

Kapitel 2

Die physikalische Fachsprache im Unterricht

2.1 Methoden, Ergebnisse und Kritik aus anderen Untersuchungen

Nach ihrer Untersuchung der in einem weit verbreiteten Schulbuch (Kuhn 1975) vorkommenden Fachvokabeln kommen R. Brämer und H. Clemens zu dem Schluss, dass Physikunterricht nicht nur nebenbei, sondern ganz wesentlich Sprachunterricht ist. Und zwar mit deutlich höheren Anforderungen als der eigentliche Fremdsprachenunterricht. Physikalische Fachtermini zeichnen sich ja gerade durch ihren im Vergleich zur Umgangssprache neuen Sinngehalt aus. D.h. mit jedem neuen Fachwort muss auch zugleich der neue Sachzusammenhang gelernt werden. [BRÄM80] Darüber hinaus führt die Vermittlung von zu vielen Begriffen in zu schneller Folge im Physikunterricht dazu,

„dass Schüler dann zwar korrekte fachliche Begriffsbezeichnungen benützen, damit jedoch vage, diffuse Bedeutungsauffassungen ausdrücken.“ [MERZ98b]

Da Physiker auf dem Gebiet der Sprachforschung i. d. R. Laien sind, beschränken sich viele Untersuchungen zu diesem Thema auf den Vokabelaspekt. Relativ leicht, wenn auch recht arbeitsaufwendig, ist dabei das Durchforsten von Schulbüchern auf Fachvokabeln. Merzyn stellt in einem Übersichtsartikel zur Sprache im naturwissenschaftlichen Unterricht einige Ergebnisse dieser Arbeiten zusammen [MERZ98b]:

- Im naturwissenschaftlichen Unterricht treten in einer Unterrichtsstunde etwa 9 neue Fachbegriffe auf.
- Naturwissenschaftliche Schulbücher der Sek. I enthalten etwa 1500 bis 2500 verschiedene Fachbegriffe.
- In einem üblichen Schulbuchtext dieser Altersstufe ist jedes 6. Wort ein Fachbegriff.
- Jedes 25. Wort ist ein neuer Fachbegriff.
- Rund 50% aller Fachbegriffe werden im Buch nur ein einziges Mal benutzt.
- In einer naturwissenschaftlichen Unterrichtsstunde begegnen dem Schüler mehr neue Begriffe als im fremdsprachlichen Unterricht neue Vokabeln.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass zusammengesetzte physikalische Bezeichnungen von Brämer [BRÄM80] nur dann in die Vokabelliste aufgenommen wurden, wenn ihre Bedeutung nicht unmittelbar aus ihren Bestandteilen erschließbar war. Zusammengesetzte Hauptworte sind eine Eigenheit der deutschen Sprache. In der physikalischen Fachsprache sind zusammengesetzte Bezeichnungen, d. h. zusammengesetzte Hauptworte (Wärmekapazität, Bildebene, Normalkraft, Erdschatten, Federkraft, usw.) oder mit Adjektiven versehene Hauptworte (spezifischer Widerstand, absolute Temperatur, mittlere Geschwindigkeit, spezielle Relativitätstheorie, usw.) i. d. R. nicht selbsterklärend, auch wenn die Bedeutung ihrer einzelnen Wortteile bekannt ist. Für Schüler, die diese Eigenschaft der Fachsprache gelernt haben, können sich folglich sogar Zweifel an der Bedeutung an sich klarer Bezeichnungen (Sonnenmasse, Elektronenladung, Erdradius, Reifendruck, usw.) einstellen. Einen großen Teil der gebräuchlichen Zusammensetzungen könnte man durch einen Nebensatz ersetzen, ohne das der Text dadurch an Klarheit verliert. Z.B. „Die Temperatur, bei der ein fester Stoff schmilzt anstatt Schmelztemperatur, die Stromstärke im Fall des Kurzschlusses statt Kurzschlussstrom“ [HERR96].

Neben dem Vokabelaspekt werden mittlerweile auch verschiedene andere Methoden verwendet um die Verständlichkeit von Schulbuchtexten zu testen. Die einfachste Methode zur Beurteilung der Lesbarkeit eines Textes besteht in der Bildung eines Lesbarkeitswertes in dem formale Merkmale des Textes, wie Komplexität des Satzbaues (Satzlänge gerechnet in Worten) und des Wortschatzes (mittlere Wortlänge, gerechnet in Silben) eingehen. Natürlich bleiben dabei die meisten Texteigenschaften, wie z.B. alle inhaltlichen Aussagen unberücksichtigt. Dennoch erlauben die so gewonnenen Werte eine Vergleichbarkeit verschiedener Texte miteinander und die Bestimmung einer Schulstufe für die der Text geeignet erscheint. Laut Merzyn weisen die wenigen bisher untersuchten deutschen Schulbücher fast durchweg zu hohe Schulstufenwerte auf.

„Es ragt ein Realschulbuch für das 7. bis 10 Schuljahr heraus, das eine mittlere Lesbarkeit eines Sachtextes für das 11. Schuljahr besitzt und ein Physikbuch für das 8. Schuljahr, dessen Wortschatz die für ein Buch der 10. Klasse typischen Werte aufweist“ [MERZ94].

Als weitere Untersuchungsmethoden, die auch inhaltliche Aspekte betreffen, werden von Merzyn Lernerfolgsmessungen, Expertenurteil und Lückentext genannt. Erste Untersuchungen, bei denen Texte mit mehreren Methoden überprüft wurden, ergaben ähnliche Rangfolgen für die Textverständlichkeit, was darauf hindeutet, dass die vier genannten Methoden ähnliches erfassen [MERZ98c].

Obwohl der Fachvokabelumfang im Physikunterricht mittlerweile von einigen Autoren kritisiert wird, ist es bisher nicht gelungen, sich auf eine didaktisch und inhaltlich sinnvolle Einschränkung des Fachvokabulars zu einigen. Wie schwierig sich ein derartiges Unterfangen gestaltet, verdeutlicht eine Befragung von 6 Lehrern, denen 1204 inhaltsverschiedene

Fachbegriffe aus verbreiteten Schulbüchern für die Sekundarstufe 1 vorgelegt wurden [LICH92]. Sie sollten diese den Bewertungskategorien

- 1 - wichtiger Begriff, den der Schüler am Ende der S1 gelernt haben sollte
- 2 - Begriff, den der Schüler gehört haben sollte
- 3 - für die S1 entbehrlicher Begriff

zuordnen. Lediglich über 13 der 1204 vorgelegten Begriffe herrschte Einigkeit darüber, dass diese für die Sekundarstufe I entbehrlich seien. Darüber hinaus zeigte eine breite Streuung die Schwierigkeit bei der Suche nach Ansätzen für eine mögliche Begriffsreduzierung. Der Konsens, bei den von allen Lehrern als besonders wichtig eingestuften Begriffen, erschien jedoch höher als bei den als entbehrlich eingestuften [LICH92].

Neben der Vokabelflut und den für Schüler schwer lesbaren, weil auf wissenschaftliche Exaktheit ausgerichteten Lehrbuchtexten besteht jedoch noch ein weiteres, oft unbeachtetes Verständnishindernis durch die Fachsprache. Der besonders unter Lehrern weit verbreitete Glaube an eine exakte Fachsprache, die auf eindeutigen Definitionen gegründet ist und im Gegensatz zur Alltagssprache keine Unklarheiten zulässt, verstellt den Blick dafür, dass die Fachsprache selbst an vielen Stellen inkonsistent und missverständlich ist. Darüber hinaus wird häufig ungerechtfertigterweise von der Klarheit der physikalischen Begriffe auf eine Klarheit der physikalischen Bezeichnungen geschlossen. Merzlyn stellt fest, dass die Fachsprache von ihrem angestrebten Ideal, nämlich, wie in der Mathematik, Begriffe erst zu verwenden, nachdem sie definiert wurden, und jeden Begriff nur mit einer einzigen Bedeutung zu versehen, oft ein gutes Stück entfernt ist [MERZ98a]. Die Begrenzung der Exaktheit liegt im Wesentlichen in der inhaltlichen Struktur der Physikalischen Begriffe selbst:

„Mathematische Begriffe und physikalische Begriffe sind verschiedene Dinge. Der Unterscheidung von rationalen und irrationalen Zahlen z.B. entspricht in der Wirklichkeit nichts. Trotzdem verwenden wir den mathematischen Begriff des Kontinuums in der Physik, weil er eben so viel einfacher ist, als eine Konstruktion, in der nur Beobachtbares vorkäme. Die mathematischen Begriffe werden in Axiomen präzisiert. Auch die physikalischen Begriffe präzisieren wir in Begriffssystemen, die durch Grundgleichungen dargestellt werden. Aber sie sind damit nicht erschöpfend beschrieben. Die Beziehung zum Beobachtbaren muss noch ausgesprochen werden, und das geschieht in gewöhnlicher Sprache. Die Begriffe der Physik, da sie neben dem axiomatisch präzisierbaren ja auch einen wirklichen Sachverhalt meinen, den man oft nicht vollständig kennt, sind irgendwie "offener", unvollendeter als die mathematischen Begriffe.“ [HUND79]

Als Ausgangspunkt physikalischer Begriffe dient dabei nach C. F. v. Weizsäcker immer die schon vorhandene natürliche Sprache.

„Die sog. exakte Wissenschaft kann niemals und unter keinen Umständen die Anknüpfung an das, was man die natürliche Sprache oder die Umgangssprache nennt, entbehren. Es handelt sich stets nur um einen Prozeß, der vielleicht sehr weit getriebenen Umgestaltung derjenigen Sprache, die wir immer schon sprechen und verstehen. Und deshalb ist die Vorstellung einer vollkommen exakten Sprache zumindest für solche Wissenschaften, die sich, wie man sich ausdrückt, mit realen Dingen beschäftigen, eine reine Fiktion.“ (...) “Es gibt nicht so etwas wie "exakte Realwissenschaft".“ [WEIZ60]

Er zeigt in diesem Aufsatz weiterhin u. a. am Beispiel der Trägheitsbewegung, dass in der Physik Begriffe gebraucht werden, die erst durch ihren Erfolg einen Sinn bekommen.

„Vom absoluten Raum hat vor Newton im Grunde niemand gewusst. Niemand brauchte davon zu wissen, denn es gab ja das Weltall als natürliches Bezugssystem. Der absolute Raum, durch Newton eingeführt, ist eigentlich zu nichts anderem da, als zu definieren was geradlinig im Trägheitsgesetz heißt.“ [WEIZ60]

Physikalische Begriffe unterliegen einem historischen Wandel und sind immer in gewisser Weise vorläufig. Voraussetzung der Erkenntnis und damit einer weiteren Verschärfung der Begriffe ist die natürliche Sprache.

„Und somit ist diese Sprache ein Mittel, das uns immer von neuem Wirklichkeit erschließt und uns an Hand der erkannten Wirklichkeit gestattet, jenes Mittel selbst zu korrigieren. Dieser, wenn man so will, zirkelhafte Vorgang scheint mir derjenige zu sein, der, von der sprachlichen Seite her gesehen, in einer Wissenschaft wie der Physik unablässig geschieht.“ [WEIZ60]

Aufgrund der historischen Entwicklung werden viele Fachbegriffe der Physik heute nicht mehr in der Bedeutung zur Zeit ihres Entstehens verwendet.

„Manche Begriffe erweisen sich als unzweckmäßig oder gar ganz unpassend und verschwinden (z.B. der Äther). Andere ändern ihre Bedeutung grundlegend“ ... “Der Fachbegriff Kraftwerk enthält den anderen Fachbegriff Kraft aus einer Zeit, in der Wissenschaftler unter Kraft noch etwas völlig anderes verstanden als heute, und konserviert ihn.“ ... “Auch fachsprachliche Texte sind nur aus ihrer Zeit heraus zu verstehen; das macht den Wissenschaftshistorikern das Leben schwer. Bei entscheidenden Worten ist für heutige Leser z.B. unklar, was Newton in seinen "Principia", einem sehr sorgfältig formulierten, fachsprachlichen Text, meint.“ [MERZ98a]

Bei vielen Begriffen, die heutigen Schülergenerationen ihr Physikverständnis erschweren, handelt es sich jedoch insofern um scharfe Begriffe, dass sie wie alle physikalischen Größen quantifizierbar und somit durch eine Messvorschrift definiert sind. Das bedeutet jedoch nicht, dass sie einer naiven sprachlichen Definition, wie z.B. der Antwort auf die Frage „Was ist Energie?“ zugänglich sind. Hilscher zitiert in diesem Zusammenhang [HILS95] u. a. eine Aussage von Feynman [FEYN91] „Es ist wichtig einzusehen, dass wir in der heutigen Physik nicht wissen was Energie ist“, und folgert, dass sich die Größe „Energie“ nicht durch andere Größen definieren lässt.

2.2 Didaktische Hürden durch unklare Begriffsnamen

2.2.1 Allgemeine Ursachen für sprachlich bedingte Missverständnisse

Wie in jeder Sprache sind auch in der Fachsprache Wörter Namen für Begriffe. Die Realität bietet für das Individuum eine praktisch unendliche Vielzahl von möglichen Begriffskonzeptionen. Jede natürliche Sprache verfügt aber nur über einen begrenzten Vorrat an Begriffsbezeichnungen. Die daraus resultierende Eigenschaft der Sprache einem Wort mehrere Begriffe zuzuordnen (z.B. Rat, aufheben, to get) wird als Homonymik bezeichnet.

„Dagegen ist es unmöglich jedem Realitätsding, aber auch nur jedem Begriff ein eigenes Sprachzeichen als Träger zuzuordnen. Denn solcherart wäre das rüstigste Gedächtnis außerstande, diese unhandliche Überfülle an Semantemen, die das Lexikon eines solchen Symbolsystems enthalten würde und müsste, aufzubewahren, zu beherrschen und mit ihr geistig zu operieren“ [KAIN72, S79]

Neben dieser, wie Kainz es nennt „Mangelscheinung“ der Sprache, leistet sich das Bezeichnungssystem auf der anderen Seite den „Luxus“, dass für bestimmte, oft für die jeweilige Kultur wesentliche, Bereiche eine Fülle verschiedener Worte für gleiche (z.B. Schlips, Krawatte; ununterbrochen, pausenlos) oder annähernd gleiche (z.B. umfangreich, dick, korpulent) Begriffe existieren (Synonymik). Der durch diesen Überfluss verursachte Verlust an Klarheit in der Bezeichnungspraxis würde nach Kainz durch eine Begriffseinengung jedoch teuer erkaufte

„... nämlich mit dem Verlust an Abschattungs- und Differenzierungsmöglichkeiten der Darstellung, wirkungsvoller Variationen sowie mit der Preisgabe ästhetisch und rhetorisch sehr wirksamer Ausdruckswerte, auf die der Sprachkünstler großen Wert legt. Außerdem wäre mit solchen eng und streng festgelegten Begriffsträgern eine flüssige Alltagskommunikation unmöglich, ...“ [KAIN72, S68]

Schwierigkeiten aus dem Gebrauch von Synonymen ergeben sich nach Kainz z.B. aus dem unvermeidlichen sprachgeschichtlichen Bedeutungswandel der Wörter und damit auch der Synonymitätsverhältnisse

„Die stehende Wendung schlecht und recht fassen die meisten als Gegensatz auf, wie aus der falschen Verwendung mehr schlecht als recht hervorgeht. Ursprünglich aber handelt es sich dabei um eine durch Synonymität verstärkte Zwillingsformel, denn schlecht heißt: "gerade", "aufrichtig", "ohne Winkelzüge". ... Nicht mehr verstanden werden ferner die Verse: Weißt du, worin des Lebens Weisheit liegt / Sei fröhlich, geht es nicht, so sei vergnügt. Sie erscheinen heute allen nicht germanistisch gebildeten Sprachangehörigen als Unsinn, als aufreizende oder komische Leerformel. Indes war die Synonymität zwischen den entscheidenden Ausdrücken

fröhlich und vergnügt ursprünglich nicht vorhanden, da vergnügt bis in die Zeiten Schillers soviel bedeutete wie "zufrieden".“ [KAIN72, S77]

Dritte, ebenfalls als Quelle für Missverständnisse in der Fachsprache relevante, Eigenschaft der Sprache sind Metaphern und Vergleiche. Nach Kainz liegt die durch die Metaphorik (bildliche Uneigentlichkeit der Sprache) verursachte Sprachverführung u. a. in der unklaren Grenze zwischen dem ursprünglichem Bild und dem schließlich erreichten Begriff.

„Metaphern erwachsen aufgrund oft höchst vager Ähnlichkeiten und willkürlicher Analogisierungen, also durch Vergleich (=Gleichsetzung) von nicht wirklich Gleichem, sondern bloß Ähnlichem.“ [KAIN72, S99]

Kainz warnt jedoch vor Übertreibungen indem er an Beispielen zeigt, dass Ausdrücke der Alltagssprache ihren ursprünglichen Bildcharakter verloren haben und zum Träger eines exakt definierten Begriffs geworden sind.

„Bei unserem Wort Kopf denkt kein Sprachangehöriger – mit Ausnahme der Germanisten – an lat. Cuppa und damit an ein Gefäß, etwa die als Trinkbecher verwendete Hirnschale des erschlagenen Gegners. Beim ndh. Ausdruck Messer kommt niemandem mehr in den Sinn, dass er anfangs ein kühnes Bild (mat-sahs = Speise-Schwert) war.“ [KAIN72, S99]

Bei der Bildung neuer wissenschaftlicher oder technischer Begriffe ist davon auszugehen, dass der Wortschatz der vorhandenen Sprache dafür keine entsprechenden Symbole besitzt. In vielen Fällen werden dann zur Bezeichnung Metaphern aus Ausdrucksnot heraus geboren, die dem wissenschaftlichen Laien keine andere Wahl lassen, als ihren Sinn aus dem zugrundegelegten Bild zu erschließen. Dabei führen gerade die weiterreichenden, weniger willkürlichen Analogisierungen, die aufgrund ihrer Alltagsbedeutung eine fachwissenschaftlich ungerechtfertigte Strukturierung und Systematik andeuten (z.B. Feld, Strom, Quelle, Kraft, Fluß) denjenigen, der sie wörtlich nimmt, auf eine falsche Fährte.

Neben den Fehlschlüssen, aufgrund der oben genannten Spracheigenschaften innerhalb der natürlichen Sprache und innerhalb der Fachsprache, ergeben sich daraus noch zusätzlich Verwechslungsmöglichkeiten zwischen beiden Sprachebenen.

2.2.2 Homonyme und Synonyme innerhalb der Fachsprache

Auch innerhalb der Fachsprache finden sich Homonyme. So wird das Wort „Spannung“ sowohl für das Integral der elektrischen Feldstärke als auch für die Beschreibung eines mechanischen Zustands (Druck- bzw. Zugspannung) verwendet. Mit der Bezeichnung „spezifisch“ wird in den meisten Fällen eine auf die Masse bezogene Größe versehen z.B. „spezifische Wärme“, „spezifische Ladung“. Es kann aber auch eine auf die Länge und die Fläche bezogene Größe gemeint sein wie „spezifischer Widerstand“. Alltagssprachlich ergibt sich bei den genannten Bezeichnungen zusätzlich die Bedeutung einer auf das Material bezogenen Größe.

„Kraft“ wird selbst heute noch in mindestens drei verschiedenen fachsprachlichen Bedeutungen verwendet. Einmal im Sinne von Wechselwirkung als Bezeichnung für ein Kraftgesetz z.B. „Gravitationskraft“, „Coulombkraft“, dann im Sinne von „eine Kraft ausüben“ bzw. „eine Kraft wirkt“ als die jeweils interessierende Hälfte der Relation und schließlich im Bereich der Astrophysik als „Leuchtkraft“ eines Sterns [METZ94, S534; GERT89, S559].

Begriffe, die den Ausdruck „Dichte“ in ihrer Bezeichnung enthalten bezeichnen sowohl volumenbezogene Größen „Energiedichte“, „Ladungsdichte“ als auch flächenbezogene Größen „Flächenladungsdichte“, „Stromdichte“.

Oft werden die gleichen Bezeichnungen sowohl für eine physikalische Größe als auch für ein Gerät verwendet. Im Falle der Bezeichnung „Widerstand“ kann neben dem konkreten elektrotechnischen Bauteil auch ein Ersatzsymbol für eine ganze Klasse von entropieproduzierenden Gegenständen gemeint sein. Umgekehrt wird der Begriff Widerstand in Schulbüchern manchmal eingeschränkt als konstanter (ohmscher) Widerstand verwendet. Unter „Optik“ kann man ein Teilgebiet der Physik oder das Linsensystem eines Messgerätes verstehen.

Generell muss bei physikalischen Größen immer dazu gesagt werden, ob eine Funktionsvariable z. B. $F = F(r)$ oder ein bestimmter Wert einer Größe z.B. $F = 10 \text{ N}$ gemeint ist.

Die Auflistung ließe sich noch drastisch erweitern. Aus ihr ergibt sich, dass in der Fachsprache entgegen der eingangs kritisierten Vokabelfülle des Physikunterrichtes eher eine gewisse Armut an Begriffsbezeichnungen vorherrscht. Demzufolge nehmen auch Beispiele für die in der natürlichen Sprache so häufigen Synonyme innerhalb der Fachsprache einen kleineren Raum ein.

Erstaunlicherweise lassen sich dennoch Synonyme auch in der Fachsprache finden, wobei hier vielleicht manchmal der Wunsch nach didaktischer Veranschaulichung zugrunde liegt. So werden Trägheitskräfte z.B. manchmal auch als Scheinkräfte bezeichnet.

Bei der Behandlung eines einfachen elektrischen Stromkreises, kommen für die drei Symbole der „elektrischen Quelle“ (Batterie, Gleich- und Wechselstromquelle) in Schulbüchern die Bezeichnungen (Gleich-/Wechsel-) Stromquelle bzw. -versorgung, (Gleich-/Wechsel-) Spannungsquelle bzw. -versorgung, Batterie, (Gleich-/Wechsel-) stromnetzteil, Akku(mulator), Knopf-, Mono-, Babyzelle, Generator, Bandgenerator, Hochspannungsquelle bzw. -versorgung, Steckdose, Stromaggregat vor (BSP u. a. aus [LICH92]).

Vermutlich spielt hier der verständliche Wunsch der Schulbuchautoren eine Rolle, die Bedeutung der Physik in Alltagssituationen zu illustrieren und gleichzeitig einen Teil der aufgezählten Alltagsgegenstände der physikalischen Kategorie „Stromquelle“ zuzuordnen.

2.2.3 Metaphern und Vergleiche

Eine schwerer wiegende Problematik der Fachsprache deutet sich im Wort „Stromquelle“ an. Hierbei handelt es sich um eine Metapher, die mehrere oben angedeutete Verwechslungsmöglichkeiten beinhaltet.

Die Worte „Strom“ und „Quelle“ sind zunächst Metaphern, die in der Alltagssprache etwas anderes bedeuten. Beim Wort „Strom“ ist es nach neueren Untersuchungen heute nicht mehr so sehr das Bild eines fließenden Gewässers, das mit diesem Wort assoziiert wird. Vielmehr wird „Strom“ umgangssprachlich häufig synonym zu „Energie“ verwendet, was in Ausdrücken wie Stromzähler, Stromrechnung, Stromverbrauch deutlich wird. Von Duit [DUIT83, DUIT86a] durchgeführte Assoziationstests zum Wort „Strom“ bestätigen diesen Zusammenhang. Dieser Fehlschluss wird in doppelter Hinsicht durch das Wort „Quelle“ verstärkt, weil umgangssprachlich ebenfalls von Energiequellen die Rede ist, was wiederum einem gewünschten Energieerhaltungsdenken im Wege steht. Dass beim Wort Quelle neben einem „Ursprung“ auch immer ein gesamter Wasserkreislauf mitgedacht wird, ist wohl eher unwahrscheinlich. Wenn doch, wäre die Analogie beim Stromkreis jedoch nur für den Strom der Ladung gerechtfertigt. Die Energie bleibt zwar ebenfalls erhalten, läuft aber auf anderen Wegen und verlässt den Stromkreis beim „Verbraucher“. Beim fachsprachlichen Wort „Lichtquelle“ wird dagegen deutlich, dass „Quelle“ hier einen „Ursprung“ bezeichnet, also eine Stelle, an der tatsächlich „Licht erzeugt wird“.

Aufgrund mathematischer Strukturgleichheiten lassen sich verschiedene Bereiche der Physik analogisierend mit bestimmten Modellvorstellungen und einer Fachsprache, die sich am anschaulichen Modellbereich orientiert, beschreiben. Der ausführlich in Kapitel 5 betrachtete sog. „Karlsruher Physikkurs“ ist z. B. eine Darstellung der Physik, die mengenartige Größen

und deren „Ströme“ in den Mittelpunkt stellt und dabei sprachlich im Bild eines Flüssigkeitskreislaufes bleibt. Analogiebetrachtungen stellen im Selbstverständnis der Physik jedoch keinen Mangel dar, sondern sind ein Beweis für eine ihrer größten „Stärken“. Nämlich das Beschreiben einer Vielzahl scheinbar unzusammenhängender Naturphänomene mit wenigen grundlegenden Naturgesetzen. So bedient sich die physikalische Beschreibung von Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen in der Mechanik der gleichen mathematischen Begriffe, die für die Beschreibung beliebiger Felder, z.B. in der Elektrodynamik entscheidend sind. Die entsprechenden mathematischen Begriffe zur Beschreibung von Vektorfeldern werden auch heute, im wohl am weitesten verbreiteten deutschsprachigen Hochschullehrbuch [GERT89, S95] zunächst am Beispiel von anschaulichen Flüssigkeitsströmungen eingeführt. Dieser spezielle Anwendungsbereich findet sich dann auch im Namen der allgemeinen Begriffe wie z.B. „magnetischer Fluss“ Φ_H , „elektrischer Fluss“ Φ_E , „magnetische Flussdichte“ B , „Wirbel“ und „Quellen“ in magnetischen oder elektrischen Feldern wieder.

Neben Fällen wie diesen, in dem die der Bezeichnung zugrundeliegenden mathematischen Strukturgleichheiten gerechtfertigt sind, spiegeln sich in anderen, durchaus heute noch üblichen physikalischen Bezeichnungen wie z.B. „Kraftübertragung“ historisch vermutete Strukturgleichheiten (Kraft als übertragbare Substanz) wieder, die sich längst als falsch herausgestellt haben.

Der Versuch das Gemeinsame und Grundlegende in der Vielfalt der natürlichen Erscheinungen anhand möglichst einfacher Modelle erkennen und beschreiben zu können, kann problematisch werden, wenn der Modellgegenstand in der realen Umwelt tatsächlich existiert und nicht klar ist, auf welche idealisierten Eigenschaften sich die metaphorische physikalische Bezeichnung bezieht.

„Durch unglücklich gewählte Metaphern werden von der Bezeichnung her Auffassungen nahegelegt, die unsachgemäß sind und der Wirklichkeit nicht entsprechen; die darin beschlossenen Ungenauigkeiten potenzieren sich, wenn die Metapher zum Ausgangspunkt weiterführender Schlussfolgerungen gemacht wird, wozu sie oft mehr Anreiz bietet als der sachliche Begriff. Sprachverführungen schließen sich vor allem an die latenten, unterschwelligen und unentdeckten Bildlichkeitsreste.“ [KAIN72, S113]

Besonders ungünstig ist m. E., dass gerade die zentralen, weil strukturbildenden und strukturtragenden Wörter der Schulphysik (z.B. Kraft, Energie, Feld, Strom, Wärme, Druck, Leistung) auch in der Alltagssprache vorkommen, wo sie zwangsläufig in anderer Bedeutung gebraucht werden. Das erhöht einerseits trivialerweise die Anzahl der Wortbedeutungen und erleichtert andererseits den Eingang falscher synonyme Alltagsbedeutungen in die Physik.

2.2.4 Alltagssprachliche Bezeichnungen in der schulrelevanten Fachsprache

Eingangs wurde der Versuch angesprochen, die Begriffsflut der schulrelevanten Fachsprache etwas einzudämmen. Voraussetzung dafür wäre eine, bisher nicht absehbare Einigung darüber, welche Begriffe dabei als unentbehrlich für den Physikunterricht angesehen werden müssen.

Als unentbehrlich dürften wohl physikalische Basisgrößen sowie grundlegende abgeleitete Größen gelten. Quantitative Begriffe tauchen nicht nur im häufig übervollen Sachwortverzeichnis eines Schulbuchs auf, dem vielleicht von den Autoren eine gewisse lexikalische Funktion zgedacht wird, sondern auch in der von den Schülern sicher häufiger genutzten „Formelsammlung“. In *Tabelle 2.2.1* sind 48 Begriffe aufgelistet, die in einer entsprechenden „Formelsammlung“ eines Schulbuchs für die Sekundarstufe II vorkommen [METZ94, S556].

Länge	Drehmoment	Entropie
Fläche	Trägheitsmoment	Elektrische Stromstärke
Volumen	Drehimpuls	Elektrische Ladung
Zeit, Periode	Gravitationsfeldstärke	Elektrische Feldstärke
Geschwindigkeit	Gravitationspotential	Elektrisches Potential
Beschleunigung	Schwere Masse	Elektrische Spannung
Frequenz	(wie [träge] Masse)	Elektrischer Widerstand
Winkel	Temperatur (Kelvin-)	Elektrische Leistung
Winkelgeschwindigkeit	Temperatur (Celsius-)	Elektrische Energie
Winkelbeschleunigung	Stoffmenge	Elektrischer Fluß
Masse (träge Masse)	Molvolumen	Kapazität
Dichte	Molare Masse	Magnetische Flußdichte
Impuls	Relative Atommasse	Magnetischer Fluß
Kraft, Gewicht	Relative Molekülmasse	Induktivität
Druck	Wärmemenge	Aktivität
Arbeit, Energie	Spez. Wärmekapazität	
Leistung	Molwärme	

Tabelle 2.2.1

Liste der „Physikalischen Größen“ in [METZ94].

Es fällt sofort auf, dass die hier aufgeführten Bezeichnungen fast ausschließlich (94 %) aus Worten oder Wortteilen bestehen, die auch in der Alltagssprache vorkommen. Wenn man davon ausgeht, dass auch Worte wie Kapazität (im Alltag u.a. Fassungsvermögen), Impuls (im Alltag u.a. Anstoß) und Potential (im Alltag u.a. Fähigkeit) in der Umgangssprache präsent sind, können nur die vier Begriffe „Entropie“, „Frequenz“, „Mol“ und „Induktivität“ als sprachlich unbelastet gelten. Selbst vermeintlich einfache Größen wie „Länge“ und „Fläche“

verlieren ihren selbsterklärenden Status, wenn man an vektorielle Anwendungen wie z. B. Orts- bzw. Abstandsvektor oder Flächennormale denkt.

Begriff	Metzler Physik für Sek. II 1994	Dorn Bader für Sek. I 1993	W. Kuhn für Sek. I 1994
Arbeit	12	5	8
Basis	3	1	3
Beschleunigung	14	1	5
Beugung	4	-	-
Bewegung	17	5	9
Bild / Abbildung	2	11	11
Druck	6	13	20
Energie	38	35	24
Feld	30	4	6
Fluss	3	-	-
Geschwindigkeit	19	3	6
Kapazität	3	-	-
Kraft	31	30	27
Ladung	11	10	7
Leistung	7	5	7
Masse	20	4	2
Reibung	6	2	11
Spannung	7	9	20
Strom	10	22	28
Temperatur	5	6	10
Trägheit	5	1	1
Wärme	10	16	26
Welle	43	2	8
Widerstand	10	9	18

Tabelle 2.2.2

Häufigkeit von Wörtern bzw. Wortteilen mit einer (oder mehreren) von der physikalischen Bedeutung abweichenden Alltagbedeutung(en) im Sachwortregister von Schulbüchern. Bezeichnungen wie z.B. "Beschleunigungsarbeit" oder "Energiedichte des Feldes" wurden doppelt berücksichtigt.

Wie stark alltagssprachliche Bezeichnungen die Schulphysik dominieren zeigt ferner ihre Häufigkeit im Sachwortverzeichnis. Von den 1122 Begriffen (ohne Eigennamen), die das Verzeichnis des o. g. Schulbuchs für die Sekundarstufe II umfasst, bestehen 309 (27,5 %) Bezeichnungen ganz oder teilweise aus alltagssprachlichen Wörtern. Am häufigsten sind zusammengesetzte Begriffsnamen, die wiederum die Bezeichnungen der Grundbegriffe (z. B. Energie, Kraft, Geschwindigkeit) enthalten. Für Schulbücher der Sekundarstufe I ergeben sich ähnliche Verhältnisse (in [DORN93] ca. 25 % von 1051 Stichworten, in [KUHN94] ca. 27 % von 1041 Stichworten). Die Häufigkeiten mit der einige dieser Begriffe im Sachwortregister

der genannten Schulbücher vorkommen sind in *Tabelle 2.2.2* zusammengestellt. Darunter befinden sich auch qualitative Begriffe wie z.B. Feld, Wirkung, Bewegung, usw.. Eine Liste der entsprechenden Wörter findet sich im Anhang (vgl. Anhang A.3, S A 55).

Die Tatsache, dass fast alle zentralen Wörter der Schulphysik entweder ganz oder teilweise auch in der Alltagssprache vorkommen, wo sie in der Regel in anderer Bedeutung gebraucht werden, führt auf eine aus dem Fremdsprachenunterricht bekannte Schwierigkeit. Versteht man die Fachsprache als Fremdsprache, handelt es sich bei diesen Worten um sogenannte „falsche Freunde“ [KAIN72].

„Es ist eine spezifische und besonders gefährliche Sprachverführung, wenn ein Sprachmittler einem fremdsprachlichen Ausdruck die Bedeutung eines mit ihm etymologisch identischen Wortes der eigenen Sprache beilegt, sich also durch lautgestaltliche Ähnlichkeit und Abstammungsgleichheit täuschen lässt etwa engl. famous (berühmt) mit deutsch famos (vorzüglich), franz. figure (Gesicht) mit deutsch Figur wiederzugeben.“ [KAIN72]

Der Prozess, der darin besteht, dass fachsprachliche Bezeichnungen Eingang in eine lebendige Alltagssprache finden, ist dabei nie abgeschlossen. Gute Beispiele hierfür sind Worte wie „Katalysator“ oder „Quant“, denen man nicht vorwerfen kann, dass sie von vornherein missverständliche Assoziationen hervorrufen. Durch die Wichtigkeit, die diese Worte in der Alltagssprache erlangen (Katalysator als wichtiges technisches Bauteil, das die Umwelt schon und Steuern spart, Quantensprung als Metapher für einen i. d. R. positiv gewerteten, sprunghaften wirtschaftlichen oder politischen Fortschritt/Erfolg) erschließen sich neue Bedeutungsfelder für die Begriffe (Katalysator nicht als Reaktionsbeschleuniger sondern Filter, Quantensprung in dem Sinne, das ein Quant etwas besonders großes sein muss), die nichts oder wenig mit der physikalischen Bedeutung zu tun haben.

Insbesondere wenn ein Wort im Alltag für eine prinzipiell physikalische Aussage verwendet wird, sind Probleme zu erwarten. Denn hier gaukelt eine korrekte Verwendung in einem Bedeutungsbereich, in dem sich zufällig physikalische und Alltagsbedeutung überlappen, eine Beherrschung des Fachbegriffes vor. D. h. Fehlkonzepte, die durch die Alltagsbedeutung entstehen, fallen solange nicht auf, wie man sich in diesem Überlappungsbereich befindet. So beinhaltet zwar der Alltagsbegriff „Geschwindigkeit“ den Aspekt „Tempo“ bzw. „Schnelligkeit“, jedoch kommen alle anderen physikalischen Bedeutungsfelder (Richtung, Vorzeichen, Bezugssystem) darin nicht vor. Oft wird die Alltagsbedeutung eines Begriffes in der Fachsprache sogar auf das Gegenteil ausgedehnt. Während jede Geschwindigkeitsänderung (nach Richtung und Betrag) fachsprachlich „Beschleunigung“ genannt wird, dominiert in der Alltagssprache nur der Aspekt der „Geschwindigkeitszunahme“.

„Wir wissen, dass in zivilisierten Ländern ein junger Heranwachsender eine gewisse Zahl empirischer physikalischer Begriffe verwendet, die er entweder in der Grundschule oder zu Hause gelernt hat. Unsere eigenen Forschungen (Leboutet 1969) haben gezeigt, dass die physikalischen

Vorstellungen physikalisch nur dem Namen nach sind (Kraft, Leistung, Geschwindigkeit).“
[LEBO78]

Weniger Übersetzungsprobleme sind vermutlich bei Wörtern zu erwarten, deren Bedeutungsbereich im Alltag entweder von dem in der Physik völlig getrennt ist (z.B. Farbladung bei Quarks), oder große Gemeinsamkeiten mit dem Bedeutungsbereich in der Physik aufweist. Z.B. ist der Alltagsbegriff Moment (im Alltag: Augenblick, kurze Zeitspanne) in den Fachbegriffen Momentangeschwindigkeit und Momentanbeschleunigung ganz gut getroffen, sofern man sich die Zeitspanne hinreichend kurz vorstellt, da der Grenzwert zu einem bestimmten Zeitpunkt gemeint ist. Andererseits ergibt er im Fachwort Drehmoment überhaupt keinen Sinn.

2.2.5 Weitere Beispiele

Weitere, teils bekannte, teils vielleicht häufig übersehene Beispiele für fachphysikalische Bezeichnungen, die denjenigen, der sie wörtlich nimmt, auf die falsche Fährte führen, seien nachfolgend genannt.

Unter der „Kapazität“ eines Kondensators versteht die Fachsprache nicht sein Fassungsvermögen für Ladung, sondern das Verhältnis Ladung pro Spannung. In der Wärmelehre bezeichnet „Wärmekapazität“ nicht das Fassungsvermögen für „Wärme“ sondern das Verhältnis von zu- bzw. abgeführter Wärme pro Temperaturänderung. Zum sowohl fachsprachlich als auch umgangssprachlich nebulösen Begriff „Wärme“ vgl. Abschnitt 2.2.6.

Auch eine sogenannte „feste Rolle“ dreht sich, sie kann nur im Gegensatz zur sog. „losen Rolle“ keine zusätzliche translatorische Bewegung ausführen.

Als „elastisch“ bezeichnet man auch umgangssprachlich Materialien die nach Verformung in ihren Ausgangszustand zurückkehren, jedoch meint man damit in der Regel nur „weiche“ Stoffe (d.h. solche mit kleiner Federkonstante) wie Schaumstoff oder Gummi, bei denen geringe Kräfte deutlich sichtbare Formänderungen bewirken. Stahlkugeln, Seile und Tischplatten werden dagegen im Alltag nicht als elastisch betrachtet, was zu Problemen bei der Beschreibung von Wechselwirkungen führen kann, wie z.B. zur Begünstigung der Vorstellung, dass starre Körper keine Kräfte ausüben.

Wenn ein System einen Zustand erreicht hat, in dem kein Energieaustausch mit der Umgebung zustande kommt, spricht man von „Gleichgewicht“. Damit sind nicht nur Zustände gemeint, die das System nur durch Anstoß von außen (Stabiles und metastabiles Gleichgewicht) verlassen kann, sondern auch solche, in denen das System eventuell

(indifferentes Gleichgewicht) oder gerade nicht (labiles Gleichgewicht) von selbst verbleibt. Mit zwei gleichen Gewichten hat das selbst in der Mechanik kaum etwas zu tun, denn die Waage oder der Hebel bei dem dieses „Gleichgewicht“ durch zwei gleiche Gewichte realisiert wird, ist nur ein Spezialfall. In sinnvollen Anwendungen (Briefwaage, ungleicharmiger Hebel) führen in der Regel verschiedene „Gewichte“ zum „Gleichgewicht“.

Was das Wort „Gewicht“ betrifft, sind übrigens die Laien bzw. Schüler häufig genauer als die Fachsprache, denn sie unterscheiden deutlich zwischen Gewicht und Kraft [LÖFF91], während in der Fachsprache „Gewicht“ als (zwar unschöne) Abkürzung für „Gewichtskraft“ vorkommen kann. Allerdings hat sich die Fachsprache einiger Schulbücher hier bereits dem „allgemeinen Sprachgebrauch“ angepasst und verwendet das Wort „Gewicht“ für das was eine auf der Erde installierte Waage anzeigt, nämlich als Synonym für Masse.

Unter „Vergrößerung“ versteht man nicht das Verhältnis von Bildgröße zu Gegenstandsgröße, wie man beim Mikroskop annehmen könnte (das wäre der Abbildungsmaßstab), sondern das Verhältnis der unterschiedlichen Sehwinkel unter denen Objekt und Bild erscheinen.

„Leitungselektronen“ sind nicht alle Elektronen im Leiter bzw. in der „Kupferleitung“, sondern nur diejenigen, die zur Leitung beitragen.

Am problematischsten für eine gelungene Begriffsbildung innerhalb der Schulphysik sind m. E. fachsprachliche Worte, die einerseits einen großen Bereich an (allesamt falschen) scheinbar physikalischen Alltagsbedeutungen abdecken und dennoch einen sehr kleinen Überlapp zum physikalischen Bedeutungsfeld besitzen, an den dann in der Schule angeknüpft wird. Paradebeispiel dafür ist das Muskelgefühl mit dem der statische Aspekt des Kraftbegriffes eingeführt wird.

„... ist das Kraftempfinden ein ungeeigneter Start auf dem Weg zum physikalischen Kraftbegriff. Fast untrennbar vermischt sind dort z.B. Aspekte, die den physikalischen Begriffen Energie, Leistung und Kraft zuzuordnen sind. Das Muskelgefühl ist deshalb ein äußerst tückischer Anknüpfungspunkt. Er ist für die Schüler zwar „einleuchtend“, leitet aber gar nicht zum Begriff, den der Unterricht im Auge hat. Das Muskelgefühl unterstützt ... die Vorstellung Kraft sei etwas, das einen Körper als eine Eigenschaft zukommt. Diese Vorstellung muss erst wieder sehr mühsam fortgeräumt werden, wenn Kraft als Beziehungsgröße, als Wechselwirkungsgröße angesehen werden soll.“ [DUIT88]

Auf eine weitere ungeschickte Formulierung bei der traditionellen Einführung des Kraftbegriffes macht Wolfram [WOLF93] aufmerksam. In Schulbüchern wird üblicherweise angegeben, dass die „Wirkung“ einer Kraft („die man ja nur an ihren Wirkungen erkennt“) von ihrer Richtung, ihrem Betrag und häufig auch von ihrem „Angriffspunkt“ abhängt [DORN93, KUHN94]. Ist mit diesem „Angriffspunkt“ nun der Ort der wechselwirkenden Objekte (z.B. Massenpunkte oder Punktladungen), der Berührungspunkt starrer Körper oder die

Stelle, an der man die üblicherweise zur Darstellung von Kräften benutzten Kraftpfeile beginnen lässt, gemeint? Die Aussage „Der Angriffspunkt hat sich also längs einer Geraden, der sogenannten Wirkungslinie der Kraft, verschoben, ...“ [KUHN94] spricht für letzteres. Auch die Pfeildarstellung von Gewichtskräften, die i. d. R. so gezeichnet sind, dass sie „im Schwerpunkt angreifen“, entspricht dieser Deutung. Dabei ist es gerade die Schwerkraft, die sich (im homogenen Feld) durch eine gleiche Beschleunigung *aller* Teile des Körpers bemerkbar macht (vgl. hierzu auch die Diskussion in Abschnitt 4.4.2.1.2). Ein möglicher Ausweg liegt nach [WOLF93] im Weglassen des an sich unnötigen, weil nicht eindeutig definierten Begriffs des Angriffspunktes. Bei der späteren Behandlung von Drehmomenten kommt es jedoch auf die Stelle an, an der „die Kräfte angreifen“. Dort müsste dann deutlich gemacht werden, dass der Begriff Angriffspunkt aus den Eigenschaften der betrachteten Körper heraus gebildet wird und nicht eine besondere Eigenschaft des Kraftbegriffes darstellt. Die Neudarstellung der Mechanik nach dem Karlsruher Physikkurs (vgl. Kapitel 5) vermeidet die genannten Schwierigkeiten, da anstatt der Kraft der Impuls in den Mittelpunkt gestellt wird. Unter diesem Gesichtspunkt bemerkt Herrmann zum „Angriffspunkt der Kraft“:

„Dies ist eines der Beispiele wie der Kraftbegriff unnötig kompliziert dargestellt wird. Wieder scheint die Kraft eine Sonderbehandlung zu erfordern. Als Vektor hat die Kraft Betrag und Richtung. Warum ist es notwendig ihr noch einen Angriffspunkt zuzuordnen? Ist dies eine Besonderheit der Kraft? Ganz und gar nicht. Es ist nicht mehr als eine ungeschickte Formulierung.

Die Werte der meisten physikalischen Größen beziehen sich auf eine der drei folgenden geometrischen Gebilde: einen Punkt, eine Fläche oder einen Raumbereich. (Zu den wenigen Ausnahmen zählt die Zeit.) Die Größen, die sich auf einen Punkt beziehen nennt man manchmal intensive, manchmal lokale Größen. Zu ihnen gehören zum Beispiel die Geschwindigkeit, der Druck, die Temperatur, alle Feldstärken, Potentiale und Dichten. Die Größen, deren Werte sich auf einen Raumbereich beziehen, sind die extensiven Größen. Zu ihnen gehören die Masse, die Energie, die elektrische Ladung und der Impuls. Diejenigen Größen, deren Werte sich auf eine Fläche beziehen, sind die Stromstärken und Flüsse. Zu ihnen gehören die elektrische Stromstärke, die Leistung (Energiestromstärke), die Massenstromstärke, die Kraft (Impulsstromstärke), der magnetische Fluss etc. Diese Einteilung gilt sowohl für skalare wie für vektorielle und auch für tensorielle Größen. So ist die Temperatur eine skalare und die elektrische Feldstärke eine vektorielle lokale Größe. Die elektrische Ladung ist eine skalare und der Impuls eine vektorielle extensive Größe. Die Leistung ist eine skalare, die Kraft eine vektorielle flächenbezogene Größe. Wir können nun klarer sagen, was es mit den Angriffspunkt von Kräften auf sich hat. Es soll ja die Angabe eines Ortes sein, auf den sich der Kraftvektor bezieht. Zwei Bemerkungen sind dazu am Platze:

1. Dieser Ort ist kein Punkt, sondern eine Fläche
2. Es ist in der Physik nicht üblich, diesen Ort in der Definition der Größe zu benennen. Es ist so als würde man sagen: Die Wirkung einer Temperatur ist bestimmt durch ihren Betrag und den Ort an dem sie herrscht. ...“ [HERR99]

Ein weiteres Beispiel für einen Fachbegriff, dessen Alltagsbedeutung einen nur geringen Überlapp zur physikalischen Bedeutung besitzt, ist der Begriff Bild. Es existieren zwar einige Bedeutungsfelder, wo physikalische und alltagssprachliche Bedeutung überlappen. Etwa bei „Bildern“ auf der Leinwand von Projektionsapparaten und dem „Bild“ auf der Filmebene eines Fotoapparates während der Belichtung. Ansonsten fallen unter den Bildbegriff der Alltagssprache z. B. Dinge (Foto, Gemälde, Dia), die in der Optik gerade mit dem Gegenpart des Bildbegriffes, nämlich als „Gegenstand“ bezeichnet werden. Der fachsprachliche Bildbegriff umfasst dagegen nicht nur die Kategorie des „reellen Bildes“ zu der o. g. Beispiele zählen. In der Strahlenoptik erscheint ein „reelles Bild“ an der Stelle, wo sich Lichtstrahlen, die vom gleichen Gegenstandspunkt ausgehen, wieder in einem Punkt vereinigen. Auch der scheinbare Ausgangspunkt divergierender Lichtstrahlen, d.h. eine Stelle, an die überhaupt kein Licht gelangt, wird als Ort eines „virtuellen Bildes“ bezeichnet. In diesem nur geometrisch durchschaubaren Aspekt des physikalischen Bildbegriffes liegen sicherlich einige Ursachen für die Erklärungsnot vieler Personen, wenn sie nach dem Ort des (virtuellen) Spiegelbildes gefragt werden.

Nicht jede irgendwie inkonsistente fachsprachliche Bezeichnung, die dem Fachmann auffällt, muss notwendigerweise für Schüler ein Problem darstellen. Mit dem für den empirischen Teil der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahren soll in diesem Sinne auch ein Instrument vorgestellt werden, das es prinzipiell erlaubt, einige durch die Fachsprache verursachte Missverständnisse beim Adressaten aufzudecken.

2.2.6 Historisch bedingte Bedeutungsverschiebungen

Neben der unvermeidbaren Unschärfe die ein Begriff erfährt, wenn er innerhalb der Alltagssprache verwendet, also auch dort zuerst gebildet wird, gibt es noch einen weiteren wesentlichen Aspekt, der die physikalische Begriffsbildung erschwert.

Die Begriffsstruktur der Fachphysik selbst ist manchmal aus historischen Gründen unsystematisch. Z. B. herrschte bis ins 18. Jahrhundert keine einheitliche Meinung unter Physikern was „Wärme“ eigentlich sei [HUND78b]. Die Alltagssprache enthält diese Unsicherheit in der Bedeutungsvielfalt des Clusterbegriffs Energie/Wärme/Temperatur bis heute. Die Problematik zeigt sich jedoch auch heute noch im Unterricht, in der Vermeidung der zur Beschreibung thermodynamischer Prozesse notwendigen Größe Entropie. Deswegen ist es nötig, bei diesen Prozessen mit den Begriffen Arbeit und Wärme zu operieren, die schwer (weil unnötig) vom Begriff Energie abgegrenzt werden müssen.

Arbeit:= Die Energie, die ohne Entropie, i. d. R. zusammen mit Impuls oder Drehimpuls transportiert wird.

Wärme:= Die Energie, die zusammen mit Entropie transportiert wird.

Bei „Wärme“ und „Arbeit“ handelt es sich um Transportgrößen, die nicht im Körper gespeichert werden können. In diesem Sinne ist es eine ungeschickte Formulierung von „spezifischer Wärmekapazität“ zu sprechen. Davon abgesehen, dass, wie an obigen Beispielen gezeigt wurde, sowohl „spezifisch“ als auch „Kapazität“ keine eindeutige fachsprachliche Bedeutung haben, suggeriert diese Bezeichnung geradezu, dass hier ein u. U. begrenztes Körper- bzw. Materialspezifisches Vermögen „Wärme zu speichern“ eventuell in Abhängigkeit von der Temperatur gemeint ist.

„Wenn man von Wasser redet, so denkt man in erster Linie an etwas in einem Behälter und erst in zweiter Linie daran, wie man es ein- oder ausgießt und man nennt das fließende oder fallende Wasser immer noch Wasser“ ... “Bei der Energie ist es (leider) üblich, erst einmal die Gießvorgänge zu benennen, und zwar je nach Beteiligung des Temperaturunterschiedes als Wärme oder als Arbeit. Im zweiten Schritt fragt man dann ob das auch gespeichert wird, und kommt prompt zu so schönen Begriffen wie „Arbeitsfähigkeit“, „Wärmekapazität“ oder „latente Wärme“, ... so als ob der Speicher noch unterscheiden könnte, wie er an die Energie gekommen ist.“ [TREI97, S295]

Zur unglücklichen fachsprachlichen Definition des Begriffes „Wärme“ kommen die oben angedeuteten zusätzlichen vielfältigen Verwechslungsmöglichkeiten aufgrund des umgangssprachlichen Bedeutungsreichtums des Wortes „Wärme“. Leider ergeben sich gerade dadurch, ähnlich wie beim Clusterbegriff Kraft/Energie/Impuls (vgl. Abschnitt 2.3.ff) auch Vermischungen mit dem an sich fachsprachlich klar gefassten Temperaturbegriff. [MEYE92, DUIT86b]. Wärme ist damit ein Beispiel für einen Fachbegriff, der die Begriffsbildung von angemesseneren, klareren und für die Physik wichtigeren Nachbarbegriffen (Innere Energie, Temperatur) unnötig erschwert.

2.3 Bezüge zwischen Schülervorverständnis, Alltagsbedeutung und historischer Entwicklung des Kraftbegriffes

Der Kraftbegriff wurde innerhalb der Physik keineswegs immer so eingeschränkt gebraucht wie heute. Er gehört damit auch im Hinblick auf seine fachwissenschaftliche Genese zu den besonders schwierigen physikalischen Begriffen. In der Alltagssprache wird er bis heute in einer Fülle von, sehr häufig mit Physik verknüpften, Alltagsbedeutungen verwendet, in denen sich teilweise historische Entwicklungsstufen widerspiegeln. Daneben besitzt er auch innerhalb der modernen Fachsprache noch mindestens 3 unterschiedliche Bedeutungen und kommt in einer Vielzahl von speziellen fachsprachlichen Bezeichnungen vor. Seine „physikalische Erklärungsmächtigkeit“ bestätigen übrigens auch die Ergebnisse der Wortassoziationen dieser Untersuchung (Abschnitt 4.4.2.3). Zum Wort „Kraft“ werden, neben dem dominierenden Aspekt „körperliche Stärke“, selbst von Versuchspersonen, die wenig mit Physik zu tun haben, häufig physikalische Begriffe bzw. Sachverhalte, die einer mechanischen Beschreibung zugänglich sind, assoziiert.

2.3.1 Zum Schülervorverständnis in Mechanik

Assoziationstests liefern erste Ansätze um das Bedeutungsfeld eines Wortes zu erfassen. Sie können grobe Hinweise z. B. auf Synonymitätsverhältnisse in der Alltagssprache, etwa zwischen „Kraft“ und „körperlicher Stärke“ geben. Verschiedene Untersuchungen kommen dabei zu sehr ähnlichen Resultaten. Bei seiner Untersuchung mit Schülern, die noch keinen Physikunterricht hatten (6. Klasse) fand R. Duit eine enge Verbindung zwischen Kraft und dem „Muskelgefühl“.

„Etymologische Wörterbücher ... geben Auskunft, dass das Wort Kraft einerseits vom altgermanischen „kraft“ stammt und dort die Bedeutungen „Fertigkeit, Geschicklichkeit, List, Kunst, Handwerk“ hat (im Englischen „crafty“ (schlau, listig) ist davon etwas erhalten). Andererseits gehört Kraft zu einer germanischen Wortgruppe, die etwa „drehen, winden, sich zusammenziehen, verkrampfen“ bedeutet. Mit dem Wort Kraft war deshalb die Vorstellung des Anspannens der Muskeln verbunden. Diese Vorstellung scheint auch heute noch die Bedeutung des Wortes Kraft für viele Schüler ohne Physikunterricht zu bestimmen.

...

Andere, im Alltagsgebrauch des Wortes Kraft enthaltene Bedeutungen, wie z.B. Geisteskraft, moralische Kraft, schöpferische Kraft, Kräfte der Natur (z.B. in Kräutern eingefangen), also die Bedeutung einer allgemeinen Wirkfähigkeit sowie die Bedeutung im Sinne von Macht ... finden sich in den Ergebnissen ... sehr viel seltener“ [DUIT84]

Bei älteren Schülern (10. Schuljahr) dominierten, neben Dingen, Vorgängen und Eigenschaften die mit körperlicher Stärke zu tun haben, jedoch bereits physikalische Termini.

Bei ebenfalls von den Schülern geforderten Umschreibungen und Beispielen zeigten sich dennoch kaum Auswirkungen des Physikunterrichts.

„Es scheint, dass es dem Physikunterricht nicht gelungen ist, die Vorstellung des „Kraft-Habens“ (also die Vorstellung von Kraft als einem, Körpern innewohnenden Besitz) wesentlich zu erschüttern.“ [DUIT84]

Was den Bedeutungsbereich des Wortes „Kraft“ angeht, also mit anderen Worten den alltagstheoretischen Kraftbegriff, ist man mittlerweile in einer etwas sichereren Position. Seit Anfang der siebziger Jahre befasst sich ein ständig wachsender Zweig der Physikdidaktik mit Forschungen zum Thema Schülervorstellungen. Eine von H. Pfundt und R. Duit erstellte Bibliographie „*Students' Alternative Frameworks and Science Education*“, in der Arbeiten zu diesem Thema gesammelt werden, umfasste im Januar 1998 ca. 4500 Einträge. Über 700 davon befassen sich mit dem Bereich Mechanik [PFUN98]. Jung [JUNG85] weist mit einem Zitat von Diesterweg darauf hin, dass eine sich aus der Untersuchung von Schülervorstellungen ergebende Konzeption von Unterricht keineswegs neu ist.

„Beginne den Unterricht auf dem Standpunkte des Schülers, führe ihn von da aus stetig, ohne Unterbrechung, lückenlos und gründlich fort! Der Standpunkt des Schülers ist der Ausgangspunkt. Dieser ist also vor dem Unterricht zu erforschen. ... Ohne die Kenntnis des Standpunktes des Schülers ist keine ordentliche Belehrung desselben möglich. Man weiß ja sonst nicht was vorauszusetzen, wo anzuknüpfen ist. ...“

(Hervorhebungen im Original, Diesterweg 1835 in [JUNG85])

Wichtiger als eine bloße Ansammlung von einzelnen Schülervorstellungen ist dabei die Aufdeckung von bestehenden komplexen Denkraum bzw. Präkonzepten, in die neu angebotene Lehrinformationen zwangsläufig eingebettet werden.

„Jeder Diskurs, sei es im Alltag, sei es in der Wissenschaft, setzt voraus, dass Äußerungen innerhalb bestimmter Rahmen (oder Horizonte) verstanden werden. Werden sie verfehlt, reden die Menschen aneinander vorbei. Wenn der Lehrer über „Licht“ spricht, meint er das in einem physikalischen Rahmen, während es der Schüler möglicherweise in einem Alltagsrahmen aufnimmt.“ [JUNG85]

Unter „Denkraum“ versteht Schecker [SCHE85, S22] Vorstellungen übergeordneter Art zu Gegenständen, Zielen und Methoden der Physik sowie Denkschemata und Problemlösungsstrategien. Präkonzepte sind für ihn stabile inhaltliche Repräsentationen spezifischer Begriffe (wie Kraft, Elektron, Licht), einschließlich ihrer affektiven Besetzungen, sowie Erklärungsmuster für das Zustandekommen bestimmter Phänomene. Darunter können auch bestimmte Deutungen erfahrener, d. h. durchlebter oder beobachteter Situationen fallen. An einigen Stellen erscheint jedoch die Unterscheidung etwas unscharf. So könnte eine

Charakterisierung des bei Schecker übergeordneten allgemeinen Denkrahmens „*Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken*“ (vgl. *Tabelle 2.3.1*, rechts, letzter Spiegelstrich) ebenso gut als Aussage im Präkonzept „*Kraftausübung als Aktivität*“ verstanden werden.

Präkonzept	Denkrahmen
<p>„<i>Kraftausübung als Aktivität</i>“</p> <ul style="list-style-type: none"> - „<i>nur bewegte, gespannte und belebte Körper können Kräfte ausüben (sowie die Erde und Magnete)</i>“ - „<i>Körper, die „nur so daliegen“ (z.B. Tisch, Straße) üben keine wirklichen Kräfte aus, die andere Körper verformen oder beschleunigen können; sie leisten passiven Widerstand gegen angreifende Kräfte</i>“ - „<i>Besondere Probleme bereitet Schülern die Vorstellung, das passive Körper variable Kräfte ausüben</i>“ - „<i>Actio und reactio beziehen sich auf den gleichen Körper; actio ist die aktive, angreifende Kraft; reactio ist eine passive Widerstands- oder „Gegenkraft“ des Körpers</i>“ - „<i>„actio gleich reactio“ gilt für den Gleichgewichtszustand, damit sich eine Wirkung zeigt muss actio größer sein als reactio.</i>“ 	<p>„<i>Verursacher-Fixierung/Aktivitätsdenken</i>“</p> <p>„<i>Orientierung der Beobachtung, Beschreibung und Erklärung von Vorgängen an den vermeintlichen Verursachern</i>“</p> <ul style="list-style-type: none"> - „<i>Einteilung von Systemkomponenten in aktive, handelnde Teile und solche mit reagierender, passiver Rolle.</i>“ - „<i>Konzentration auf die technischen Verursacher eines Vorgangs statt auf die physikalisch wechselwirkenden Körper</i>“ - „<i>Vorstellung, dass nur aktive Körper Kräfte ausüben können</i>“

Tabelle 2.3.1

Beispiel für Elemente eines Denkrahmens und eines Präkonzeptes bei Schecker (aus [SCHE85, S340 u. S343]).

Einen Überblick über einige der gefundenen Erkenntnisse gibt Schecker bei der Einordnung seiner eigenen Arbeit in den internationalen Forschungsstand. Die aus seiner Arbeit [SCHE85] entnommene *Tabelle 2.3.2* stellt einige Ergebnisse der dort referierten Untersuchungen in übersichtlicher Form zusammen. Kritiker mögen anmerken, dass eine derartige Verkürzung bei der Beschreibung von Schülervorstellungen einer individuellen Betrachtung nicht gerecht werden kann. M. E. ist es jedoch vernünftig sich zunächst mit Aspekten des Vorverständnisses zu befassen, die in gewisser Weise universell zu sein scheinen, auch auf die Gefahr hin, dass vielleicht systematische Elemente, z. B. Aspekte, die aus auswertetechnischen Gründen leichter verallgemeinerbar sind, oder Erklärungen die aus fachwissenschaftlicher Sicht vernünftiger erscheinen, in derartigen Zusammenfassungen bevorzugt werden.

„Es ist klar, dass diese hermeneutischen Verfahren Schwächen haben, auch dann, wenn man „harte“ statistische Methoden anwendet. Diese können die Interpretation nicht ersetzen und werden überhaupt erst sinnvoll wenn es Konsens über mögliche Deutungen gibt. Konsens wird aber in zunehmenden Maße auch dadurch gesucht, dass man Ansätze und Ergebnisse weit auseinanderliegender Arbeitsgruppen miteinander vergleicht. Dabei scheinen sich breite

Übereinstimmungen in den Deutungen zu bestätigen. Natürlich kann man nicht ausschliessen, dass es sich nur um Konsens der den Forschern verfügbaren Deutungsmuster handelt. Angesichts konkreter Ergebnisse wird man diese Bedenken zur Zeit jedoch hintenansetzen können, von einigen Streitfällen abgesehen“ [JUNG85]

Der internationale Erkenntnisstand zu Schülervorstellungen im Bereich Mechanik führte bereits zu einem diagnostischen Test, der, ähnlich wie der Fragebogen in der vorliegenden Arbeit, Items aufweist, in denen bestimmte Antwortalternativen bestimmten Alltagsvorstellungen zugeordnet sind. Der sogenannte Force Concept Inventory (FCI) (d.h. in etwa „Bestandsaufnahme des Kraftkonzeptes“) wird seit einigen Jahren im anglo-amerikanischen Raum als Standardtest zur Diagnose von Schülervorstellungen eingesetzt [HEST92]. Bei den verwendeten Fragen handelt es sich um die Darstellung einfacher Sachverhalte, teilweise in bildlicher Form, auf die ad hoc Antworten möglich sind, bei denen Alltagsvorstellungen eine starke Alternative zur physikalischen Denkweise darstellen. [GERD99]. Jedoch wird auch im FCI bei den weitaus meisten Fragen, im Gegensatz zur vorliegenden Untersuchung direkt nach „Kräften“ gefragt. Die vorgegebenen falschen Antworten lassen sich dabei einer oder mehreren falschen Alltagsvorstellungen zuordnen, so dass sich für den Lehrer die Möglichkeit ergibt, bereits vor dem Unterricht Erkenntnisse über bestimmte Sichtweisen von Schülern zu gewinnen. Dieser Einsatz des Tests ist unkritisch, da etwaige testbedingte Interpretationsfehler aufgrund der Rückkopplung durch das anschließende Gespräch mit den Schülern wegfallen.

Was die Aufdeckung bestimmter Fehlkonzepte bzw. bestimmter korrekter Aspekte des Newtonschen Kraftkonzeptes anbelangt, ist der Test jedoch nicht unumstritten. [HUFF95]. Ein Problem hierbei ist die Tatsache, dass verschiedene Alltagsvorstellungen keine konsistente Alltagstheorie benötigen. Sie hängen nur lose zusammen und werden kontextabhängig nebeneinander benutzt. D.h. verschiedene Situationen können verschiedene Alltagsvorstellungen aktivieren [GERD99]. Genauso wie umgangssprachliche Wortbedeutungen (z.B. des Wortes „Kraft“) sind sie i. d. R. unscharf und kontextabhängig.

Tabelle 2.3.2 (folgende 3 Seiten)

Tabellarischer Überblick über die Kernaussagen der in [SCHE85] referierten Studien (Tabelle ist in dieser Form aus [SCH85, S388] übernommen, für die Quellenangaben vgl. [SCHE85, S542ff])

Autor	Dynamik Kraftbegriff Kraft und Bewegung	Kinematik Geschwindigkeit Beschleunigung	Allgemeine Merkmale der Schilervortheorien	Didaktisch- methodische Konsequenzen	sonstiges
Arons 1981 (College)	<p>Nur belebte Körper können eine Kraft ausüben („vitalistische Vorstellung“).</p> <p>In Richtung der Bewegung wirkt immer eine Kraft.</p> <p>Das 3. Axiom wird völlig falsch verstanden: Actio und reactio greifen am gleichen Körper an</p>	<p>Schwierigkeiten bei der Unterscheidung zwischen <u>Zeitraum</u> und <u>Zeitpunkt</u>. Daraus resultieren Probleme mit dem Begriff der <u>Momentangeschwindigkeit</u>. Ein nach oben geworfener Körper bleibt im Umkehrpunkt einen „Moment“ stehen.</p>	<p>Kraftvorstellungen erinnern an die Impetustheorie</p>	<p>Das kompakte Vortragen der Newtonschen Theorie ist als Lehrweise „gescheitert“. Schilervorstellungen müssen Gelegenheit haben ihre Gedankengänge zu artikulieren</p>	<p>Geringe Korrelation zwischen der Fähigkeit zur rechnerischen Anwendung von $F = m \cdot a$ und dem Vermögen korrekte Kraftdiagramme (Kraftpfeile) zu zeichnen.</p>
Towbridge 1980/81 (College)	<p>Geschwindigkeit ist ein Zusammenhang von Zeit und Weg (1 h für 1 km), keine eigenständige Verhaltnisgroe.</p> <p>Beim Vergleich der Geschwindigkeiten zweier Körper wird die relative Position als Kriterium herangezogen.</p> <p>Zuordnung einer Momentangeschwindigkeit zu einem Zeitpunkt ist große begriffliche Hürde: Zu einem <u>Zeitpunkt</u> haben Körper keine Geschwindigkeit; sie haben nur einen Ort.</p> <p>Bei Beschleunigung besteht kein qualitatives Verständnis der Verhaltnisgroe $\Delta v / \Delta t$. (Bei $v = 0 : a = 0$)</p> <p>Berechnung von Beschleunigungswerten mittels $a = \Delta s / \Delta t / \Delta t$</p> <p>Als Kriterium für Beschleunigungsvergleiche werden die Endgeschwindigkeiten herangezogen.</p>		<p>Die Schilervorstellungen sind sehr resistent gegen Veränderungen durch Unterricht</p>	<p>Typische Fehlvorstellungen müssen im Unterricht direkt angesprochen werden. Mehr Zeit für grundlegende kinematische Begriffe, denn schon vor Einführung des Vektoraspekts bestehen große Verständnisschwierigkeiten bei den kinematischen Begriffen</p>	<p>Keine durchgehende Übereinstimmung zwischen formalen Fähigkeiten in konventionellen Tests und echter physikalischer Konzeptualisierungsfahigkeit</p>
Jung 1981 (8. bis 13. Klasse)	<p>Nur aktive Körper können richtige Kräfte ausüben. Dem stehen passive Widerstände von Korpfern entgegen, auf die Kräfte einwirken</p> <p>Körper (besonders bewegte) können „Kraft haben“, ohne sie auszuüben (Vermischung mit Energie)</p> <p>Die Größe Kraft korrespondiert mit der erreichten Endgeschwindigkeit, nicht mit dem <u>Beschleunigungsvorgang</u></p> <p>Kraft ausüben heißt „In-Bewegung-setzen“. Das Zeitintervall des Kraftausubens bleibt unbeachtet.</p> <p>Verdinglichung von Kraft, als selbstständige Entität, die in Korpfern sitzt.</p> <p>Actio und reactio greifen am gleichen Körper an.</p> <p>Die Zentrifugalkraft wirkt unabhängig vom Bezugssystem immer.</p>	<p><u>Beschleunigen</u> heißt In-Bewegung-setzen.</p> <p>Ein nach oben geworfener Stein steht im Umkehrpunkt einen Augenblick still.</p> <p><u>Geschwindigkeit</u> wird auf Betrag (Tempo) reduziert.</p> <p>Eine Kreisbewegung ist unbeschleunigt.</p> <p>Kein Verständnis von Momentangeschwindigkeit zu einem <u>Zeitpunkt</u>.</p>	<p>Schilervorstellungen fragen nach den „Ursachen“ eines Phänomens und geben sich nicht mit funktionalen Beschreibungen zufrieden.</p> <p>Das Denken der Schilervorstellungen ist nicht nach Begriffen sondern nach <u>Episoden</u> geordnet</p>	<p>Die speziellen Fehlvorstellungen können am effektivsten von der Ebene der Denkkategorien her aufgebrochen werden (Bsp.: funktionales statt kausales Denken, Denken in Relationen statt in Eigenschaften).</p> <p>Keine Aktivierung von Schilervorstellungen bevor das physikalische System vermittelt ist; sonst ist ein Abbau falscher Vorstellungen schwierig.</p> <p>Vorschlag für eine Behandlung der Mechanik, die eine Aktivierung falscher Vorstellungen vermeidet</p>	<p>Trägheit ist die zu überwindende „Lahmheit“ eines Körpers.</p> <p>Vermischung von Trägheits- und Haftreibungsphanomenen.</p>
Watts 1983 (11 bis 18 Jahre)	<p>Vermischung von Kraft und Energie.</p> <p>Nur aktive Körper können Kraft ausüben.</p> <p>An einem bewegten Körper wirkt eine Kraft in Bewegungsrichtung.</p> <p>Bewegung ist eine Kraft.</p>				

Autor	Dynamik Kraftbegriff Kraft und Bewegung	Kinematik Geschwindigkeit Beschleunigung	Allgemeine Merkmale der Schülertheorien	Didaktisch- methodische Konsequenzen	sonstiges
Viennot 1979 (SII, Universität)	<p>Je nach Situation aktivieren die Schüler 3 verschiedene Vorstellungen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.) $F = m \cdot v$: Kraft des Körpers in Bewegungsrichtung, wenn diese vorgegeben ist. 2.) $F = m \cdot a$: Bei Zusammenfallen von Kraft und Bewegungsrichtung, bzw. in Rechenaufgaben 3.) Trägheitskräfte : Bei Kreisbewegungen <p>Actio und reactio greifen am gleichen Körper an. Falls eine Bewegung zustande kommen soll, muss actio größer sein als reactio.</p> <p>Bei Kreisbewegungen wird die Zentrifugalkraft unabhängig vom Bezugssystem als wirkend angenommen</p>		<p>Nähe zur Impetustheorie. Das „intuitive Denken“ hat sich im Alltag bewährt und ist keineswegs „primitiv“</p> <p>Unterschiedliche Konzepte werden mit gleichen Worten belegt: Kraft ist ein „undifferentiated explanatory complex“</p>	<p>Intuitive Schemata müssen thematisiert werden.</p> <p>Die Schüler müssen sich ihres intuitiven Denkens bewusst werden.</p>	
Warren 1979 (Universität)	<p>Die fundamentale Aussage des 1. Axioms über den Zusammenhang von Kraft und Beschleunigung wird von den Schülern (und selbst von manchen Lehrbuchautoren) unbewußt zugunsten der Vorstellung abgelehnt, dass Kraft Bewegung bewirkt.</p> <p>Das 3. Axiom wird von kaum einem Schüler richtig verstanden: Actio und reactio greifen am gleichen Körper an; Wechselwirkungs- und Gleichgewichtskräfte werden vermischt</p> <p>Gleichförmige Kreisbewegung bleibt weitgehend unverstanden (nur ¼ der Schüler zeichnen die Resultierende radial nach innen).</p> <p>Keine klare Trennung zwischen Einzelkräften und der Resultierenden.</p>	Geschwindigkeits- und Beschleunigungsbegriff werden auf ihre Beträge reduziert		<p>Vorschläge zur Verbesserung der Einführungsweisen der Begriffe. Warren kritisiert missverständliche Lehrbuchdarstellungen.</p> <p>Physikalische Situationen dürfen nicht nur als <u>Rechenanlässe</u> behandelt werden. Plädoyer für mehr begriffliche/qualitative Behandlungsweisen.</p>	Die Fähigkeit zur Errechnung numerisch korrekter Lösungen in Standardaufgaben erfordert kein wirkliches Begriffsverständnis
Leboutet-Barrel 1976 (SII)	Persistenz des Konzepts „Kraft haben“ bis in die Oberstufe. Daneben steigender Gebrauch von „Kräfte wirken“ (auch ohne Physikunterricht)		Keine grundsätzlichen Verschiebungen von einem intuitiven zu einem physikalischen Kraftverständnis bis in die Oberstufe		
Champagne 1980 (College)	<p>Grundsätzliche Schülervorstellung</p> <p>V prop. F</p> <p>Bei Fortfall der Triebkraft kommt ein Körper nach Verbrauch seiner gespeicherten Kraft zur Ruhe</p>		Die Schülertheorien sind vergleichbar denen von Aristoteles, Galilei oder der Impetustheorie. Die Theorien sind dem Alltag gut angepasst. Sie sind sehr flexibel. Sie können Elemente der Newtonschen Theorie aufnehmen, ohne sich in ihrer Grundstruktur zu verändern	Das Umdenken von den Alltagstheorien zum Newtonschen System entspricht einem Paradigmenwechsel. Das „elegante“ Lehren der klassischen Mechanik hat sich als ineffektiv erwiesen. Schülervorstellungen und wissenschaftliche müssen explizit <u>gegenübergestellt</u> werden	„Gute“ Schüler unterscheiden sich von „schlechten“ u.a. dadurch, dass sie zwischen unmittelbarer Beobachtung und physikalischer Beschreibung von Phänomenen <u>bewusst trennen</u>

Autor	Dynamik Kraftbegriff Kraft und Bewegung	Kinematik Geschwindigkeit Beschleunigung	Allgemeine Merkmale der Schülertheorien	Didaktisch- methodische Konsequenzen	sonstiges
Mc Closkey 1983 (High Scholl, College)	Vom Bewegter wird auf den bewegten Körper Kraft übertragen.	Nach Schülervorstellungen bewegen sich Körper z.T. anders als in der Realität. Beispiel: Kreisbahn als erhaltungsgröße auch nach Wegfall der Zentralkraft.	Nähe zur Impetustheorie (z.T. wörtliche Übereinstimmung mit historischen Texten) . „Kreispetus“	Schüler verarbeiten den Lehrstoff auf der Grundlage einer intuitiven Impetustheorie. Die Schüler müssen ausdrücklich nach ihren intuitiven Vorstellungen gefragt und diese der Newtonschen Mechanik gegenübergestellt werden.	Besonderheit der Arbeit von Mc C. Schüler <u>handeln</u> z.T. nach falschen Annahmen über das Verhalten realer Körper. Möglicher Grund. Optische Täuschungen in mitbewegten Bezugssystemen
Clement 1982 (College)	Bewegung beinhaltet Kraft (“motion implies force”). 1. Zur Aufrechterhaltung einer Bewegung ist eine Kraft in Bewegungsrichtung erforderlich („erfundene Kraft des Körpers“) 2. Bei Bewegungen, die gegen eine Bremskraft fortschreiten, ist die „erfundene Kraft“ größer als die Bremskraft. 3. Schnelligkeitsänderungen kommen zustande weil die Kraft des Körpers sich aufbaut oder abstirbt		Große Nähe der Schülersaussagen zu Bewegungen zu Galilei. Die Schülertheorie ist eine auf Erfahrung basierende, plausible Theorie. Das Umdenken zur Newtonschen Sicht ist wie in der Physikgeschichte eine große begriffliche Hürde.	Die Schüler müssen sich ihrer qualitativen Fehlvorstellungen bewusst werden und sie aussprechen Clement empfiehlt Galileis Dialogmethode als Modell für den Unterricht	Qualitative Fehlvorstellungen sind z.T. unter formalen Fähigkeiten versteckt
Whitaker 1983 (College)	Zur Aufrechterhaltung einer Bewegung ist eine Kraft erforderlich. Bei Wegfall der Kraft kommt die Bewegung bald zum Stillstand.	Freier Fall in einem sich mit gleichförmiger Geschwindigkeit mitbewegenden Bezugssystem: Der fallende Körper bleibt zurück.	Große Nähe zu Aristotelischen Vorstellungen	Die Schüler müssen sich ihrer Sichtweise bewusst werden, <u>bevor</u> die Newtonsche Sichtweise behandelt wird	Schüler berücksichtigen bei Aufgabenlösungen häufig Reibungswiderstände, auch wenn im Aufgabentext davon nicht die Rede war.
Schenk 1983 (SH)	Rund die Hälfte der untersuchten Schüler vermeidet jegliche mechanische Konzeptualisierung, bzw. hält konsequent an Alltagstheorien fest: - Die Aufrechterhaltung einer Bewegung oder einer unnatürliche Lage erfordert Kraft/Energie - Eine Bewegung hat Kraft Nur wenige Schüler erreichen ein Konzeptualisierungsniveau, auf dem sie eindimensionale Bewegungen unter dem Einfluss konstanter Kräfte korrekt beschreiben können	Geschwindigkeit impliziert Schwung oder Kraft. Bewegung und bewegte Masse werden nicht getrennt.	Schülertheorien sind im Alltag bewährt. Im Vergleich zu physikalischen Theorien ist ihr Anwendungsbereich jeweils sehr begrenzt		Zwischen dem Formalisierungsniveau (Formelkenntnis, Rechenfertigkeit) und dem Konzeptualisierungsniveau (Begriffsverständnis) bestehen Diskrepanzen.

2.3.2 Die Nähe alltagstheoretischer Konzepte zu aristotelischen Ansichten über Bewegung und zur Impetustheorie

Bei der Betrachtung der Spalte „allgemeine Merkmale der Schülertheorien“ fällt auf, dass in der Hälfte der aufgeführten Studien von Gemeinsamkeiten zwischen Schülertheorien und früheren physikalischen Theorien (Aristotelische Bewegungslehre, Impetustheorie) die Rede ist. Auch Schecker sah sich aus fachdidaktischen Erwägungen heraus veranlasst, seiner Untersuchung ein historisch-wissenschaftstheoretisches Kapitel hinzuzufügen. Er begründet dies mit den Punkten:

„1.) Das Schülervorverständnis zeigt in Teilen Anklänge zu früheren physikalischen Theorien. Die genauere Kenntnis der entsprechenden historischen Entwicklungsstufen trägt zum Verständnis der Schülerpräkonzepte und –denkrahmen bei.

2.) Die Probleme von Schülern beim Aufbau physikalisch produktiver Denkrahmen und allgemeiner Interessen zeigen Parallelen zum Übergang vom aristotelischen zum galileisch-newtonschen Wissenschaftsverständnis, der als Geburtsstunde der modernen Naturwissenschaft gilt. Das Wissen um die historische Schwelle erhellt die Probleme der Schüler.

3.) Das Festhalten der Schüler an einem umfassenden, intuitiven Kraftbegriff auch nach der Behandlung der Newtonschen Theorie im Unterricht hat Anklänge zur Durchsetzungsgeschichte der Newtonschen Kraftvorstellung nach Veröffentlichung der „Principia“. Die Reflexion der wissenschaftsgeschichtlichen Prozesse macht die Akzeptanzproblematik auf Seiten der Schüler verständlicher.“ [SCHE85, S401]

Wenn sich aber in „Schülerpräkonzepten und Denkrahmen“ derartige historische Bezüge feststellen lassen, ergibt sich daraus zwangsläufig, dass auch die Alltagsbedeutung des Wortes „Kraft“ entsprechende Bezüge enthält. Im Gegensatz zur Fachwissenschaft, in der (nach jeweils akzeptiertem Erkenntnisstand) falsche Begriffsbedeutungen spätestens mit dem Aussterben der ihr anhängenden Wissenschaftlergeneration ignoriert werden können, bleibt in der Alltagskommunikation, in der ein entsprechendes Regulativ fehlt, die einleuchtendere Variante bestehen. Insbesondere wenn sie sich, wie z. B. einige Aspekte des aristotelischen Kraftkonzeptes, im Alltag ausgezeichnet bewähren.

„Mit der allgemeinen Weltsicht des Aristoteles, ja sogar länger als sie, durch fast 2000 Jahre, blieben die Grundlagen der aristotelischen Bewegungslehre herrschend. ...

So hatte Aristoteles drei Arten der Bewegung zu unterscheiden. Es gibt Bewegungen in ungestörter Ordnung; das sind die Drehungen der himmlischen Sphären, der äußeren Sphären und die Sphären der Planeten um die Weltmitte. Da sich nicht die Sterne einzeln, sondern die ganzen Sphären bewegen, ist kein Widerstand zu überwinden, es wird nichts beiseite geschoben. Unter den irdischen Bewegungen gibt es solche, die eine gestörte Ordnung wiederherstellen; das

sind die natürlichen Bewegungen des Steigens und Fallens. Das Leichte strebt nach oben, das Schwere nach unten, dem ihm zukommenden Ort entsprechend. Die Erde ruht in der Weltmitte, weil sie aus Schwerem besteht. Der Mittelpunkt der Erde entspricht nicht von vornherein der Weltmitte, vielmehr fallen beide Mittelpunkte deshalb zusammen, weil die Erde schwer ist. Die dritte Bewegung ist die gewaltsame Bewegung von Körpern; sie bedarf eines Antriebs.

Ein Vakuum ist nicht möglich. Neben logischen Gründen nennt Aristoteles auch physikalische Gründe: Im Vakuum wüsste ein Körper ... nicht, wie er sich bewegen sollte.“ [HUND78a]

Nach Schecker bezeichnet der Begriff „Kraft“ in der aristotelischen Bewegungslehre in zwei miteinander verwobenen Bedeutungen eine Bewegungsfähigkeit, die vom speziellen Beweger abstrahiert ist.

„Zum einen ist Kraft das Vermögen einen Körper in einer bestimmten Zeit über eine Strecke zu bewegen (Arbeits-/Leistungsfähigkeit gegen Reibungskräfte); zum anderen benennt Kraft die Fähigkeit, einen Körper aus dem „natürlichen“ Ruhezustand in Bewegung zu setzen (Kompensation der Haftreibungskraft)“ [SCHE88]

Gewisse aristotelische Sichtweisen lassen sich auch in Formulierungen von Schülern wiederfinden [SCHE88]:

- „Ein Körper bewegt sich nur bei ständiger Krafteinwirkung.“
- „Je größer die Kraft, desto größer die Geschwindigkeit.“
- „Kraft bedeutet Bewegungs- oder Wirkungsvermögen.“
- „Ruhe und Bewegung sind wesensmäßig zu unterscheidende Zustände.“

Bei der Erklärung der Wurfbewegung zeigen sich Schülerbeschreibungen dagegen fortschrittlicher. Sie ähneln stark der Impetustheorie. Die komplizierte und zu Widersprüchen führende aristotelische Beschreibung, die einen externen Beweger vorsieht, der die Bewegung des geworfenen Steins vorantreibt, wenn er die Hand des Werfers verlassen hat, kommt in ihnen nicht mehr vor.

„Aristoteles argumentierte folgendermaßen: Der „erste Beweger“ (die Hand des Werfers) teilt der ihm nächsten Luftschicht nicht nur Bewegung mit, sondern auch die Fähigkeit ihrerseits etwas anderes zu bewegen (die nächste Luftschicht, bzw. den Stein). Eigenbewegung und Fähigkeit etwas anderes zu bewegen erlöschen nicht gleichzeitig, so dass die erste Luftschicht die zweite noch bewegen kann, wenn sie selbst bereits ruht. So pflanzt sich die Bewegungskraft durch die Luftschichten bis zum Stein fort (eine Art Nahwirkungstheorie). Von Übertrag zu Übertrag nimmt die Fähigkeit, etwas anderes zu bewegen, immer mehr ab und die Wurfbewegung erlahmt, bzw. der Stein folgt nur noch seiner natürlichen Fallbewegung.“ [SCHE85, S409]

Die Impetustheorie (Der Name Impetustheorie bezeichnet eine Gruppe von Bewegungslehren, die im 13. und 14. Jahrhundert stark diskutiert wurden) entspricht nach Schecker dem Schülervorverständnis über Kraft in weitaus stärkerem Maße als die Newtonsche Dynamik. Diese Aussage wird auch durch die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung (vgl. Kapitel 4, Abschnitte 4.4.1 und 4.4.2.1.1) bestätigt. Sie deuten ferner darauf hin, dass Versuchspersonen, die sich weniger intensiv mit Physik befassen und zu Erklärungen im Muster der Impetustheorie neigen, damit ihre Voraussagekompetenz bei physikalischen Voraussagen erhöhen. Es ist durchaus denkbar, dass es sich dabei weniger um vorunterrichtliche „Präkonzepte“ handelt, als vielmehr um eine, mit physikalischen Schulwissen erweiterte Alltagstheorie, die viele im Alltag relevanten Erfahrungen zufriedenstellend erklärt.

„Die übertragbare Kraft gelte in allen Impetustheorien als „unkörperliche“ Bewegungsursache, die den körperlichen Beweger verlassen und auf den bewegten Körper übergehen müsse, um als Bewegungsursache wirken zu können. Es habe jedoch keine genau quantifizierbare Bewegungsgröße gegeben. Dauer, Wucht, Schwung, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Weite seien nebeneinander genannt worden.“ [SCHE85, S410]

An anderer Stelle fasst Schecker den Kern aller Impetustheorien in fünf Aussagen zusammen, die gleichzeitig eine gute Beschreibung weit verbreiteter Schüleraussagen darstellen.

- 1.) „Ein Körper bewegt sich aufgrund einer ihm „eingepprägten Kraft“, dem Impetus.“
- 2.) „Diese Kraft wurde auf den Körper beim Vorgang des In-Bewegung-Setzens von einem ersten Beweger übertragen oder durch Kontakt (Stoß) von einem anderen bewegten Körper übermittelt.“
- 3.) „Ein Körper kann um so mehr Impetus aufnehmen, je schwerer er ist.“
- 4.) „Die „Bewegungsstärke“ (Wucht) eines Körpers ist dem Impetus proportional.“
- 5.) „Der im Körper befindliche Impetus erschläfft mit der Zeit. Dies geschieht entweder von allein, oder es wird durch den Widerstand des Mediums bewirkt bzw. verstärkt.“

„Der große Fortschritt gegenüber Aristoteles bestand im Fortfall des externen Bewegers. Durch den Übergang der Kraft auf den bewegten bzw. „sich bewegenden“ Körper wurde es möglich, das Medium als Widerstand gegen eine Bewegung zu betrachten. Der Widerstand wurde jedoch nicht als äußere Kraft konzeptualisiert, denn auch die Impetustheoretiker sahen in der Kraft noch die Ursache der Bewegung selbst, nicht der Bewegungsänderung.“ [SCHE88]

Die in Anführungszeichen gesetzte Formulierung „sich bewegen“ deutet an, wie die Alltagssprache, die Vorstellung einer im Körper befindlichen „Fähigkeit zur Bewegung“ begünstigt. Andere Formulierungen suggerieren eine „speicherbare Transportgröße“ Kraft. Diese Eigenschaft erscheint in technischen Ausdrücken wie Kraftübertragung (durch Kardanwellen, Ketten etc.) und wird selbst in Schulbüchern „Muskelkraft wird durch Seil auf

Boot übertragen“, „Zum Übertragen von Druckkräften sind Stangen erforderlich“ [LIEB93] verwendet.

Neben der „Kraftübertragung“ legen auch Formulierungen wie „Kraftumlenkung“ und „Kräftezerlegung“ entsprechende Bedeutungen nahe. In der Überschrift zum Kapitel über einfache Maschinen [DORN93, S100] heißt es: „1. Eine Kraft wird umgelenkt“ und weiter „2. Eine Kraft wird halbiert“ Letzteres suggeriert eine willkürliche Zerlegung des Kraftvektors ohne Rücksicht auf die zugrundeliegenden Wechselwirkungen. Auch bei der Diskussion der schiefen Ebene wird üblicherweise die Gewichtskraft in eine Normal- und eine Hangabtriebskraft „zerlegt“. D.h. falls die Sprache einen Denkraum beeinflusst, wird hier die Vorstellung eines übertragbaren und aufteilbaren Dinges begünstigt. Eine solche Vorstellung orientiert sich jedoch eher an impetus-theoretischen Konzepten als an der Newtonschen Relationsgröße „Kraft“.

2.3.3 Die Trennung physikalischer Begriffe von der unmittelbaren sinnlichen Erfahrung bei Galilei und Newton

In der Veränderung des wissenschaftlichen Kraftbegriffes im 17. Jahrhundert spiegelt sich der grundsätzliche Übergang von der aristotelischen zur galileisch-newtonschen Physik wieder. Schecker geht in seiner Arbeit ausführlich auf didaktisch relevante Aspekte dieses wissenschaftlichen Umbruchs ein.

„Die an die Namen Galilei und Newton festzumachende Wende des physikalischen Denkens besteht in der Annahme die eigentliche Ordnung der Dinge erschließe sich erst durch die gedankliche Konstruktion prototypischer, reiner Phänomene, die in der Anfaß- und Vorzeigerealität nicht unmittelbar vorfindbar sind. Man kann die Newtonsche Dynamik nicht verstehen, ohne diesen grundlegenden Wandel mitzuvollziehen. Hier liegen verborgene Ursachen vieler Lernschwierigkeiten von Schülern.“ [SCHE88]

Diese neue Sichtweise eröffnet einen mathematischen Zugang zur Natur. Messen und Mathematik bilden für Galilei [HUND78a, S103] die Grundlagen der Naturwissenschaft, wobei reproduzierbare Experimente ideale Verhältnisse herstellen sollen. Jedoch dienen Experimente bei Galilei weniger dem Theoriefindungsprozess als vielmehr der Theoriedarstellung.

„Versuche spielen bei Galilei nicht die Rolle, die ihnen oft zugeschrieben wird. Er hat keineswegs aus tatsächlichen Fallexperimenten die Beschreibung der gleichförmig beschleunigten Bewegung abgeleitet. Solchen Behauptungen liegt ein falsch verstandener Induktivismus zugrunde. Ausgangspunkt der Theoriebildung sind theoretisch-spekulative Naturentwürfe. Daraus deduziert Galilei teilweise auf verschlungenen Wegen und über

Plausibilitätsbetrachtungen Voraussagen, die er dann mit Experimenten untermauert, die nach den Erfordernissen der theoretischen Entwürfe gestaltet werden („vollständig ebene Flächen“, „vollkommen runde Körper“, „ohne jegliche Hindernisse“, usw.). Dabei sind die Berichte über den Ausgang der Experimente mit Vorsicht zu genießen. Bei manchen Versuchen kann man davon ausgehen, dass Galilei sie nie tatsächlich durchgeführt hat.“ [SCHE85, S431]

Der gewaltige Fortschritt, den die Naturwissenschaften durch den Einzug der Mathematik erfuhren, war jedoch auf der anderen Seite mit einer bescheideneren Fragestellung verknüpft. Wenn Physiker heute davon sprechen, „sie hätten ein Phänomen verstanden“, bzw. „ein Sachverhalt sei nun als geklärt anzusehen“, beziehen sich diese Aussagen nicht auf die Erkenntnis metaphysischer „letzter Ursachen“ oder „höherer Zwecke“. Sie bedeuten lediglich, dass man über eine funktionale Beschreibung der Phänomene - günstigstenfalls im Rahmen einer abgeschlossenen Theorie - verfügt, die bestimmte, in die Zukunft gerichtete Voraussagen ermöglicht.

Laien und Schüler erwarten in dieser Hinsicht von den physikalischen Begriffen möglicherweise mehr als diese tatsächlich beinhalten. So kann man nicht nur in der Höhe der Abstraktion des Newtonschen Kraftbegriffes den Grund für Lernschwierigkeiten sehen, sondern auch in seiner *„scheinbaren Dürftigkeit“* [JUNG81a, S131]. Formulierungen in Schulbüchern wie „Wir haben die Kraft als Ursache einer Bewegungsänderung kennengelernt“ [BSV93] oder „Diese Kraft erkennen wir an ihren Wirkungen“ [DORN93] suggerieren sowohl eine deutliche Asymmetrie zwischen Ursache und Wirkung als auch die Antwort auf eine Warum-Frage.

„Für die mechanische Einwirkung ist nicht weiter wichtig, wodurch sie ausgelöst wird; häufig wird alle Denkeenergie auf diese weitergehende Frage verwendet, weil kausal und nicht funktional gedacht wird. (...) Ein Hauptproblem scheint zu sein, dass der Lerner sich nicht entschließen kann, bescheidene Fragen zu stellen, weil habituell sein Interesse Fragen der Verursachung und der Schuldzuschreibung gilt. Möglicherweise ist das Haupthindernis nicht, wie oft gesagt wird, die Höhe der Abstraktion, sondern ihre - scheinbare - Dürftigkeit.“ (Hervorhebungen im Original) [JUNG81a, S131]

Nach Newton werden alle Bewegungsänderungen auf das Wirken von Kräften zurückgeführt. Auch die bisher als „Widerstände“ ausgeblendeten hemmenden Einflüsse des Mediums. Möglich wird diese Beschreibung durch die Annahme einer in der realen Welt nirgends beobachtbaren gleichförmigen Trägheitsbewegung, die für Aristoteles so absurd erschien, dass er gerade ihre Nichtbeobachtbarkeit als Beweis für die Unsinnigkeit der Existenz eines Vakuums ansah. Grundlage für die Vorstellung einer solchen Trägheitsbewegung ist dabei die Annahme eines absoluten Raumes und einer absoluten Zeit, d.h. eines für alle Zeiten festes Bezugssystems.

„Newtons Voraussetzung eines Raumes, der unabhängig von der Erfüllung durch Materie gedacht werden kann, war durch zeitgenössische Gedanken vorgeformt. Aber die zentrale Stellung, die der absolute Raum bei Newton annimmt, liegt daran, dass man nur auf dieser Grundlage eine vernünftige Bewegungslehre aufbauen konnte.“ [HUND78a, S133]

1687 erschien Newtons *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Grundlagen der mathematischen Naturlehre). Die berühmtesten Sätze sind heute unzweifelhaft seine drei „Gesetze der Bewegung“ aus dem 1. Buch der *Principia*. In *Tabelle 2.3.3* werden sie den entsprechenden Formulierungen eines modernen Schulbuchs für die Sekundarstufe II gegenübergestellt.

Newton Principia 1687	Übersetzung Delian 1988	Schulbuch Höfling 1978
Lex I. Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.	Gesetz I: Jeder Körper verharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmig geradlinigen Bewegung sofern er nicht durch eingedrückte Kräfte zur Änderung seines Zustandes gezwungen wird.	Das erste Newton-Axiom: Jeder Körper behält seine Geschwindigkeit nach Betrag und Richtung so lange bei, wie er nicht durch äußere Kräfte gezwungen wird, seinen Bewegungszustand zu ändern
Lex II. Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur	Gesetz II: Die Bewegungsänderung ist der eingedrückten Bewegungskraft proportional und geschieht in der Richtung der geraden Linie, in der jene Kraft eindringt.	Das zweite Newton-Axiom: Um einer Masse m die Beschleunigung a zu erteilen, ist eine Kraft F erforderlich, die gleich dem Produkt aus der Masse und der Beschleunigung ist.
Lex III. Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.	Gesetz III: Der Einwirkung ist die Rückwirkung immer entgegengesetzt und gleich, oder: die Einwirkungen zweier Körper aufeinander sind immer gleich und wenden sich jeweils in die Gegenrichtung	Das dritte Newton-Axiom: Wirkt ein Körper A auf einen Körper B mit der Kraft F_1 , so wirkt der Körper B auf den Körper A mit einer Kraft F_2 , die den gleichen Betrag, aber die entgegengesetzte Richtung wie F_1 hat.

Tabelle 2.3.3

Die drei Newtonschen Axiome (Tabelle aus [TREI97])

In der zeitgenössischen Diskussion der *Principia* standen jedoch nicht so sehr die drei Axiome, sondern andere Aspekte im Mittelpunkt des Interesses.

„...., stand in der zeitgenössischen Rezeption der *Principia* eindeutig das Konzept der allgemeinen Gravitation und das Gravitationsgesetz im Vordergrund. Die ausführlichen mathematischen Deduktionen in den *Principia* über Bahnkurven und wirkende Kräfte fanden große Anerkennung. Die qualitativen Elemente der Newtonschen Kraftkonzeption stießen dagegen eher auf Skepsis. Die Kritik der *Principia* beinhaltete die Frage ob es sinnvoll sei, Kraft als mathematische

Relationsgröße dem Prozess der Einwirkung zuzuordnen oder aber als physikalische Erhaltungs- und Austauschgröße im Körper selbst als Fähigkeit zur Einwirkung anzusiedeln“ [SCHE88]

Newtons Formulierungen sind dabei keineswegs immer so klar, wie dies z.B. die heute geläufige analytische Darstellung des zweiten Axioms als $F = m \cdot a$, bzw. $m \cdot dv = F \cdot dt$ vermuten lässt. Diese stammt aus Eulers „Mechanik“ von 1736 [SCHE85, S473]. So steht im zweiten Newtonschen Axiom nicht, dass Impulse *nur* durch Kräfte geändert werden können.

„..., aber gerade für die mit „nur“ ausgedrückte Teilaussage spendiert Sir Isaac ein eigenes Gesetz, nämlich das Erste, und man darf wohl vermuten, weil es alles andere als selbstverständlich ist“. [TREI97]

weiterhin lässt sich aus dem zweiten Axiom eine Asymmetrie herauslesen, die darin besteht, dass die Bewegungsänderung als Folge einer wirkenden Kraft entsteht.

„Sir Isaac formuliert ... keine Gleichheit (und erst recht keine Identität) von Kraft und Impulsänderungsrate, sondern eine einseitige Kausalbeziehung: Wenn Kraft, dann Impulsänderung. Erst Leibniz fordert, dass Ursache und Wirkung einander (zahlen- und wesensmäßig!) gleich sein sollen.“ [TREI97]

Schecker weist auf eine weitere Textstelle hin, in der Newton folgende Erklärung zum zweiten Axiom gibt.

„Eine angebrachte Kraft ist das gegen einen Körper ausgeübte Bestreben, seinen Zustand zu ändern, entweder den der Ruhe oder den der gleichförmigen geradlinigen Bewegung.

Diese Kraft besteht nur in dem Bestreben und sie verbleibt, nachdem sie dieses ausgeübt hat, nicht im Körper. Dieser verharret nämlich in jedem neuen Zustande nur vermöge der Kraft der Trägheit. Die beigebrachte Kraft ist verschiedenen Ursprungs, wie z.B. durch Stoss, Druck, Centripetalkraft.“ (Newton 1963, S22 in [SCHE85, S473])

Was Newton mit der im Original als „vis insita“ bezeichneten „Kraft der Trägheit“ gemeint hat, ist nie ganz klar geworden. Möglicherweise verstand er darunter eine Kraft, die auftritt, wenn man einen Körper beschleunigen will. Von Schecker werden noch weitere Stellen der Principia erwähnt, in denen Newton Kraft im Sinne von Impuls oder Kraftstoß verwendet. Er kommt zu dem Schluss, dass der nominale Gebrauch des Wortes „Kraft“ in den Principia deutlichen Interpretationsspielraum bietet, und lediglich die mathematische Verwendung der Kraftfunktion $F = F(m_1, m_2, \mathbf{r})$ eindeutig ist.

2.3.4 Die fehlende Trennung zwischen Kraft und Energie bis ins 19. Jahrhundert

In einem kleinen populärwissenschaftlichen Nachschlagewerk [NIES57] wird „Kraft“ als kennzeichnender Oberbegriff für den gesamten physikalischen Teil, in Abgrenzung zur Biologie (Oberbegriff Leben) und zur Chemie (Oberbegriff Stoff) verwendet. Unter diesen Oberbegriff „Kraft“, als Metapher für den Gegenstand der Wissenschaft Physik schlechthin, fallen die Bereiche Mechanik, Schall, Licht, Wärme, Magnetismus, Elektrizität und Atomenergie. In der Verwendung des Wortes „Kraft“ als Synonym für alle „Naturkräfte“, klingt etwas von der historischen Bedeutung eines umfassenden Kraftbegriffes an, wie er bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts, parallel zum mathematisierten Newtonschen Relationsbegriff, verwendet wurde.

Ein Abschnitt in Scheckers Arbeit [SCHE85, S467ff] beschäftigt sich ausführlich mit der fehlenden systematischen Trennung zwischen den beiden Begriffen, die heute die Bezeichnungen „Kraft“ und „Energie“ tragen. Sie bestand noch lange nach Erscheinen von Newtons „Principia“ in der Fachwissenschaft weiter und konnte erst im 19. Jahrhundert mit der exakten Formulierung der Energieerhaltung endgültig überwunden werden. Er sieht darin Parallelen zu den Schwierigkeiten der Schüler, die ebenfalls an einem wesentlich weiter gefassten, in vielen Fällen näher beim heutigen Energiebegriff liegenden Kraftbegriff festhalten. In einem Übersichtsartikel [SCHE88] fasst er wesentliche Punkte dieser Entwicklung in stark komprimierter Form zusammen, die es m. E. Wert ist an dieser Stelle ausführlich zitiert zu werden.

„Der „mathematische“ Relationsbegriff ist in der Tradition der analytischen Mechanik (Euler, d'Alembert, Lagrange, Hamilton) zu dem Kraftbegriff der klassischen Physik geworden; die Suche nach der „physikalischen“ Kraft führte zum Energiekonzept.

Die zweite Entwicklungslinie kann man mit den Namen Leibniz, Faraday, Helmholtz skizzieren. Ihr antreibendes Motiv war die tiefe Überzeugung von der Erhaltung der Naturkräfte. Zu den Grundlagen des Erhaltungsdenkens zählt neben der Entsprechung von Ursache und Wirkung („Aus nichts wird nichts“) ab dem Ende des 18. Jahrhunderts die Annahme der gegenseitigen Umwandelbarkeit der „Naturkräfte“ Licht, Magnetismus, Elektrizität, Bewegung, Gravitation. Faraday wurde davon bei der Erforschung der Induktion („Umwandlung von Magnetismus in Elektrizität“) angeleitet.

Einen wichtigen Schritt zur Differenzierung der Naturkräfte vollzog bereits Leibniz (1646 bis 1716) mit der Unterscheidung zwischen „lebendiger Kraft“ (vis viva) und „toter Kraft“ (vis mortua). Die vis mortua weist starke Bezüge zur Newtonschen Kraft auf, hat jedoch gleichzeitig Anklänge zur potentiellen Energie. Die vis viva kommt der kinetischen Energie sehr nahe.

Die Erhaltung der Naturkräfte blieb mangels mathematischer Präzisierung eher ein heuristisches Prinzip. Unter dem Eindruck der enormen Fortschritte der analytischen Mechanik bei der Formulierung der Mechanik in der Sprache der Infinitesimalrechnung ging das Interesse am konzeptuellen Ausbau der Krafterhaltung zurück. Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts gab es neue Anstöße durch den Begriff der Arbeit, der bei der technischen Entwicklung von Maschinen

Bedeutung erlangte. Die Arbeiten von Mayer, Joule und Helmholtz führten schließlich über das mechanische Wärmeäquivalent zu einer auch formal exakten Definition der universellen Energieerhaltung.

Erst damit war die Differenzierung der Naturkräfte abgeschlossen. Die Umbenennung der „physikalischen“ Kraft in Energie (damals ein Terminus technicus ohne Tradition) war eher unglücklich; man hätte besser der „mathematischen“ Kraft Newtons einen anderen Namen gegeben. Noch bis in unser Jahrhundert bezeichnet das Wort „Kraft“ umgangssprachlich meist etwas Energetisches.“ [SCHE88]

Bereits die wenigen hier angesprochenen Punkte machen deutlich, dass eine tiefere Auseinandersetzung mit der historischen Genese des physikalischen Kraftbegriffes die des Energiebegriffes mit einschließt. Ein entsprechender historischer Abriss würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen, selbst wenn er nur auf Aspekte beschränkt bliebe, die einen Bezug zur heutigen alltagstheoretischen Bedeutung der Worte „Kraft“ und „Energie“ haben. Festzuhalten ist jedoch, dass der physikalische Begriffsbildungsprozess nicht mit der allgemeinen Akzeptanz des „mathematischen“ Newtonschen Kraftbegriffes abgeschlossen war.

„... „Mathematische“ und „physikalische“ Kraft seien so unterschiedliche Konzepte, dass man sie nicht in einem Gattungsbegriff vereinigen könne. Mayer reservierte, wie Helmholtz und viele andere, für das letztere Konzept (heute Energie) das Begriffswort „Kraft“ weil er es für das physikalisch fundamentalere hielt.“ [SCHE85, S483]

Aus heutiger Sicht ist die Energie die fundamentalere Größe, die, neben anderen Erhaltungsgrößen, in der Quantenmechanik eine zentrale Rolle spielt. Der in Kapitel 5.1 vorgestellte Karlsruher Physikkurs trägt dem Rechnung, indem er, selbst bei der Behandlung der klassischen Mechanik im Unterricht, auf das Begriffswort „Kraft“ verzichtet.

Umgangssprachlich wird heute kaum jemand missverstanden, wenn er die Worte „Kraft“, „Leistung“ und „Energie“ synonym verwendet. In der Werbung für traditionelle Produkte (z.B. Autos, Motoren) ist oft von „Kraft“ („besitzt Durchzugskraft“, „strahlt Kraft und Eleganz aus“) die Rede. Bei moderneren Produkten werden dagegen häufiger modische Anglizismen wie z.B. „power“ verwendet („Power - PC“, „RTL - Der Power Sender“, „Power - Drink“). Gründe dafür dürfte weniger die in den meisten Fällen physikalisch richtigere, englische Bezeichnungen für Leistung sein, sondern vermutlich eine bei vielen Personen vorhandene negative Assoziation von „Kraft“ zum eher unbeliebten Physikunterricht. Da man Leistung ebenso wenig speichern kann wie Kraft, ist es nicht unwahrscheinlich, das „power“ als neues Wort für das bisherige umgangssprachliche Wort „Kraft“ wiederum in vielen Fällen etwas, was der Energie nahe kommt (Leistungsfähigkeit) bezeichnet. Bei den Assoziationen zum Wort „Kraft“ (vgl. Abschnitt 4.4.2.3) wird „power“ mehrmals genannt, allerdings weit seltener als „Energie“.