURVERZEICHNIS

- [Kuhn 1996] KUHN, Thomas S.: *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. 13. Aufl., 2., rev. und um d. Postskriptum von 1969 erg. Aufl. Frankfurt am Main : Suhrkamp, 1996. – ISBN 978-3518276259
- [Kuhn 1984] KUHN, Wilfried (Hrsg.): *Didaktik der Physik: Vorträge: Physiker-tagung 1984 Münster*. Gießen : Gahmig Verlag, 1984
- [Kuhn 1994] KUHN, Wilfried: Analogien in historischer, methodologischer und didaktischer Sicht. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 43 (1994), Nr. 5, S. 2–16
- [Kuhn 1997] KUHN, Wilfried (Hrsg.): *Die erkenntnisleitende Funktion von Analogien in Forschung und Lehre*. 1997
- [Kuhn 2000] KUHN, Wilfried: Das didaktische Potential der Physikgeschichte. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 49 (2000), Nr. 3, S. 30–37
- [Kuhn 2001] KUHN, Wilfried: *Ideengeschichte der Physik: Eine Analyse der Entwicklung der Physik im historischen Kontext*. 1. Braunschweig and Wiesbaden : Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft, 2001
- [Kuhn und Schirra 1990] KUHN, Wilfried ; SCHIRRA, Norbert: Die Entwicklung des Energiebegriffs und seines Erhaltungskonzepts. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 39 (1990), Nr. 2, S. 27–32
- [Kultusministerkonferenz 1989] KULTUSMINISTERKONFERENZ: *Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik: i.d.F. vom 05.02.2004*. 1989. – URL www.kmk.org/fileadmin/.../1989/1989_12_01-EPA-Physik.pdf. – Zugriffsdatum: 01.06.2012
- [Lakatos u. a. 1982] LAKATOS, Imre ; WORRALL, John ; CURRIE, Gregory: *Philosophische Schriften*. Braunschweig : F. Viewag, 1982. – ISBN 3528084294
- [Lenk und Gellert 1974] LENK, Richard ; GELLERT, Walter: *Fachlexikon ABC Physik*. Bd. 2. Zürich und Frankfurt a.M. : Harri Deutsch, 1974
- [Lüscher 1966] LÜSCHER, Edgar: *Experimentalphysik II: Elektromagnetische Vorgänge*. Mannheim : Hochschultaschenbücher-Verlag, 1966

LITERATURVERZEICHNIS

- [Maxwell 1867] MAXWELL, James: *On the dynamical theory of gases*. London : Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1867
- [Maxwell 1873] MAXWELL, James: *Treatise in Electricity and Magnetism*. Oxford : Oxford university press, 1873
- [Mayring 2008] MAYRING, Philipp: *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken*. 10., neu ausgestattete Aufl., Dr. nach Typoskr. Weinheim : Beltz, 2008 (Beltz Pädagogik). – URL <http://www.socialnet.de/rezensionen/isbn.php?isbn=978-3-407-25501-3>. – ISBN 9783407255013
- [Meyer und Hoche 2003] MEYER, Lothar ; HOCHÉ, Detlef: *Physik - Gymnasiale Oberstufe*. 1. Aufl., [Nachdr.]. Berlin : Duden-Paetec-Schulbuchverl., 2003. – ISBN 9783898183116
- [Meyer und Hoche 2004] MEYER, Lothar ; HOCHÉ, Detlef: *Physik: Lehrermaterial: Gymnasiale Oberstufe*. 1. Berlin : Duden-Paetec-Schulbuchverl., 2004
- [Minkowski 1958] MINKOWSKI, Hermann: *Raum und Zeit: in: Das Relativitätsprinzip*. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1958
- [Müller 2001] MÜLLER, Rainer: Fermiaufgaben als Beitrag zur Aufgabekultur. In: *Praxis der Naturwissenschaften - Physik* 50 (2001), Nr. 8, S. 2–7
- [Müller 2010] MÜLLER, Rainer: *Klassische Mechanik: Vom Weitsprung zum Marsflug*. 2. Berlin [u.a.] : de Gruyter, 2010. – ISBN 9783110250022
- [Olechowski und Garnitsching 1999] OLECHOWSKI, R. (Hrsg.) ; GARNITSCHING, K. (Hrsg.): *Humane Schule*. Frankfurt a.M., 1999
- [Pfaü 2011] PFAU, Werner (.: *Handbuch der experimentellen Physik*. Köln : Aulis-Verlag Deubner, 2011. – ISBN 9783761423967
- [Planck 1958] PLANCK, Max: *Physikalische Abhandlungen und Vorträge*. Braunschweig : Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft, 1958
- [Popper 1994] POPPER, Karl R.: Logik der Forschung. In: *Logik der Forschung, von Karl R. Popper* 4 (1994). – URL <http://www.gbv.de/dms/hebis-mainz/toc/028036662.pdf>

LITERATURVERZEICHNIS

- [Popper 2009] POPPER, Karl R.: *Vermutungen und Widerlegungen: Das Wachstum der wissenschaftlichen Erkenntnis*. 2. Tübingen : Mohr Siebeck, 2009. – ISBN 978-3-16-149395-9
- [Popper und Hansen 1979] POPPER, Karl R. ; HANSEN, Troels E.: *Die beiden Grundprobleme der Erkenntnistheorie: Aufgrund von Ms. aus d. Jahren 1930-1933*. Tübingen : Mohr, 1979. – ISBN 978-3168382119
- [Poynting 1855] POYNTING, John: *On the Transfer of Energy in Electromagnetic Field*. Bd. 175. London : Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1855
- [Rauch und Wurster 1997] RAUCH, Martin ; WURSTER, Ekkehard: *Schulbuchforschung als Unterrichtsforschung: Vergleichende Schreibtisch- und Praxisevaluation von Unterrichtswerken für den Sachunterricht (DFG-Projekt), (mit ausführlicher Dokumentation der Meßinstrumente)*. Frankfurt am Main [u.a.] : Lang, 1997. – ISBN 9783631311929
- [Reinhold u. a. 1999] REINHOLD, Peter ; LIND, Gunter ; FRIEGE, Gunnar: Wissenszentriertes Problemlösen in der Physik. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 5 (1999), Nr. 1, S. 41–62
- [Schecker 2010] SCHECKER, Horst: *Bildungsstandards, Kerncurricula und Aufgabenkultur: Chancen, Risiken und Wechselwirkungen*. 2010. – URL http://www.idn.uni-bremen.de/pubs/Folien_Vortrag_Schecker_Klett_Castrop_Rauxel_2S.pdf. – Zugriffsdatum: 14.08.2012
- [Schirra 14.09.1989] SCHIRRA, Norbert: *Die Entwicklung des Energiebegriffs und seines Erhaltungskonzepts: Eine wissenschaftshistorische und wissenschaftstheoretische Analyse*. Gießen, Justus-Liebig-Universität, Dissertation, 14.09.1989
- [Schrödinger 1926a] SCHRÖDINGER, Erwin: *Annalen der Physik*. Bd. 79: *Quantisierung als Eigenwertproblem: 1.Mitteilung*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1926

LITERATURVERZEICHNIS

- [Schrödinger 1926b] SCHRÖDINGER, Erwin: *Annalen der Physik*. Bd. 79: *Quantisierung als Eigenwertproblem: 2.Mitteilung*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1926
- [Schrödinger 1926c] SCHRÖDINGER, Erwin: *Annalen der Physik*. Bd. 80: *Quantisierung als Eigenwertproblem: 3.Mitteilung*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1926
- [Schrödinger 1926d] SCHRÖDINGER, Erwin: *Annalen der Physik*. Bd. 81: *Quantisierung als Eigenwertproblem: 4.Mitteilung*. Leipzig : Verlag Johann Ambrosius Barth, 1926
- [Schwarz 2003] SCHWARZ, Oliver: *Swing-by-Manöver – Ein Thema für die Schule?* 2003. – URL www.wissenschaft-schulen.de/sixcms/media.../Peatec-Heft_12_03.pdf
- [Schwarz 2008] SCHWARZ, Oliver: Impaktenergien mit Schulmitteln abschätzen. In: *Astronomie und Raumfahrt* 45 (2008), Nr. 1, S. 4–6
- [Schwarz 2009] SCHWARZ, Oliver: Die Theorie des Experiments: Aus der Sicht der Physik, der Physikgeschichte und der Physikdidaktik. In: *Geographie und Schule* 31 (2009), Nr. 180, S. 15–21
- [Stein 1979] STEIN, Gerd (Hrsg.): *Schulbuch-Schelte als Politikum und Herausforderung wissenschaftlicher Schulbucharbeit: Analyse und Ansichten zur Auseinandersetzung mit Schulbüchern in Wissenschaft, pädagogischer Praxis und wissenschaftlichem Alltag*. 1.Auflage. Stuttgart : Klett-Cotta, 1979
- [Stolzenburg 1977] STOLZENBURG, Klaus: *Die Entwicklung des bohrschen Komplementaritätsgedankens in den Jahren 1924-1929: Dissertation*. Kopenhagen, 1977
- [Thomson 1849] THOMSON, Wiliam: *An account of Carnots Theory of the motive power of heat*. Bd. 16. Edingburgh : Transactions of the Royal Society, 1849

LITERATURVERZEICHNIS

- [Thonhauser 1999] THONHAUSER, Josef: Schulbuchforschung - ein Beitrag zur Schulentwicklung? In: OLECHOWSKI, R. (Hrsg.) ; GARNITSCHING, K. (Hrsg.): *Humane Schule*. Frankfurt a.M., 1999, S. 272–295
- [Timmer 2004] TIMMER, Oliver: Fächerübergreifender Unterricht durch Analogien: Ein Beispiel. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 57 (2004), Nr. 2, S. 81–86
- [Tipler und Gerlich 2000] TIPLER, Paul A. ; GERLICH, Dieter: *Physik*. 3., korrigierter Nachdr. der 1. Aufl. 1994. Heidelberg [u.a.] : Spektrum Akad. Verl., 2000. – ISBN 978-3860251225
- [Vollmer 1980] VOLLMER, Günter: Sprache und Begriffsbildung im Chemieunterricht. In: *@Sprache und Begriffsbildung im Chemieunterricht, Günter Vollmer* (1980)
- [Wiss 2003] WISS, Donald: Swing-by-Manöver: Was steckt dahinter? In: *Sterne und Weltraum* 42 (2003), Nr. 42, S. 22–26

Erklärung

Ich erkläre(,)

1. dass mir die Promotionsordnung vom 11. September 2012 bekannt ist und von mir anerkannt wird.
2. dass ich weder früher noch gleichzeitig bei einer anderen Hochschule oder in einer anderen Fakultät ein Promotionsverfahren beantragt habe.
3. hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer, nicht angegebener Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Es wurden keine Dienste eines Promotionsvermittlers oder einer ähnlichen Organisation in Anspruch genommen.
4. dass in meiner Dissertation keine Forschungsergebnisse verwendet worden sind, die in Zusammenarbeit mit den folgenden Wissenschaftlern gewonnen wurden.