

Die Darstellung der Mechanik im Karlsruher Physikkurs

Reflexion von Unterrichtserfahrungen in der Klasse 9
und eine Untersuchung der Integration von KPK
Konzepten in den herkömmlichen Physikunterricht

Hausarbeit gemäß §33 OVP vorgelegt von
Oliver Passon

23. 2. 2008

STUDIENSEMINAR FÜR LEHRÄMTER AN SCHULEN
WUPPERTAL

- Seminar für das Lehramt an Gymnasien und Gesamtschulen -

Erstgutachter: Lutz Nuyken, StD

Inhaltsverzeichnis

1	Der Karlsruher Physikkurs	1
1.1	Mengenartige Größen	1
1.2	Die Gibbs Funktion	2
1.2.1	Die Systematik des KPK	3
1.3	Strom, Widerstand und Antrieb	4
1.4	„Pumpen“	5
1.5	Knotenregeln	5
1.6	Die Darstellung der Mechanik im KPK	6
1.6.1	Die (träge) Masse als „Impulskapazität“	6
1.6.2	Impuls, Kraft und Energie	7
1.6.3	Der Impuls als Vektor	8
1.6.4	Die Newtonschen Axiome	9
1.6.5	Gravitation	10
1.7	Zusammenfassung	10
2	Reihenplanung für die Mechanik nach dem KPK in der 9. Klasse	12
2.1	Thema: Energie	12
2.2	Thema: Mechanik	13
3	Reflexion der Unterrichtserfahrung	18
3.1	Anmerkungen zur Lerngruppe	18
3.2	Energie	18
3.3	Mechanik	19
3.3.1	Einführung	19
3.3.2	Der Mengencharakter des Impulses	19
3.3.3	Das Vorzeichen des Impulses	20
3.3.4	Antrieb von Impulsströmen und Impulsstromkreise	22
3.3.5	Impulsstromstärke (=Kraft)	22
3.3.6	$p=mv$	22
3.3.7	Das Schwerfeld und der freie Fall	23
3.3.8	Flaschenzug, Hebel und schiefe Ebene	23
3.3.9	Impuls und Energie	24
3.3.10	Impuls als Vektor	24
3.4	Die Behandlung der Begriffe des traditionellen Unterrichts	24
3.5	Ansätze für eine Evaluation	26
3.5.1	Ergebnisse des Vergleichstests	27
4	Zusammenfassung und Perspektiven	29
4.1	Fazit	30

A	Arbeitsblätter	31
B	Diskussion und Evaluation des KPK	43
	B.1 Der KPK in der fachdidaktischen Diskussion	43
	B.2 Die Evaluation des KPK durch Starauschek	45
	Literaturverzeichnis	47

Einleitung

Seit über 25 Jahren entwickelt die Physikdidaktik der Universität Karlsruhe unter Leitung von Prof. Dr. Friedrich Hermann den sog. Karlsruher Physikkurs (KPK). Seit 1994 sieht der offizielle Lehrplan vor, dass in Gymnasien in Baden-Württemberg in der Sekundarstufe I sowie der Klasse 11 nach diesem Konzept unterrichtet werden kann. Entsprechende Unterrichtsmaterialien sind verfügbar [1, 2, 3, 4]¹.

Ziel des KPK ist eine einheitliche Darstellung der Schulphysik durch Ausnutzung von Strukturähnlichkeiten der verschiedenen Teilgebiete (Mechanik, Wärmelehre, E-Lehre). Diese Strukturähnlichkeiten werden allerdings erst deutlich, wenn in jedem dieser Gebiete die sog. „mengenartigen“ Größen in den Mittelpunkt gestellt werden. Tatsächlich kann jedes Teilgebiet der Physik durch eine mengenartige Größe und deren zeitliche Änderung („Strom“) charakterisiert werden. Im Falle der Mechanik ist dies der Impuls², in der Wärmelehre die Entropie und in der Elektrizitätslehre die Ladung. Eine andere mengenartige Größe, die allerdings in allen Teilgebieten auftritt, ist die Energie. Dieser Umstand drückt die übergeordnete Rolle der Energie in allen Bereichen der Physik aus. Aus Sicht des KPK erlaubt die Betonung dieser Strukturähnlichkeiten nicht nur eine effizientere Nutzung der Lernzeit, indem in einem Gebiet verstandene Zusammenhänge einfacher transferiert werden können. Zusätzlich sei das universelle Strukturmodell auch anschaulicher und verständlicher.

Die Mengenartigkeit von Größen wird in der Schulphysik nur im Falle der elektrischen Ladung ausdrücklich thematisiert. Stattdessen werden in der üblichen Darstellungsweise von Mechanik und Wärmelehre andere Strukturmodelle entwickelt – teilweise durch das Nachzeichnen von historischen Lernwegen. In der Mechanik wird der Kraftbegriff in den Mittelpunkt gestellt. Der Impuls wird erst später im Zusammenhang mit Stoßprozessen eingeführt. Dort wird in der Regel seine „Mengenartigkeit“ nicht betont[6][S.10f]. Zudem wird er als abgeleitete Größe behandelt. In der Wärmelehre stehen traditionell die Begriffe Temperatur und Wärmemenge im Mittelpunkt³. Die Entropie wird in der üblichen Schulphysik gar nicht behandelt. Anders verhält es sich mit der Energie, die natürlich einen festen Platz in der Schulphysik hat. Ihre „Mengenartigkeit“ wird jedoch nicht durchgängig hervorgehoben und anstelle des Fließens von Energie steht eher ihre „Umwandlung“ zwischen verschiedenen „Energieformen“ im Mittelpunkt.

¹Es liegen auch englische, italienische, spanische, russische, slovenische und chinesische Übersetzungen des Lehrmaterials vor!

²Streng genommen in der „Translationsmechanik“. Die mengenartige Größe der „Rotationsmechanik“ ist der Drehimpuls. Für eine Einführung des Drehimpulses im Sinne des KPK wurden ebenfalls Konzepte ausgearbeitet [5].

³Ironischerweise ist die Wärme(-menge) nicht „mengenartig“. Es handelt sich um keine Zustands- sondern um eine sog. „Prozessgröße“. Aus diesem Grund existieren auch Konzepte für eine Darstellung der Wärmelehre, die auf den unintuitiven Begriff der „Wärme“ ganz verzichtet. Stattdessen wird hier die Wärmelehre konsistent mit dem Begriff der inneren Energie formuliert [7, 8]. Die Entropie wird auch hier nicht behandelt.

Relevanz des Themas und Bezug zu den Lehrerfunktionen

Die Beschäftigung mit dem Karlsruher Physikkurs erscheint mir aus verschiedenen Gründen sinnvoll. Zum einen verspricht er eine effizientere Nutzung der Lernzeit und einen nachhaltigeren Lernerfolg durch seine veränderte Sachstruktur, die eine vertikale Vernetzung verschiedener Teilgebiete der Physik herstellt. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Stofffülle bei gleichzeitiger Verkürzung der Unterrichtszeit ist die Bedeutung dieser Faktoren noch gewachsen. Zum anderen zeigen Untersuchungen, dass das Fach Physik zu den unbeliebtesten zählt⁴, was seinen Niederschlag auch im Wahlverhalten in der Oberstufe findet. Nach Hauptmann [5][S. 7] wird der Physikunterricht „als sehr theoretisch, abstrakt und hochgradig an Mathematik ausgerichtet empfunden“. Auch hier verspricht der KPK mit seinem an der direkten Anschauung orientierten Konzept des Strömens von mengenartigen Größen Abhilfe. In Zeiten, in denen sich die Diskussion über Unterrichtsentwicklung sehr stark auf methodische Fragen konzentriert, kann ein innovativer Blick auf die *Sachstruktur* ein nützliches Gegengewicht schaffen. Damit ist auch der Zusammenhang zu der Lehrerfunktion genannt, die neben dem Unterrichten im Vordergrund steht: „Evaluieren, Innovieren und Kooperieren“. Im Verlauf dieser Arbeit wird ausgeführt werden, wie alle drei Aspekte dieser Lehrerfunktion zum Tragen kommen. Der Aspekt „Innovieren“ und darin insbesondere die Reflexion „eigener beruflicher Erfahrung“ als Kompetenz im Sinne der „Rahmenvorgabe für den Vorbereitungsdienst in Studienseminar und Schule“ braucht dabei kaum gesondert hervorgehoben werden, denn er bildet den zentralen Inhalt der gesamten Arbeit.

Thema dieser Arbeit ist die Darstellung und Reflexion von Unterrichtserfahrungen mit dem KPK am Beispiel der Mechanik in der Klasse 9. Offensichtlich kann hier die Frage, wie nützlich Analogiebildungen zur Wärmelehre und Elektrizitätslehre sind, nicht adressiert werden, da die Schüler ihre erste Begegnung mit diesem Konzept haben. Zudem ist das Karlsruher Konzept in Baden-Württemberg seit langem erprobt, und es existieren bereits Studien zu seiner Evaluation (siehe Anhang B.2). Diese Arbeit stellt also eine Fallstudie dar, deren Hauptaugenmerk auf der Frage liegt, wie intuitiv das KPK Konzept der Mechanik aus Schülersicht tatsächlich erscheint und welche detaillierten Lernschwierigkeiten sich bei seiner Anwendung in unserer Lerngruppe ergeben haben. Zudem wird die Frage untersucht, ob und wie es möglich ist, Teile des umfassenden KPK Konzeptes herauszulösen und in das herkömmliche Curriculum zu integrieren. Hier stellt sich im Besonderen die Frage, ob die zusätzliche Einführung der Begriffe der üblichen Darstellungsweise zu Problemen führt. Die Einführung der Begriffe des traditionellen Unterrichts ist notwendig, wenn der nachfolgende Fachunterricht nicht oder nur teilweise dem KPK Konzept folgt. Aber auch bei durchgängiger Anwendung des KPK gibt es gute Argumente für die Behandlung der traditionellen Begriffe, denn nicht nur in Fachbüchern, Hochschule oder Ausbildung werden die Schüler ihnen begegnen, sondern natürlich auch in zentralen Prüfungen! In diesem Zusammenhang ist vor allem die Frage zu untersuchen, ob die zusätzliche Behandlung dieser Begriffe zu Verwirrung bei den Schülern führt. Natürlich wäre es fatal, wenn dadurch der Lernerfolg des KPK teilweise wieder aufgehoben würde. In jedem

⁴Für die Studie [9] wurden Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe nach ihren zwei beliebtesten und unbeliebtesten Fächern befragt. Physik wurde von 30% der Schüler als unbeliebtestes, aber nur von 10% der Schüler als beliebtestes Fach genannt und hält damit den Negativrekord an Ablehnung.

Fall geht dadurch die versprochene effizientere Lernzeitnutzung teilweise wieder verloren. Zu rechtfertigen wäre dieses Vorgehen jedoch, wenn es auf diese Weise gelänge, verbreitete Fehlvorstellungen der Mechanik zu vermeiden (siehe hierzu vor allem die Aufsätze von Maurer (S. 12), Theis (S. 17) und Ciesla (S. 23) in [10]). Auch dieser Frage werden wir uns deshalb zuwenden.

In Kapitel 1 wird zunächst ein Überblick über die Konzepte des KPK gegeben. Abschnitt 1.6 beschäftigt sich im Besonderen mit der Formulierung der Mechanik im KPK und der Beziehung zur üblichen „kraftbasierten“ Darstellung. In Kapitel 2 wird die Umsetzung dieses Konzepts auf den Mechanikunterricht in der 9. Klasse dargestellt. Diese Reihenplanung war die Grundlage für die hier untersuchte Unterrichtserfahrung, die in Kapitel 3 reflektiert werden. Reihenplanung und Reflexion dokumentieren die Kompetenzen der Lehrerfunktion „Unterrichten“; insbesondere „Entscheidungen zur Unterrichtsplanung und -durchführung fachlich, didaktisch und pädagogisch-psychologisch begründen“ sowie „Aufgabenstellungen didaktisch-methodisch differenzieren und individualisieren sowie reflektieren“. In Abschnitt 3.5 finden sich ebenfalls Ansätze zu einer Evaluation des Lernerfolgs im Vergleich zum traditionellen Unterricht. Kapitel 4 enthält eine zusammenfassende Wertung und Zusammenfassung der Ergebnisse. Appendix A versammelt die verwendeten Arbeitsblätter und Appendix B fasst die fachdidaktische Diskussion um den KPK knapp zusammen.

1 Der Karlsruher Physikkurs

„Theorien sind gewöhnliche Übereilungen des ungeduldigen Verstandes, der die Phänomene gerne los sein möchte.“

J. W. Goethe (aus Maximen und Reflektionen)

Der Karlsruher Physikkurs (KPK) ist weniger aus einer explizit physikdidaktischen Konzeption hervorgegangen, als vielmehr aus einem anderen deduktiven Aufbau der Physik, nämlich der *allgemeinen Dynamik* nach Gottfried Falk [11]. Es ist auch diesem Umstand geschuldet, dass die Vertreter des KPK nicht nur eine „geschicktere“ oder „effizientere“ Darstellung der Physik behaupten, sondern auch den Anspruch haben, zahlreiche Fehlvorstellungen innerhalb der üblichen Darstellungsweise zu vermeiden. Ein gutes Beispiel für dieses Selbstverständnis bietet die Kolumne „Altlasten der Physik“ (von 1994 bis 2000 in der „Physik in der Schule“, ab 2001 in „Praxis der Naturwissenschaft - Physik in der Schule“) von Friedrich Hermann. Sie behandelt Fehlvorstellungen oder ungenaue Darstellungen der Lehrbuchliteratur, von denen (oft schlüssig) argumentiert werden kann, dass das KPK Konzept hilft, sie zu vermeiden.

Im Folgenden fassen wir die wichtigsten Konzepte des KPK (mengenartige Größen, Strom-Antriebs Konzept) und deren inneren Zusammenhang (Gibbs'sche Fundamentalform) knapp zusammen. Am Beispiel der Mechanik erläutern wir in Abschnitt 1.6 die zentralen Begriffe in größerem Detail, weil unser Unterrichtsversuch sich auf diesen Bereich der Physik bezieht.

1.1 Mengenartige Größen

Im Mittelpunkt des KPK stehen die sog. „mengenartigen“ Größen. Diese entsprechen im Wesentlichen¹ dem, was innerhalb der Thermodynamik als „extensive“ Größe bezeichnet wird.

Beispiele für mengenartige Größen sind Energie, Impuls, Drehimpuls, Ladung, Entropie, Stoffmenge oder Masse. Allen diesen Größen ist gemein, dass sie immer einem Raumgebiet zugeordnet sind und durch eine (räumliche) Dichte beschrieben werden können². Ihre Änderung entspricht bei Erhaltungsgrößen einem Strom aus oder in das betreffende Raumgebiet. Bei nichterhaltenen Größen (etwa der Entropie) kann zusätzlich ein Quellterm auftreten. Es kann also eine Bilanz- bzw. Kontinuitätsgleichung angegeben werden:

¹Die Rolle von Ort und Volumen muss gesondert diskutiert werden. Diese sind „extensiv“ im Sinne der Thermodynamik – aber nicht „mengenartig“ im engeren Sinne.

²Dies gilt für den Drehimpuls allerdings nicht (siehe [5], S.18). Der Grund dafür ist einfach: Drehimpuls lässt sich lokal gar nicht nachweisen, da er eine Eigenschaft ausgedehnter Objekte ist.

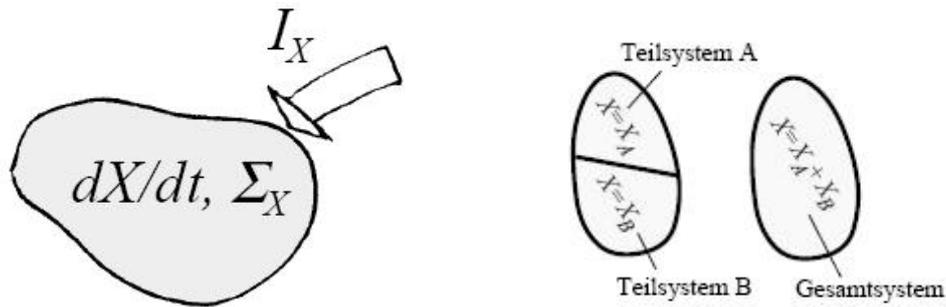


Abbildung 1.1: Links: Veranschaulichung einer mengenartiger Größe X und ihres Stroms I_X . Rechts: Additivität mengenartiger Größen (Abb. aus [3][S.10 und 11]).

$$\begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= I_X + \Sigma_X \\ &= I_X \quad \text{bei Erhaltungsgrößen} \end{aligned}$$

Hier bezeichnet X die mengenartige Größe, $I_X = \frac{dX}{dt}$ ihren Strom und Σ_X einen Quellterm, der im Falle einer Erhaltungsgröße verschwindet. Abb. 1.1 (Links) illustriert diesen Zusammenhang noch einmal.

In diesem Sinne kann man sich von mengenartigen Größen eine sehr intuitive Vorstellung machen, nämlich als eine Art von „Stoff“ oder „Zeug“, dass sich in Raumbereichen befindet („gespeichert werden kann“) bzw. aus diesen und in diese strömt. Diese Vorstellung ist aus Alltagszusammenhängen bekannt, man denke etwa an Wasserströme oder – abstrakter – Geldströme. Die wichtigsten Eigenschaften mengenartiger Größen sind somit:

- ihr Wert bezieht sich auf einen Raumbereich.
- mengenartige Größen sind additiv. (Siehe Abb. 1.1 (Rechts))
- ihnen ist eine „Stromstärke“ zugeordnet.
- auch die Stromstärken sind additiv!

1.2 Die Gibbs Funktion

Eine innere Begründung für die herausgehobene Bedeutung der mengenartigen Größen bieten die Gibbs'sche Fundamentalform, die die Energieänderung eines Systems mit der Änderung der extensiven Größen (X_1, X_2, \dots) in Verbindung bringt:

$$\begin{aligned} dE &= \xi_1 dX_1 + \xi_2 dX_2 + \dots \\ \text{mit: } \xi_i &= \frac{\partial E(X_1, X_2, \dots)}{\partial X_i} \end{aligned}$$

Die ξ_i bezeichnen die zugehörigen energiekonjugierten intensiven Größen. In üblicher Bezeichnungsweise gilt also:

$$dE = \vec{v}d\vec{p} + \vec{\omega}d\vec{L} + \phi dQ + TdS + \mu dn + \dots \quad (1.1)$$

mit \vec{v}, \vec{p} Geschwindigkeit und Impuls, $\vec{\omega}, \vec{L}$ Winkelgeschwindigkeit und Drehimpuls, ϕ, Q elektrisches Potenzial bzw. Ladungsmenge, T, S Temperatur und Entropie sowie μ, n dem chemischen Potenzial und der Stoffmenge.

Gibt man jeder mengenartigen Größe einen festen Wert, so ist auch die Energie des Systems eindeutig festgelegt. Man erhält damit die Energie als Funktion der X_i : $E = E(\vec{p}, \vec{L}, Q, \dots)$. Diese sog. Gibbs-Funktion charakterisiert das System vollständig. Für deren zeitliche Änderung gilt:

$$\frac{dE}{dt} = \vec{v} \cdot \frac{d\vec{p}}{dt} + \vec{\omega} \cdot \frac{d\vec{L}}{dt} + \phi \cdot \frac{dQ}{dt} + T \cdot \frac{dS}{dt} + \mu \cdot \frac{dn}{dt} + \dots \quad (1.2)$$

Die einzelnen Summanden dieser Gleichung sind natürlich wohlbekannt und hängen mit dem zusammen, was man üblicherweise unterschiedliche „Energieformen“ nennt (z.Bsp. die elektrische Energie pro Zeit ($\phi \cdot \frac{dQ}{dt} = \phi I$), Wärme pro Zeit ($T \frac{dS}{dt} = T I_S$) bzw. chemische Energie pro Zeit ($\mu \frac{dn}{dt} = \mu I_n$). Aufgrund der Tatsache, dass die Energieänderung aber immer von der Änderung mindestens einer anderen extensiven Größe begleitet ist, interpretiert der KPK diese extensive Größe als „Träger“ der Energie. Statt von verschiedenen „Energieformen“, spricht der KPK also nur von verschiedenen „Austauschformen“ der Energie. Diese Sprechweise betont, dass es immer um die selbe Größe „Energie“ geht³. Konsequenterweise werden im KPK die sonst „Energieumwandler“ genannten Maschinen als „Energieumlader“ bezeichnet und die jeweiligen intensiven Größen geben an, wie *stark* diese Energieträger mit Energie „beladen“ sind.

Die Wichtigkeit dieses Trägermodells von Energie findet seinen Ausdruck in dem Lehrsatz, den der KPK in seinen Schulbüchern formuliert: „Energie fließt nie allein, sie braucht immer einen Träger“.

1.2.1 Die Systematik des KPK

Beziehung 1.2 wird nun zum Ausgangspunkt für die gesamte Systematik des KPK (bzw. der allgemeinen Dynamik) genommen. Jeder Summand der Gibbs'schen Fundamentalform hat die Struktur „intensive Größe \times extensive Größe“ und ist dabei charakteristisch für ein Teilgebiet der Physik. Ebenfalls wird die Chemie von diesem Strukturmodell umfasst, was das fächerübergreifende Potenzial des KPK illustriert. Tabelle 1.1 stellt die Zuordnung der entsprechenden Größen für einige Teilgebiete dar.

Aufgrund der Zuordnungen aus Tabelle 1.1 können Analogien zwischen verschiedenen Teilbereichen erklärt werden, die sich auf physikalische Größen, Relationen, Erscheinungen und Vorgänge beziehen. Diese Analogien beziehen sich zunächst natürlich nur auf die mathematische Struktur der betreffenden Teilbereiche. Die Kernidee des KPK besteht nun gerade darin, auf der Grundlage dieser *mathematischen Analogien*, mit den selben *physikalischen Anschauungen* und Vorstellungen zu operieren [12][S. 11].

³Illustriert mit F. Hermanns Lieblingsbeispiel: Tütenmilch und Flaschenmilch bezeichnen auch nicht verschiedene „Milchformen“, sondern lediglich verschiedene Arten, sie zu transportieren. Ein anderes – mehr physikalisches – Beispiel lautet, dass man bei der negativen Ladung von Elektron und Myon ebenfalls nicht von unterschiedlichen „Ladungsformen“ spricht.

Gebiet	intensive Größe	extensive Größe	Stromstärke
Mechanik	Geschwindigkeit v	Impuls p	Kraft F
Elektrizitätslehre	Potenzial ϕ	Ladung Q	elektrische Stromstärke I
Wärmelehre	Temperatur T	Entropie S	Entropiestromstärke I_S
Chemie	chemisches Potenzial μ	Stoffmenge n	Stoffstromstärke I_n
...			

Tabelle 1.1: Intensive und extensive Größen (X) sowie die zugehörigen Stromstärken (dX/dt) bei ausgewählten Teilgebieten.

1.3 Strom, Widerstand und Antrieb

Wie diese Analogiebildung konkret abläuft, wollen wir zunächst am Beispiel der Konzepte „Strom, Widerstand und Antrieb“ erläutern. Wie erwähnt, können wir uns von der Änderung mengenartiger Größen die anschauliche Vorstellung des „Strömens“ machen. Was aber ist der Antrieb eines solchen Stroms? Betrachten wir einen elektrischen Strom durch einen Widerstand. Er ist umso stärker, je größer die Potentialdifferenz ist und je kleiner der (nicht notwendig ohmsche) Widerstand ist. Dies wird üblicherweise so interpretiert, dass die Potentialdifferenz $\Delta\phi$ als Antrieb des elektrischen Stroms fungiert. Im Sinne der von uns angestrebten Analogiebildung finden wir:

- Eine Differenz der intensiven Größe (elektrisches Potenzial, Geschwindigkeit, Temperatur, ...) ist immer mit dem Strom der zugehörigen mengenartigen Größe (Ladung, Impuls, Entropie, ...) verbunden.

Von dieser mathematischen Beobachtung ist es ein kleiner Schritt zur allgemeinen Regel des KPK:

- Eine Differenz der intensiven Größe ist die *Ursache* für einen Strom der zugehörigen mengenartigen Größe.

Hauptmann [5] (S. 11) bemerkt dazu:

„Diese Einteilung in Ursache und Wirkung ist aus physikalischer Sicht vollkommen willkürlich und kann nur didaktisch begründet werden.“

Im Falle der Elektrizitätslehre folgt der KPK hier der üblichen Darstellung („Potentialdifferenz als Ursache für Ladungstransport“). In den anderen Gebieten der Physik, bei denen mengenartige Größen traditionell nicht im Mittelpunkt stehen, gibt es keine entsprechende Konvention. Der KPK begründet damit ein einheitliches Modell zur Beschreibung der Ströme extensiver Größen:

- Eine Geschwindigkeitsdifferenz treibt den Impulsstrom an.
- Eine Temperaturdifferenz treibt den Entropiestrom an.
- Eine chemische Potentialdifferenz treibt den Stoffmengenstrom an.
- Ein Unterschied im Gravitationspotenzial ist der Antrieb für einen Massenstrom.

Die Begriffe des elektrischen Widerstands bzw. der elektrischen Leitfähigkeit verallgemeinert sich sinngemäß. Für jeden Transport einer mengenartigen Größe kann sinnvoll nach

einem Widerstand ($= \frac{\Delta \text{intensive Gr\ddot{o}\ss e}}{dX/dt}$) gefragt werden. So sind feste Stoffe gute Impulsleiter, wohingegen Luft oder Wasser zur Isolation gegen Impulsflüsse eingesetzt werden⁴.

1.4 „Pumpen“

Während es also eine *natürliche* Tendenz gibt, dass die Ströme mengenartiger Größen die Differenz der zugehörigen *intensiven* Größe *verringern*, gibt es zahlreiche Situationen, in denen man gerade das Gegenteil erreichen möchte, also etwa die Temperatur-, elektrische Potenzialdifferenz oder den Geschwindigkeitsunterschied *steigern* will. Alle diese Vorgänge werden im KPK metaphorisch als „pumpen“ bezeichnet. Ein (Auto-)Motor pumpt also Impuls aus der Erde in den Wagen, um so die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen diesen zu steigern. Der Begriff der Pumpe suggeriert, dass die Größe (Ladung, Impuls etc.) nicht erzeugt oder vernichtet wird, sondern aus einem anderen Raumbereich stammt. Zum anderen knüpft er an das allgemeine Strukturmodell von strömenden Gasen oder Flüssigkeiten zur Veranschaulichung an. Abb. 1.2 illustriert diese Analogie zwischen einer „elektrischen Pumpe“ (Generator) und einer „mechanischen Pumpe“.

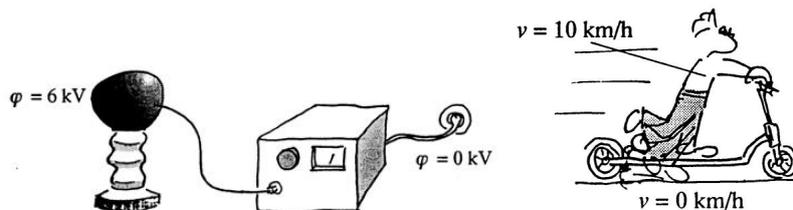


Abbildung 1.2: Analogie zwischen elektrischer und mechanischer „Pumpe“. Die erste befördert Ladung auf Körper mit bereits höherem Potenzial, die zweite Impuls auf Körper mit höherer Geschwindigkeit.

1.5 Knotenregeln

Die Additivität mengenartiger Größen X_i übersetzt sich direkt in die Additivität der zugehörigen Ströme dX_i/dt . Dies führt auf strukturgleiche „Knotenregeln“ für die betreffenden Gebiete der Physik („Die Stromstärke der zum Knoten hinfließenden Ströme ist genauso groß wie die der wegfließenden.“). Die Abbildung 1.3 illustriert diese Regel für Elektrische-, Flüssigkeits- sowie Impulsströme. Problematisch ist hier die Behandlung vektorieller Größen (wie Impuls bzw. Kraft), da hier für *jede* Komponente eine solche Knotenregel gilt. Auf diesen Punkt werden wir in Abschnitt 1.6.3 gesondert eingehen.

⁴Tatsächlich findet sich beim Impuls häufig eine „widerstandslose“ Leitung (siehe etwa Abb.1.5, rechts). Die Ähnlichkeit zur Supraleitung gilt jedoch nur eingeschränkt, da das Analogon zum Meissner-Ochsenfeld Effekt fehlt [3][S.24].

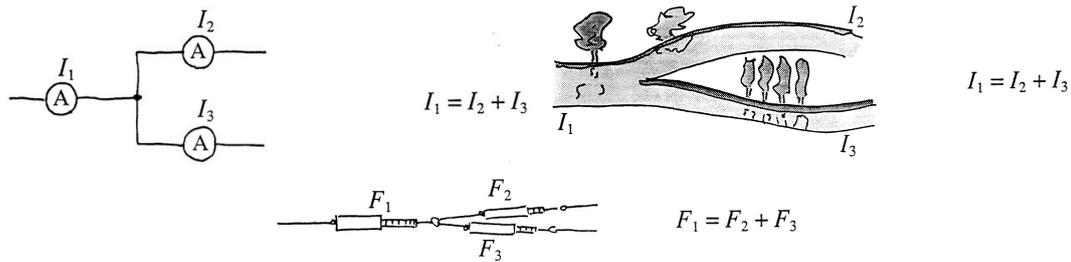


Abbildung 1.3: Knotenregeln für die Ströme mengenartiger Größen am Beispiel von elektrischen Strömen, Flüssigkeiten und Impulsströmen (=Kräfte).

1.6 Die Darstellung der Mechanik im KPK

Da sich unser Unterrichtsversuch auf die Mechanik bezieht, sollen an dieser Stelle die betreffenden Konzepte und der Zusammenhang zur üblichen Darstellung genauer diskutiert werden. An zahlreichen Stellen soll der Vergleich deutlich machen, wie das Modell des Karlsruher Physikkurses helfen kann, Lernschwierigkeiten und Fehlvorstellungen zu vermeiden.

1.6.1 Die (träge) Masse als „Impulskapazität“

Im KPK wird der Impuls *nicht* als abgeleitete Größe („ $p = mv$ “) eingeführt⁵, sondern ist eine Grundgröße. Er idealisiert die Alltagsvorstellung von „Wucht“ oder „Schwung“. Seine Bedeutung findet im KPK ebenfalls Ausdruck darin, dass er eine eigenständige Einheit bekommt: 1 Huygens (abgekürzt *Hy*, mit $1Hy = 1Ns = 1kg \cdot 1\frac{m}{s}$).

Es ist instruktiv zu untersuchen, welchen Status die Gleichung $p = mv$ innerhalb des KPK hat. Sie entspricht formal der Beziehung $Q = CU$ in der Elektrizitätslehre. Mit anderen Worten spielt die träge Masse also eine analoge Rolle wie die Kapazität – sie kann als „Impulskapazität“ aufgefasst werden. Und in der Tat erscheint diese Vorstellung intuitiv, da ein Körper bei fester Geschwindigkeit umso mehr Impuls speichern kann, je größer seine (träge) Masse ist (siehe Abb.1.4). Umgekehrt macht dieser Vergleich deutlich, wie künstlich es erscheint, den Impuls über die Beziehung $p = mv$ definieren zu wollen. Es erscheint zumindest absurd, die elektrische Ladung durch $Q = CU$ einzuführen.

Schließlich hilft das Bild von der Kapazität auch, um zu verstehen, warum beim Abfließen von Ladung oder Impuls in die Erde sich weder ihr Potenzial noch ihre Geschwindigkeit merklich ändert. In beiden Fällen ist die große Kapazität (elektrische und Impulskapazität!) dafür verantwortlich.

Vor allem sollte betont werden, dass der KPK den Impuls zwar an den Anfang stellt, die Impulsstromstärke $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ ($= F$) aber ebenfalls eine prominente Rolle spielt. Der KPK ist in diesem Sinne keine Mechanik „ohne Kraftbegriff“, sondern eine Mechanik mit einem Kraftbegriff, der aus dem Impuls abgeleitet wird.

⁵Hermann weist darauf hin [13], dass die Beziehung $p = mv$ zudem nicht immer gilt – man denke etwa an den Impuls des elektromagnetischen Feldes.

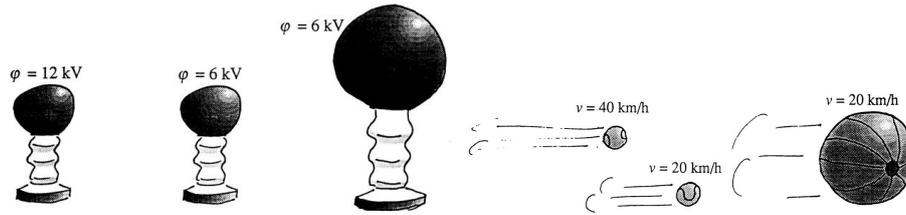


Abbildung 1.4: Analogie zwischen elektrischer Kapazität und träger Masse: Auf der Kugel sitzt umso mehr elektrische Ladung, je größer sie ist („Kapazität“) und je höher das elektrische Potenzial ist. Ein Körper hat umso mehr Impuls, je schneller er ist oder je größer seine Masse ist.

1.6.2 Impuls, Kraft und Energie

Die Kraft wird im KPK als Impulsstromstärke ($\frac{dp}{dt}$) gedeutet. Allerdings ist nicht jeder Impulsstrom mit einem Energiestrom verbunden. Aus der Gibbs'schen Fundamentalform (Gl. 1.2) entnimmt man $dE = vdp$ bzw. $\frac{dE}{dt} = P = vF$. Um Energie zu transportieren, muss der „Impulsleiter“ (etwa das Seil, an dem man zieht) eine Geschwindigkeit haben. Je größer diese Geschwindigkeit (und natürlich auch je größer die Kraft), desto größer die Energiestromstärke (=Leistung, P). Dies kann man sich etwa an den Beispielen in Abb. 1.5 verdeutlichen. Während in der Abbildung links die Person mit dem Impulsfluss auch Energie zur Kiste transportiert, (die kinetische Energie nimmt zu, und die Unterseite erwärmt sich durch Reibung) gewinnt sie keine Energie durch den Impulsfluss aus der Erde. Besonders deutlich ist dies in der Abb. 1.5 (Rechts). Hier ist ebenfalls ein geschlossener Impulsstrom realisiert. Die Zugspannung der Feder leitet Impuls nach links, der aus der Erde entnommen wird. Ein Energiestrom findet nicht statt. Abb. 1.6 erhellt den selben

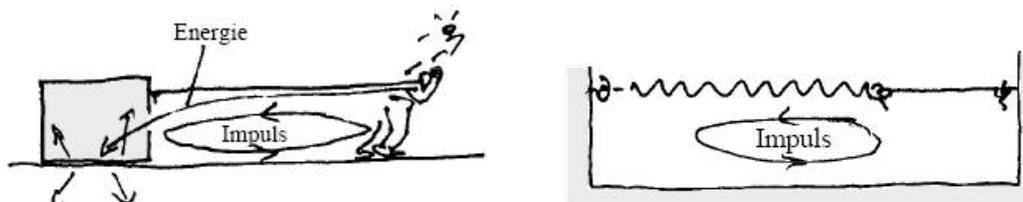


Abbildung 1.5: Links: Impulsfluss mit Energiefluss zur Kiste und ohne Energiefluss aus der Erde. Rechts: Impulsfluss ohne Energiefluss (Abb. aus [2][Band 1, S. 61]).

Zusammenhang. Während des Spannens der Feder wird ein Impuls- und Energiestrom in Punkt A in sie hineingeleitet. Die Impulsstromstärke ist in A die selbe wie an Punkt C (der Aufhängung). Allerdings ist in C die Geschwindigkeit der Feder Null – der Energiestrom fließt also an dieser Stelle nicht weiter, und deshalb wird Energie *in* der Feder gespeichert. An Punkt B ist die Geschwindigkeit gerade halb so groß wie an Punkt A. Folglich ist die Energiestromstärke dort also auch nur halb so groß. Dies illustriert, dass die Hälfte der Energie in der linken und die andere Hälfte in der rechten Hälfte der Feder gespeichert werden.

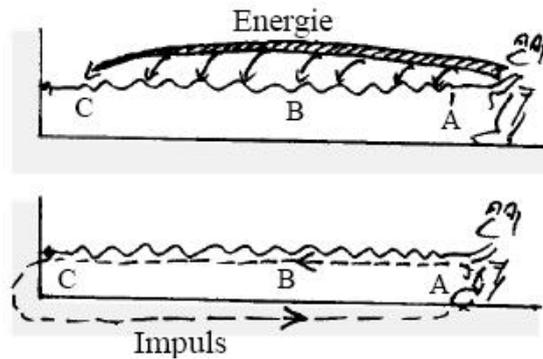


Abbildung 1.6: Energie- und Impulsstrom am Beispiel des Spanns einer Feder (Abb. aus [2][Band 1, S. 63]).

Der Zusammenhang zum üblicherweise verwendeten Begriff der „mechanischen Arbeit“ ist der Folgende (mit s der zurückgelegten Strecke und t der Zeit):

$$\begin{aligned}
 P &= v \cdot \frac{dp}{dt} \\
 \frac{E}{t} &= \frac{s}{t} \cdot F \\
 \Rightarrow E &= s \cdot F \quad \text{mechanische Arbeit}
 \end{aligned}$$

An dieser Stelle sieht man also noch einmal konkret, wie der mechanische Term aus der Gibbs’schen Fundamentalform der Arbeit entspricht. Der Zusammenhang zur kinetischen Energie ist ebenso einfach: Wird ein Körper in der Zeit t gleichmässig von der Geschwindigkeit $v_0 = 0$ auf v_1 gebracht, so legt er die Strecke $\Delta s = \frac{1}{2}v_1 \cdot t$ zurück ($\frac{v_1}{2}$ ist gerade die Durchschnittsgeschwindigkeit). Für die Impulsänderung gilt $\Delta p = mv_1$. Die Energieänderung ist also $\Delta E = \frac{\Delta s}{t} \cdot \Delta p = \frac{1}{2}mv_1^2$. Diese Argumentation setzt eine konstante Geschwindigkeitszunahme voraus. Im allgemeinen gilt $dE = vdp = \frac{1}{m}pdp$ und die Integration liefert $E = \frac{1}{m} \int p dp = E_0 + \frac{p^2}{2m} = E_0 + \frac{1}{2}mv^2$.

1.6.3 Der Impuls als Vektor

Der KPK hebt die Strukturgleichheit aller Teilgebiete der Physik hervor, wenn man die charakteristische mengenartige Größe des jeweiligen Gebiets und ihr Strömen in den Mittelpunkt stellt. Allerdings weisen elektrische Ladung, Entropie oder Energie einen wichtigen Unterschied zu Impuls und Drehimpuls auf. Die letztgenannten Größen sind Vektoren. Bei seiner Einführung beschränkt sich der KPK deshalb zunächst auf eindimensionale Bewegungen – lediglich im Vorzeichen des Impulses drückt sich auch schon hier seine Vektorwertigkeit aus⁶. Bei der Verallgemeinerung auf Bewegungen in der Ebene oder im Raum gelten die Bilanzargumente für jede Raumrichtung separat⁷.

⁶Obwohl die skalare Ladung ebenfalls ein Vorzeichen trägt.

⁷In [3][S. 31] wird angemerkt, dass die dazu notwendige Einführung eines starren Koordinatensystems die Behandlung unübersichtlich machen kann. In den Schulbüchern des KPK wird deshalb ein anderer Weg verfolgt. Hier wird jede Richtung als eigene „Impulsorte“ aufgefasst – bezeichnet nach dem Winkel, den sie zur positiven x-Achse einschließt. Die Lehrbücher sprechen also etwa von „45 Grad Impuls“ oder „0 Grad Impuls“.

Großen Wert legt der KPK auf die Unterscheidung zwischen der *Transportrichtung* des Impulses und seiner *eigenen Richtung*. Diesen Unterschied illustriert Abb. 1.7. Dargestellt ist eine Person, die mit einem starren Körper ein Floß bewegt. Während die Transportrichtung des Impulses in allen drei Fällen identisch (von unten nach oben) verläuft, ist die Richtung des auf diesem Weg transportierten Impulses in a) senkrecht zum Weg, in b) parallel und in c) in einem 45° Winkel zur Transportrichtung. Der KPK muss diese Unterscheidung übrigens aus einem naheliegenden Grund betonen: Innerhalb eines Impulsstromkreise fließt der Impuls „im Kreis“ – dies bezieht sich jedoch nur auf seine *Transportrichtung*. Diese ändert sich also innerhalb des Impulsstromes, ohne dass sich seine eigene Richtung ändert⁸.

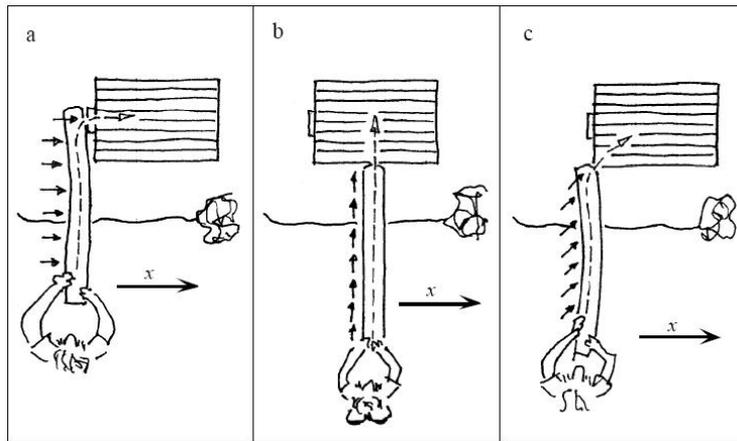


Abbildung 1.7: Illustration des Unterschiedes zwischen der Richtung des Impulses und der Richtung seines Strömens. In a) stehen diese Richtungen senkrecht aufeinander, in b) sind sie parallel und in c) in einem 45 Grad Winkel zueinander. (Abb. aus [2][Band 1, S. 69]).

Der KPK kritisiert, dass übliche Darstellungen der Vektoraddition bei Kräften in der Regel den Spezialfall betrachten, in dem diese Richtungen zusammenfallen. Dies ist zum Beispiel bei der Kraftübertragung durch Seile der Fall, die nur längs ihrer Richtung Impulsströme transportieren können [3][S. 30].

1.6.4 Die Newtonschen Axiome

Das Herzstück der Mechanik, die den Kraftbegriff an den Anfang stellt, sind die Newtonschen Axiome. Sie lauten bekanntlich:

1. Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder gleichförmigen Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.
2. $F = m \cdot a$ (falls m nicht const. $F = \dot{p}$)

⁸Dass die Richtung des Impulsflusses und die Richtung seiner Wirkung im Allgemeinen nicht identisch sind, ist im übrigen die anschauliche Erklärung dafür, dass die mechanische Spannung durch einen Tensor 2. Stufe beschrieben wird.

3. Kräfte treten immer paarweise auf. Übt ein Körper A auf einen anderen Körper B eine Kraft aus (actio), so wirkt eine gleichgroße, aber entgegen gerichtete Kraft von Körper B auf Körper A (reactio).

Vor allem das 3. Axiom bereitet immer wieder Verständnisschwierigkeiten (siehe etwa den Aufsatz von Maurer in [10], S. 12). Inhaltlich gesprochen ist das „Wechselwirkungsprinzip“ Ausdruck der Impulserhaltung, und die übliche Darstellung der Mechanik leidet darunter, dass mit der Kraft die „Impulsstromstärke“ eingeführt wird *ohne* dass die Größe, die „strömt“, thematisiert wird. Stellt man den Impuls an den Anfang und formuliert seine Erhaltung⁹, müssen die Newtonschen Axiome noch nicht einmal behandelt werden. Wollte man sie in die Impulsstrom-Sprechweise übersetzen, lauteten sie:

1. Ein Körper ändert seinen Impuls nicht, wenn kein Impuls in ihn hinein oder aus ihm heraus fließt.
2. Die zeitliche Änderung des Impulses eines Körpers ist gleich dem Impulsstrom, der in ihn hineinfließt: $dp/dt = F$.
3. Wenn Impuls von einem Körper A zu einem Körper B fließt, so ist der Strom beim Verlassen von A gleich dem beim Eintritt in B.

1.6.5 Gravitation

Das Schwerfeld (der Erde) hat einen offensichtlichen Zusammenhang zur Mechanik und zu Impulsströmen: Körper gewinnen im Schwerfeld der Erde Impuls, d.h. sie fallen bzw. haben Gewicht. Der KPK postuliert schon an dieser Stelle das Schwerfeld als eigenständiges physikalisches System. Die traditionelle Darstellungsweise von Feldern als „Raumbereiche mit Eigenschaften“ wird von Hermann in [15] kritisiert.

Die Erdanziehung kommt durch einen Impulsstrom aus dem Schwerfeld zustande. Da der Impuls im KPK als Energieträger gedeutet wird, ist klar, dass aus dieser Sicht die Energie vorher im Schwerfeld gewesen sein muss. Nach traditioneller Darstellung ist die Lageenergie hingegen im betreffenden Körper gespeichert.

1.7 Zusammenfassung

Im Zentrum des KPK steht der Begriff der Energie. Sie ist die mengenartige Größe, die in *allen* Teilbereichen der Physik eine zentrale Rolle spielt. Anstatt von unterschiedlichen „Energieformen“, spricht der KPK nur von unterschiedlichen „Energieträgern“. Jedes Teilgebiet der Physik kann durch eine mengenartige Größe charakterisiert werden, die als Energieträger fungiert. Ihnen zugeordnet sind intensive Größen, deren Differenz einen Strom der entsprechenden extensiven Größe „verursacht“. Genauso wie die Elektrizitätslehre von Ladungsströmen handelt, wird in der Darstellung des KPK die Mechanik zur

⁹Tatsächlich wird in den Lehrbüchern des KPK die Impulserhaltung nicht explizit eingeführt, sondern von Anfang an „unterstellt“ [16]. Dies folgt dem Vorgehen bei der elektrischen Ladung. Bei mengenartigen Größen scheint das Erhaltensein intuitiv einsichtig[16].

„Impulsstrom-Lehre“, die Wärmelehre zur „Entropiestrom-Lehre“, die Gravitationstheorie zur „Massenstrom-Lehre“ etc.

Dadurch macht der KPK die Systematik physikalischer Größen deutlicher und hebt Parallelen zwischen unterschiedlichen Teilgebieten der Physik hervor. Diese vertikale Vernetzung betrifft nicht nur Phänomene und Gesetze, sondern auch den sprachlichen Ausdruck bzw. die anschaulichen Vorstellungen, die mit ihnen verbunden werden können. Insbesondere besitzt das Bild vom Strömen mengenartiger Größen eine hohe Anschaulichkeit. Tabelle 1.2 (aus [3][S. 17]) stellt die wichtigsten Relationen zusammen, die im Unterricht nach dem KPK in der Sekundarstufe I behandelt werden.

Zshg. zwischen Menge und Stromstärke	Zusammenhang zwischen Energie- und Energieträgerstrom	Kapazitäten	Widerstände
$F = p/t$	$P = vF$	$m = p/v$	nur qualitativ
$I = Q/t$	$P = UI$	$C = Q/U$	$R = U/I$
$I_S = S/t$	$P = TI_S$	$\Delta S/\Delta T$	nur qualitativ
$I_n = n/t$	$P = (\mu_2 - \mu_1)I_n$	wird nicht behandelt	nur qualitativ

Tabelle 1.2: Die wichtigsten Beziehungen des KPK und deren Strukturähnlichkeit.

Ein unmittelbarer didaktischer Nutzen ergibt sich zudem für die Ausdrucksweise im Unterricht. Während z. Bsp. Kräfte „wirken“ oder Arbeit „geleistet“ wird – hier also zusätzlich die ungewohnte korrekte Ausdrucksweise erlernt werden muss – kann eine mengenartige Größe wie der Impuls „enthalten sein“, „in einem Körper stecken“, „aufgehäuft“, „verdünnt“, „verteilt“ etc. werden. All diese umgangssprachlichen Formulierungen sind in diesem Zusammenhang vollkommen sachgerecht.

Natürlich gab und gibt es heftige fachdidaktische Auseinandersetzungen um den KPK. Die dabei an ihm geübte Kritik sowie Arbeiten zu seiner Evaluation fassen wir in Anhang B kurz zusammen.

2 Reihenplanung für die Mechanik nach dem KPK in der 9. Klasse

Für die Darstellung der Reihenplanung ist eine tabellarische Form gewählt worden, die in der Regel nur Thema und die wichtigsten Unterrichtsinhalte (neue Begriffe, Leitfragen und die zentralen kognitiven Lernziele) enthält. Diese knappe Darstellung enthält in der Regel keine Hinweise auf Methoden und Medieneinsatz. Die Inhalte wurden häufig durch Demonstrations- oder Schülerexperimente eingeführt und durch das Unterrichtsgespräch erarbeitet und gesichert. Die „Regeln“ oder „Merksätze“ waren immer Teil des Tafelanschriebs und wurden von den Schülern in ihr Heft übertragen. Zur Sicherung und Vertiefung dienten natürlich auch die Arbeitsblätter (siehe Appendix), die als Hausaufgabe oder in Gruppenarbeiten eingesetzt wurden.

Unsere Reihenplanung beginnt – wie das entsprechende Lehrbuch des KPK [2] (Band 1) – mit dem Kapitel „Energie“. Abweichend von der dort vorgeschlagenen Systematik wurde aber auf ein eigenes Kapitel über „Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen“ verzichtet. Dies erfolgte aus befürchtetem Zeitmangel – schließlich muss dieser Unterrichtsversuch am Ende der Reihe sicherstellen, dass noch Zeit für die „Übersetzung“ in die übliche Begriffsbildung bleibt. Zudem erscheint die Entwicklung der Mechanik im KPK äußerst breit und gründlich. Der Zeitvorteil, den der KPK aufgrund der von ihm hergestellten Struktürrähnlichkeit zwischen Mechanik, E-Lehre und Wärmelehre verspricht, ergibt sich natürlich erst bei seiner durchgehenden Verwendung in all diesen Teilgebieten.

Auf die Auswirkungen des Verzichts auf ein eigenes Kapitel „Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen“ wird in Abschnitt 3.3 (besonders 3.3.5) eingegangen.

2.1 Thema: Energie

1. Stunde	<p>Einführung, Einheiten und Energieflussdiagramme</p> <p>Definition: Energie braucht man, um etwas zu bewegen, etwas zu heizen, etwas leuchten zu lassen, etc. ... Treibstoff, Brennstoff, Nahrung, Elektrizität, ... sind Beispiele für Energieträger.</p> <p>Merksatz: Energie ohne Träger gibt es nicht!</p> <p>Einheit der Energie, Energiequellen und Energieempfänger. → Arbeitsblatt „Energie und Energieträger“ (als Hausaufgabe)</p>
-----------	---

2. Stunde	<p>„Energieumlader“</p> <p>Zahlreiche Energiequellen sind gleichzeitig Energieempfänger. Der Heizkessel z. Bsp. erzeugt warmes Wasser, indem er Heizöl empfängt. Und die Glühlampe empfängt Energie durch den elektrischen Strom und gibt sie in Form von Licht und Wärme (besser: Entropie) wieder ab.</p> <p>Diese Geräte nennt man „Energieumlader“ → Arbeitsblatt mit Beispielen für Energieflussdiagrammen und Energieumladern.</p>
-----------	--

2.2 Thema: Mechanik

3. Stunde	<p>Was ist Mechanik und was sind die physikalischen Grundgrößen der Mechanik?</p> <p>Vorläufige Definition: Mechanik befasst sich mit der Bewegung von Gegenständen.</p> <p>Versuch mit Basketball und Medizinball, um auf die Größe „Schwung“ oder „Wucht“ zu kommen. Dann: „In der Physik nennt man die Größe jedoch <i>Impuls</i>.“ Beobachtung:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ein bewegter Körper enthält Impuls • Ein Körper enthält umso mehr Impuls, je höher seine Geschwindigkeit ist. • Ein Körper enthält umso mehr Impuls, je größer seine Masse ist. <p>Definition: Ein Körper mit einer Masse von 1kg und der Geschwindigkeit 1m/s enthält den Impuls 1 Huygens (Hy).</p>
4. und 5. Stunde	<p>„Mengencharakter“ des Impulses</p> <p>Versuche mit der Luftkissenbahn:</p> <ul style="list-style-type: none"> • freie Bewegung: Impuls verändert sich nicht • Stoß von Wagen mit elastischer Verbindung: Impuls geht von einem Körper auf einen anderen • Stoß von Wagen mit inelastischer Verbindung: Impuls kann sich auf mehrere Körper verteilen (und verteilt sich schließlich auch auf die Erde...) • Inelastischer Stoß von entgegengesetzt fahrenden Schlitten. Sie bleiben stehen. Wo ist der Impuls geblieben? Antwort: er war schon vorher Null, bzw. Impuls kann negativ oder positiv sein.

	<p>Regel: Bei der Bewegung nach rechts ist der Impuls positiv, bei der Bewegung nach links negativ. → Arbeitsblatt „Impulsflüsse“ (als Hausaufgabe nach der 4. Stunde) → Arbeitsblatt „Impulsflüsse II“ (als Hausaufgabe nach der 5. Stunde)</p>
6. und 7. Stunde	<p>Impulspumpe, Impulsleiter und Impulsisolatoren</p> <p>Betrachte das Ziehen einer Kiste mit einem Seil. Die Kiste fängt an sich zu bewegen - sie erhält also Impuls. Aber wo kommt dieser her? Aus der Erde.</p> <p>Schüler und Demonstrationsversuche mit Skateboard, Inlinern und Seilen.</p> <p>Genauere Diskussion von Impulsleitern (Seile, feste Stoffe, gebremste Räder) und Impulsisolatoren (Luft, freilaufende Räder, Kufen, Ski, Wasser, ...)</p>
8. bis 10. Stunde	<p>Raketenbau, Test und Auswertung</p> <p>→ Arbeitsblatt „Bauanleitung Wasserrakete“</p> <p>Auswertung → Arbeitsblatt „Warum fliegen Raketen?“ in Gruppenarbeit mit <i>placemates</i></p>
11.-13. Stunde	<p>Geschwindigkeitsdifferenz als Antrieb von Impulsfluss sowie Zug- und Druckspannung</p> <p>Wir haben bisher zahlreiche Mechanismen kennengelernt, mit denen Impuls „gepumpt“ wird, d.h. zwischen Körpern ausgetauscht wird (Motoren, der Überdruck in der Rakete, Gummibänder etc.). Aber wann fließt er „von alleine“?</p> <p>→ Arbeitsblatt „Der Antrieb von Impulsströmen“</p> <p>Regel: Der Impuls fließt von selbst von einem Körper hoher zu einem Körper niedriger Geschwindigkeit (Wenn eine Impulsleitende Verbindung vorliegt). Eine „Impulspumpe“ (Motor, Mensch, etc.) befördert ihn in die entgegengesetzte Richtung.</p> <p>Neue Begriffe (siehe auch Arbeitsblatt „Druck- und Zugspannung“):</p>

	<p><i>Zugspannung</i> = Impuls fließt nach links, Verlängerung (oder Dehnung) des Impulsleiters <i>Druckspannung</i> = Impuls fließt nach rechts, Verkürzung (oder Stauchung) des Impulsleiters</p>
14. Stunde	<p>Impulsstromkreise</p> <p>Regel: Impuls kann in einem geschlossenen Stromkreis fließen. Der Impuls nimmt dann an keiner Stelle zu oder ab. Ein Teil jedes Impulsstromkreises steht unter Druckspannung, ein anderer unter Zugspannung.</p>
15. Stunde	<p>Impulsstromstärke (= Kraft)</p> <p>Einführung der „Impulsstromstärke“ $F(=\frac{p}{t})$, die in Hy/s (=N) gemessen wird. Zur Messung der Impulsstromstärke wird der Kraftmesser vorgestellt. Im Anschluss daran Schülerversuche mit dem Kraftmesser zur Ermittlung der Knotenregel.</p>
16. Stunde	<p>Wirkung von Impulsströmen</p> <p>Wir haben $F = \frac{p}{t}$ kennen gelernt. Leitet man den selben Impuls in kürzerer Zeit durch oder in einen Körper, kann er verschiedene Wirkungen haben...</p>
17. bis 19. Stunde	<p>$p=mv$</p> <p>Zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Impuls, Masse und Geschwindigkeit werden Schülerversuche mit einer Schwefelfahrbahn durchgeführt (→ Arbeitsblatt „Versuche mit der Schwefelbahn“). Am Ende stehen die Proportionalitäten $p \propto v$ (bei konstanter Masse) und $p \propto m$ (bei konstanter Geschwindigkeit). Wir haben also $p=mv$.</p> <p>→ Arbeitsblatt zur Impulsberechnung.</p>
20. Stunde	<p>Das Schwerfeld</p> <p>Offensichtlich fallen Körper auf die Erde – sie erhalten also Impuls. Wo kommt dieser her?</p> <p>Regel: Jeder Körper ist von einem Schwerfeld umgeben. Je größer die Masse des Körpers ist, desto dichter ist sein Feld. Durch das Schwerfeld fließt Impuls von einem Körper zum anderen. Die Erdanziehung kommt durch einen Impulsstrom von der Erde zu dem betreffenden Körper zustande.</p>

	Wir finden $F_{grav} \propto m$, Einführung des Ortsfaktors → Hausaufgabe: Arbeitsblatt „freier Fall“
21. Stunde	<p>Der freie Fall</p> <p>Besprechung der Hausaufgabe</p> <p>Es gilt: Wenn ein Körper A eine doppelt so große Masse hat wie Körper B, so bekommt er von der Erde auch doppelt soviel Impuls pro Sekunde. Er braucht aber auch doppelt soviel Impuls, um auf dieselbe Geschwindigkeit zu kommen wie A. Alle Körper fallen gleich schnell.</p> <p>Demonstrationsversuch mit dem evakuierten Glasrohr</p>
22. Stunde	<p>Vertiefung „freier Fall“ und „Ortsfaktor“</p> <p>Gruppenpuzzle mit den Arbeitsblättern „Der Ortsfaktor und Gedankenversuche an exotischen Orten“</p>
23.-25. Stunde	<p>Flaschenzüge</p> <p>Schülerübungen zu Faktor- und Potenzflaschenzügen. Auswertung durch Gruppenarbeit mit anschließender Gestaltung von Postern. Hinführung zum Energiebegriff durch die Konstanz von Impulsstromstärke \times Zugseillänge.</p>
26. Stunde	<p>Flaschenzug und Energie</p> <p>Wenn mit einem beliebigen Flaschenzug eine Last um eine bestimmte Höhe angehoben wird, ist das Produkt aus Impulsstromstärke und Seillänge konstant. Diese Konstante ist die Energie, die durch das Seil geschickt wird! Wo bleibt diese Energie? Sie ist im Schwerfeld der Erde gespeichert → Arbeitsblatt „Aufgaben zur Energie im Schwerfeld“ als Hausaufgabe.</p>
27.-28. Stunde	<p>Impuls und Energie</p> <p>Beim Ziehen einer Kiste muss Energie aufgebracht werden. Was ist der Träger dieser Energie? Der Impuls! Jedoch ist nicht jeder Impulsstrom mit einem Energiestrom verbunden. Die Energiestromstärke hängt von der Impulsstromstärke und der Geschwindigkeit des Leiters ab ($P = v \cdot F$). $E = s \cdot F$ ist eine Form dieser Beziehung (→ Flaschenzug)</p>

29.-30. Stunde	Energiespeicher Durch Verformung, Bewegung und die Lage im Schwerfeld kann Energie gespeichert werden! → Zeitungsartikel zur Energiespeicherung durch Verformung (siehe Anhang) Schülerexperimente zur Energiespeicherung in Gummibändern – danach Anwendung des Zusammenhangs $P = vF$ in Gruppenarbeit (siehe Arbeitsauftrag „Zusammenhang zwischen Energie und Impuls beim Gummiband“ im Appendix)
31.-33. Stunde	Der Impuls als Vektor Bei Geschwindigkeit und Impuls kommt es auch auf die Richtung an. Solche Größen werden „Vektoren“ genannt. Dies ist nicht bei allen physikalischen Größen so! Zu ihrer Darstellung sind also Pfeile nützlich. Regel zur Vektoraddition. Rückblick auf bisher behandelte Spezialfälle der 1-dim Bewegung und deren Verallgemeinerung mit Hilfe des Vektorbegriffs.
34.-35. Stunde	Drehmoment und Hebelgesetze

3 Reflexion der Unterrichtserfahrung

In diesem Kapitel wird die Frage untersucht, wie intuitiv das KPK Konzept der Mechanik aus Schülersicht tatsächlich erscheint und welche detaillierten Lernschwierigkeiten sich bei seiner Anwendung in der Lerngruppe ergeben haben. Aus Platz- und Zeitgründen beschränke ich mich dabei auf die ersten 30 Stunden der Unterrichtsreihe, d.h. bis zu dem Thema „Energiespeicherung“. Auf einige anschließende Aspekte wird ein kurzer Ausblick gegeben. In Abschnitt 3.4 wird die Frage untersucht, ob die zusätzliche Behandlung der Begriffe des traditionellen Unterrichts zu Problemen geführt hat. Abschnitt 3.5 stellt einen skizzenhaften Versuch zur Evaluation des Unterrichtserfolges in unserer Lerngruppe dar.

3.1 Anmerkungen zur Lerngruppe

Der hier dokumentierte Unterrichtsversuch wurde in meiner BdU Klasse im Schuljahr 2007/08 durchgeführt. Während es also keine ständige Begleitung durch einen Ausbildungslehrer gab, bestand die ganze Zeit über eine enge Kooperation mit den Fachkollegen. Das Konzept des KPK wurde von mir in einem Vortrag auf der Physik-Fachkonferenz vorgestellt. Zudem habe ich durch die Hospitation in einer Parallelklasse Vergleiche mit dem konventionellen Mechanikunterricht anstellen können.

Die Klasse 9B besteht aus 32 Schülern (13M, 19J). Die Unterrichtsatmosphäre ist positiv, allerdings ist das Interesse an der Physik sehr ungleichmäßig verteilt. Während einige Schüler die Anregungen aus dem Unterricht in privaten Heimexperimenten vertieften, war bei anderen ein offenes Desinteresse zu beobachten. Besonders während des Unterrichtsgesprächs im Plenum konnte diese Gruppe erfolgreich „abtauchen“. Durch verschiedene dezentrale Unterrichtsformen wurde immer wieder versucht, die Aktivität dieser Schüler zu steigern und den Raum für Einzelgespräche zu öffnen.

Die Schüler meiner Lerngruppe verfügten nicht über das KPK Lehrbuch. Da ich den Physikunterricht als ohnehin nicht besonders „lehrbuchorientiert“ wahrgenommen habe, erschien mir diese Entscheidung unproblematisch. Die Starauscheck-Untersuchung [28] hat jedoch gezeigt, dass das KPK Lehrbuch im Gegensatz zu üblichen Physik Lehrbüchern bei den Schülern sehr beliebt ist. Den Schülern wurde deshalb nach den Herbstferien die PDF Datei des KPK Buches über meine Webseite zur Verfügung gestellt.

3.2 Energie

Der Energiebegriff ist Schülern in der Klasse 9 natürlich schon vertraut. Die Einführung des Trägermodells für den Energieaustausch bereitete keine Schwierigkeiten. Mit teilweise

großer Begeisterung wurde das Arbeitsblatt „Energieumlader“ (siehe Anhang) bearbeitet. Eine besonders fantasievolle Energieumlade-Kette ist in Abb. 3.1 dargestellt. Insgesamt leidet das Thema daran, dass kaum quantitative Experimente eingesetzt werden können – dieses Problem ist aber natürlich nicht KPK spezifisch.



Abbildung 3.1: Schülerzeichnung zu einer Kette von „Energieumladern“.

Einige (und vor allem gute) Schüler kannten schon den Begriff der verschiedenen „Energieformen“ und des „Energiewandlers“. Hier musste etwas Überzeugungsarbeit geleistet werden, um zu begründen, dass diese Sprechweisen missverständlich sind.

3.3 Mechanik

3.3.1 Einführung

Am Anfang des Mechanikunterrichts steht die Motivation der zentralen physikalischen Größen „Geschwindigkeit“ und „Impuls“. Nachdem die vorläufige Definition der Mechanik als „Untersuchung der Bewegung von Gegenständen“ gegeben wurde, wurde praktisch sofort die Geschwindigkeit als wichtige Grundgröße identifiziert. Versuche mit verschiedenen schweren Bällen führten zwanglos zu den Begriffen „Schwung“ und „Wucht“. Der „Impuls“ konnte dann als fachsprachliche Bezeichnung dieser Größe eingeführt werden.

3.3.2 Der Mengencharakter des Impulses

Die Stoßversuche auf der Luftkissenbahn zeigen anschaulich, dass Impuls übertragen und verteilt werden kann (je nachdem, ob man eine elastische oder inelastische Kupplung verwendet). Leider hat man nur 3 baugleiche Wagen und das Verteilen des Impulses auf

„beliebig viele“ Körper ist nicht sehr eindrucksvoll. Das Gedankenexperiment, dass in diesem Fall der Impuls auf beliebig kleine Portionen aufgeteilt wird, wird von den Schülern jedoch als plausibel empfunden. Allerdings fällt der Transfer schwer, dass der Stoß mit dem Prellbock am Ende der Bahn dieser Situation entspricht. Der Impulsfluss in die Erde erscheint den Schülern also als nicht intuitiv. Als geradezu esoterisch wird der umgekehrte Vorgang angesehen, dass nämlich der Impuls ständig „aus der Erde“ entnommen wird. Versuche mit Skateboard und Inliner sind leider wenig eindrucksvoll, da die Reibung (vulgo: Impulsfluss in die Erde) zu groß ist! Dies ist sehr bedauerlich, da eine Isolation gegen Impulsverlust die Rolle der Erde als Impulsreservoir klären würde. Abb. 3.2 zeigt eine Schülerzeichnung des Tafelbildes, mit dem der Impulsfluss in die Erde anschaulich gemacht werden sollte. Die Analogie „Erde=großer Komet“ sollte hier deutlich machen, dass nur die enorme Größe der Erde verhindert, dass die Rückstoßwirkung des abspringenden Menschen wahrgenommen werden kann. Die Raketenbauversuche (8. Stunde, siehe auch die Arbeitsblätter „Bauanleitung Wasserrakete“ und „Warum fliegt eine Rakete?“ im Appendix) sollten ebenfalls illustrieren, dass jede Änderung der „Bewegungsmenge“ eines Körpers durch einen anderen Körper kompensiert werden muss. Abb. 3.3 zeigt eine Schülerzeichnung zur Illustration der Stoß- und Wurfversuche zum Mengencharakter des Impulses. Als gelegentliches Problem bei Schülerzeichnungen erweist sich, dass statt des

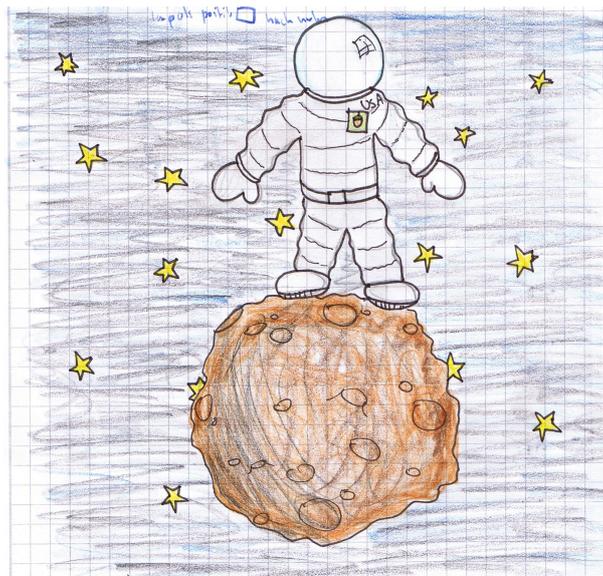


Abbildung 3.2: Schülerzeichnung zu Rückstoß und Impulsfluss in die Erde.

Impulsflusses die Geschwindigkeit eingezeichnet wird. Es musste betont werden, dass der Impulsfluss nicht unmittelbar beobachtet werden kann.

3.3.3 Das Vorzeichen des Impulses

Neben der Mengenartigkeit des Impulses steht die Tatsache, dass er mit einem Vorzeichen behaftet ist, am Beginn der KPK Mechanik. Das Stoßexperiment, mit dem dieser Sachverhalt eingeführt wird, (5. Stunde) erweist sich als intuitiv: die Erklärung durch ein negatives Vorzeichen wurde hier sogar von einem Schüler vorgeschlagen! Allerdings bedeutet dies nicht, dass dieser Begriff nicht immer wieder zu Schwierigkeiten führt.

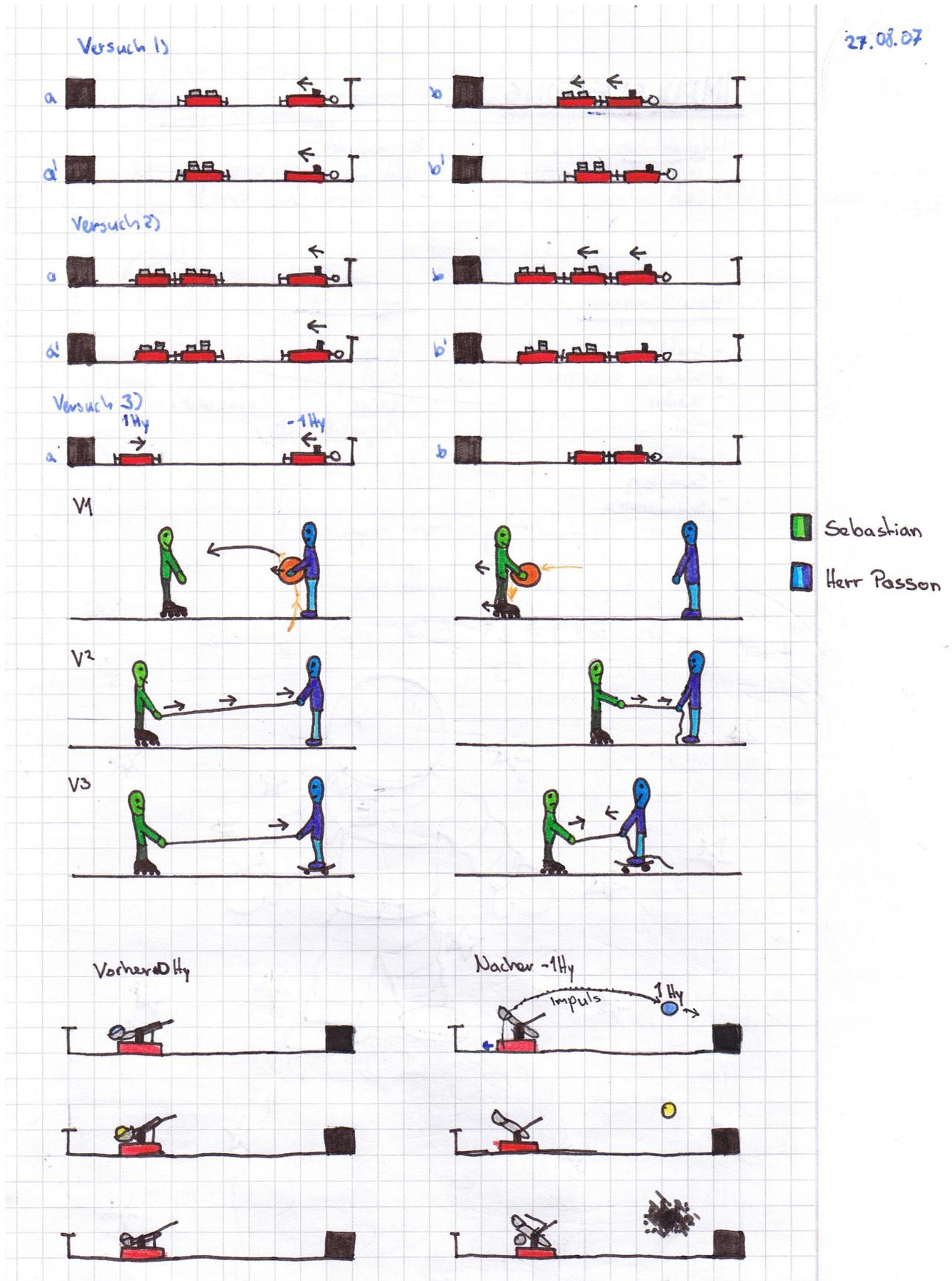


Abbildung 3.3: Schülerzeichnung zu den Versuchen, die den Impulstransport illustrieren – und damit seinen Mengencharakter verdeutlichen.

Ein typischer Schülerkommentar lautet: „Warum $p < 0$? Der Körper bewegt sich doch!“. Man bräuchte hier ein schlagendes Beispiel für eine *mengenartige* Größe, die negativ sein kann. Geldmengen („Schulden“) überzeugen nicht wirklich. Die Sequenz zum Raketenbau (8. Stunde, siehe auch die Arbeitsblätter „Bauanleitung Wasserrakete“ und „Warum fliegt eine Rakete?“ im Appendix) sollte auch hier zur Klärung beitragen: Beim Raketenflug erhält das unter Druck stehende Gas-Wasser-Gemisch nämlich einen positiven Impuls und *verringert* damit den Impuls der Rakete. Da diese jedoch zu Beginn ruht ($p=0$) wird ihr Impuls negativ.

3.3.4 Antrieb von Impulsströmen und Impulsstromkreise

Geschwindigkeitsdifferenzen als Antrieb von Impulsströmen (11. Stunde) erscheinen sehr intuitiv. Hier ist die aristotelische Alltagsvorstellung nützlich und richtig! Während $F \propto a$ gilt, ist der Impuls eben $\propto v$.

Wenn man jedoch die ganze Zeit betont, dass Impulsfluss mit Bewegungsänderung verknüpft ist, muss der geschlossene Impulsstromkreis etwas verwundern. Die Einführung der Begriffe „Zug-“ und „Druckspannung“ ist außerdem sehr technisch. Zudem ist es skurril, dass Impulsstromkreise in der Regel einen verschwindenden Widerstand haben!

3.3.5 Impulsstromstärke (=Kraft)

In der 15. Stunde wird die Impulsstromstärke behandelt. An dieser Stelle rächt sich, dass das Kapitel zum Strömen von Flüssigkeiten und Gasen ausgelassen wurde. Der KPK „Stromstärkenbegriff“ (=mengenartige Größe pro Zeiteinheit) muss an dieser Stelle mitgeliefert werden und bleibt zunächst sehr abstrakt. Ebenfalls zeigt sich, dass zumindest die Sequenz zur Energie hätte genutzt werden sollen, um den Begriff der Energiestromstärke (= Leistung) systematisch zu behandeln.

Die „Knotenregel“ für Kräfte wird von allen Schülern gefunden, allerdings wie eine Selbstverständlichkeit aufgenommen.

3.3.6 $p=mv$

Es erscheint ungeschickt, dass die Beziehung $p = mv$ erst so spät (17. Stunde) eingeführt wird. Sicherlich ist es vorteilhaft, erst ein qualitatives Verständnis herzustellen, aber ab einer bestimmten Stelle treten immer wieder Fragen auf, die eine quantitative Behandlung motivieren könnten.

Die Schülerversuche mit der Schwefelbahn (siehe auch Arbeitsblatt „Versuch mit der Schwefelbahn“ im Appendix) erzeugen zwar eine hohe Schüleraktivität, sind aber recht komplex. Die numerischen Ergebnisse der Schüler erweisen sich als vollkommen unbrauchbar! Eine Wiederholung der Messung durch zwei Schüler vor der Klasse lieferte jedoch rasch brauchbare Zahlen. Das Resultat „ $p=mv$ “ erscheint jedoch ebenfalls allen Schülern wie selbstverständlich! Man hat es also mit dem in der Physikdidaktik häufig auftretenden Problem zu tun, mit großem Aufwand ein Problem gelöst zu haben, dass die Schüler gar nicht hatten.

Immerhin gelingt mit der nun vorliegenden Berechnungsvorschrift für den Impuls die Klärung einiger bisher nur quantitativ angesprochener Fragen. Dass aufgrund der ungeheuren Trägheit der Erde die Impulsströme in sie unbemerkt bleiben kann nun berechnet werden und hilft dabei, die Rolle der Erde als Impulsreservoir zu verdeutlichen.

3.3.7 Das Schwerfeld und der freie Fall

Hier ist das Konzept der Kraft (als Gewichtskraft) den Schülern offensichtlich schon vertraut. Zumindest fallen sie immer wieder aus der Impulsstrom bzw. Impulsstromstärken Sprechweise heraus. Eine echte Stärke des KPK zeigt sich hier im Vergleich zum konventionellen Unterricht, der die Behandlung der Gewichtskraft in der Regel an den Anfang stellt. Führt man den *allgemeinen* Kraftbegriff jedoch über die *spezielle* Schwerkraft ein, kann seine Tragweite leicht unterschätzt werden. Da der KPK das Schwerfeld erst so spät einführt (bei uns in der 21. Stunde), ist diese Verwechslungsgefahr sehr gering.

Die Behandlung des freien Falls ist eine schöne Anwendung der bis zu diesem Zeitpunkt erarbeiteten Begriffe. Durch das Schwerfeld fließt ständig ein Impulsstrom der Stärke $m \cdot g$ in einen fallenden Körper. Sein Impuls ist nach t Sekunden also $p = m \cdot g \cdot t$. Für den Impuls gilt jedoch $p = m \cdot v$. Daraus folgt:

$$\begin{aligned}m \cdot v &= m \cdot g \cdot t \\v &= g \cdot t\end{aligned}$$

Man findet somit die Masseunabhängigkeit der Fallgeschwindigkeit. Der Versuch mit einer evakuierten Glasröhre, in der Gegenstände mit verschiedener Luftreibung gleichschnell fallen, wird von den Schülern als sehr eindrucksvoll erlebt.

3.3.8 Flaschenzug, Hebel und schiefe Ebene

Zur Hinführung auf den Energiebegriff wurde der Flaschenzug verwendet (23. Stunde). Dieser Zugang bietet eine Anwendung der zuvor erarbeiteten Knotenregel für Impulsstromstärken¹ und behandelt eine Bewegung im Schwerfeld der Erde; er fügt sich also auch aus diesem Grund organisch in den Unterrichtsverlauf. Im KPK Lehrbuch wird an dieser Stelle jedoch zunächst der Zusammenhang $\frac{E}{t} = v \cdot \frac{p}{t}$ (also (mechanische) Leistung als Produkt aus Impulsstromstärke (= Kraft) und der Geschwindigkeit des Impulsleiters) eingeführt. Aufgrund der schlechten Erfahrung mit dem Stromstärkenbegriff wurde von diesem Vorgehen abgesehen.

In üblicher Sprechweise wurde anhand des Flaschenzugs also die mechanische Arbeit (bzw. Hubarbeit) und die Lageenergie eingeführt. Die Behandlung einiger Aspekte der Wasserkraft (siehe „Aufgaben zur Energie im Schwerfeld“) konnte zudem genutzt werden, um den Begriff des Stroms (=mengenartige Größe pro Zeit) tiefer einzubetten. Im Anschluss daran wurde der mechanische Energiebegriff systematisiert und die Vektorwertigkeit von Impuls und Impulsstromstärke behandelt. Erst dadurch waren die Voraussetzungen für die Behandlung von schiefer Ebene und des Hebelgesetzes gegeben.

¹Die Aufteilung der Impulsstromstärke bei Rollen stellt allerdings einen Spezialfall der Knotenregel dar: sie erfolgt symmetrisch.

3.3.9 Impuls und Energie

Eine klare begriffliche und vorstellungsmässige Trennung zwischen Impuls und Energie (besonders kinetischer Energie) ist einer der Schlüssel zu einem echten Verständnis der Mechanik. Gemäß des KPK Mottos „Energie hat immer einen Träger“ (und in der Mechanik fungiert der Impuls als ein solcher) kann der Zusammenhang zwischen Impuls und Energie *formal* sehr sauber geklärt werden. Dies ist eine echte Stärke des Modells. Allerdings muss diese formale Unterscheidung von anschaulichen Vorstellungen getragen werden. Sich den Transport einer abstrakten und unstofflichen Größe durch eine andere vorzustellen, ist aber sicherlich schwierig – nicht nur für die Schüler. Diese Frage wurde deshalb immer wieder aufgegriffen und an Beispielen erläutert. Naturgemäß ist es schwierig einzuschätzen, wie nachhaltig der Lernerfolg hier war. An dieser Stelle zeigt sich natürlich auch die Schwierigkeit, das Energieträgermodell des KPK in einer 9. Klasse (und innerhalb der Mechanik) neu einzuführen. Die Bearbeitung des Arbeitsauftrages „Zusammenhang zwischen Energie und Impuls beim Gummiband“ (siehe Appendix) gelang jedoch in allen Gruppen vollständig.

3.3.10 Impuls als Vektor

Erst sehr spät kommt der KPK auf die Vektorwertigkeit des Impulses zu sprechen. Das Lehrbuch betont zudem sehr stark die Unterscheidung zwischen der Richtung des Impulstransportes und seiner eigenen Richtung (siehe Abschnitt 1.6.3). Dies ist wichtig, um der Verwechslung vorzubeugen, dass in den bereits behandelten Impulsstromkreisen der „Impulsvektor“ seine Richtung ändert. Tatsächlich gilt dies nur für die Transportrichtung des Impulses. Von dem Verfahren, verschiedene „Impulsarten“ einzuführen und sie über den Winkel zu charakterisieren (etwa „270°-Impuls“), wurde jedoch abgesehen. Diese Notation erschien mir zu umständlich. Stattdessen waren die wichtigsten Lernziele dieser Sequenz:

- Ein qualitatives Verständnis von „Vektoren“,
- begründen zu können, warum Impuls und Impulsstromstärke Vektoren sind sowie
- eine sichere Anwendung der zeichnerischen Vektoraddition zu erreichen.

3.4 Die Behandlung der Begriffe des traditionellen Unterrichts

In der Einleitung haben wir bereits begründet, warum sogar bei einer durchgängigen Verwendung des KPK in der Schule die zusätzliche Einführung der Begriffe des traditionellen Unterrichts sinnvoll und notwendig ist. Wir wenden uns nun der Frage zu, ob dies problemlos gelingt, oder ob damit eine teilweise „Auslöschung“ der KPK-Inhalte verbunden ist.

Die Behandlung der Begriffe Kraft, mechanische Arbeit und Leistung erfolgt dabei nicht erst am Ende der Reihe, sondern kann immer schon in den Unterrichtsverlauf integriert werden. Vor allem mit der Einführung der „Impulsstromstärke“ (15. Stunde) habe ich

die Beschreibung im „Kraftbild“ mit der „Impulsstrom-Darstellung“ verglichen. Dieses Vorgehen wird auch im KPK Lehrbuch vorgeschlagen (siehe Abb. 3.4). In Bezug auf die Begriffe „Leistung“ und „Arbeit“ handelt es sich zudem nur um Bezeichnungen – ihre Verwendung kann leicht eingeübt werden, indem man im Unterrichtsgespräch beide Sprechweisen verwendet. Bei Schüleräußerungen kann nachgefragt werden, wie der jeweilige Sachverhalt mit den „anderen“ Begriffen ausgedrückt wird.

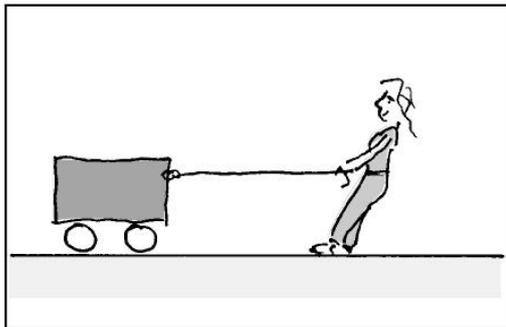


Abb. 3.49. Die Person übt auf den Wagen eine Kraft aus. Dadurch ändert sich der Impuls des Wagens.

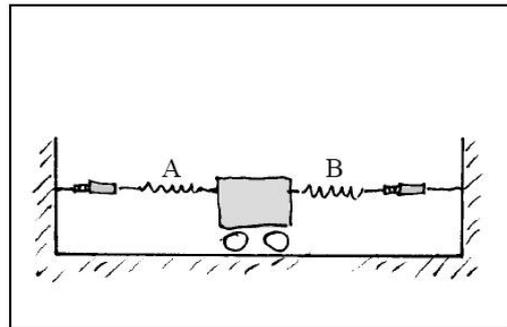


Abb. 3.50. Feder A übt auf den Wagen eine nach links gerichtete, Feder B eine nach rechts gerichtete Kraft aus. Da die Kräfte vom selben Betrag sind, ändert sich der Impuls des Wagens nicht

Abbildung 3.4: Illustration des Unterschiedes zwischen Impulsstrom- und Kraftbild (Abb. aus [2][Band 1, S. 41]).

In der Tat stellt sich heraus, dass bei den hier behandelten Inhalten der Mechanik (Grundbegriffe, einfache Maschinen und Energie) die konzeptionellen Unterschiede zwischen KPK und traditionellem Unterricht zu keinen Problemen führen. Charakteristisch für den KPK ist, dass die dynamische Betrachtung von Anfang an im Mittelpunkt steht. Aus dieser Perspektive können die Themen „Kraftwandler“, „goldene Regel der Mechanik“ etc. leicht abgeleitet werden. Das übliche Vorgehen räumt statischen Fragestellungen mehr Gewicht ein (Zerlegung von Kräften, Angriffspunkt der Kraft etc.). Es ergibt sich dadurch jedoch keine Kluft zwischen den Konzepten, die überbrückt werden müsste, sondern eher eine umfassendere Einbettung der Begriffe durch den KPK². Für die Vertiefung der Mechanik in der Jahrgangstufe 11 (G9) ist das Selbe zu erwarten. In traditioneller Darstellung ist diese eher „kinematiklastig“. Die dynamische Darstellung des KPK verspricht auch hier eher eine Akzentverschiebung und keine Kluft zwischen den verwendeten Begriffen. Meine anfängliche Befürchtung, dass die KPK Schüler am Ende meines Unterrichts noch aufwendig die Terminologie und Konzepte des traditionellen Unterrichts lernen müssten, erwies sich mithin als vollkommen unbegründet. In der hier vorgestellten Reihe liegt der Hauptunterschied zwischen KPK und traditionellem Unterricht darin, dass die Kraft nicht als Grundgröße eingeführt wird, sondern als aus dem Impuls abgeleitet. Liegt der Begriff der Kraft bzw. Impulsstromstärke dann vor, verläuft der Unterricht sehr ähnlich³. Allerdings kostet die Einführung des Kraftbegriffs über den Impuls Zeit. Diese kann man natürlich

²In Abschnitt 3.5.1 werden wir die Frage ansprechen, ob durch das traditionelle Vorgehen verbreiteten Fehlvorstellungen Vorschub geleistet wird.

³Bei der Einführung der mechanischen Energie ergibt sich durch das „Trägermodell“ ein weiterer Unterschied. Aber auch hier eher in dem Sinne, dass der KPK dem Konzept eine zusätzliche Einbettung gibt, die nicht im Gegensatz zum traditionellen Unterricht steht. Unterrichtet man jedoch nur die Mechanik nach dem KPK, kann die Regel „Energie hat immer einen Träger“ nicht sinnvoll formuliert werden. An dieser Stelle erlaubt sich unsere Unterrichtsreihe also eine Inkonsistenz, denn an die Ein-

in der 11. Klasse wieder einsparen – wenn durchgängig nach dem KPK unterrichtet wird. In meiner Lerngruppe fehlte diese Zeit (im Vergleich mit den Parallelklassen) etwa für eine quantitative Behandlung der Reibungskräfte oder in der Wärmelehre der zweiten Schuljahreshälfte. Hier hatten die traditionell unterrichteten Klassen einige Wochen Vorsprung⁴.

Ob diese Zeit sinnvoll investiert ist, muss sich natürlich an der Nachhaltigkeit des Lernerfolges und etwa der Vermeidung von verbreiteten Fehlvorstellungen messen lassen. Mit dieser Frage beschäftigt sich der nächste Abschnitt.

3.5 Ansätze für eine Evaluation

Im Sinne der Lehrerfunktion „Evaluieren, Innovieren und Kooperieren“ ist es sinnvoll und notwendig, den Unterrichtserfolg des KPK mit dem des traditionellen Unterrichts zu vergleichen. Idealerweise würde man dazu die Ergebnisse untersuchen, die jeweilige Testgruppen bei der Bearbeitung repräsentativer Problemen erzielen⁵. Im Rahmen dieser Arbeit kann eine solche Vergleichsstudie natürlich weder konzipiert noch durchgeführt werden (Anhang B.2 fasst die existierenden Arbeiten zur Evaluation des KPK kurz zusammen). Ein bescheidener Ansatz in diese Richtung wurde jedoch versucht, nämlich die Bearbeitung des Machschen Gedankenexperiments zur „Fliege in der Flasche“. Es lautet in seinen eigenen Worten (zitiert nach [17][S. 16]):

„Eine Fliege sitzt in einem verschlossenen äquilibrierten Kochfläschchen. Was geschieht, wenn sie auffliegt und im Innern des Fläschchens sich schwebend erhält?“

Ernst Mach, 1897

Machs Formulierung von der „äquilibrierten“ Flasche hebt auf die Verwendung einer Balkenwaage ab. Für unsere Zwecke kann das Experiment natürlich im Sinne von Abb. 3.5 realisiert werden⁶. Der KPK-Versuchsklasse und einer Parallelklasse wurden nun zusammen mit der Abbildung 3.5 die folgende Aufgabe vorgelegt: Führe in Gedanken den folgenden Versuch durch: Eine verschlossene Flasche mit einer Fliege in ihr wird auf eine Waage gestellt. Zunächst sitzt die Fliege auf dem Flaschenboden. Nun fliegt die Fliege in der Flasche auf einer festen Höhe. Zeigt die Waage jetzt einen anderen Wert an? Begründe deine Antwort!

führung der Entropie als Energieträger der Wärmelehre ist im 2. Halbjahr eigentlich nicht gedacht. Auf diesen Punkt werden wir in Kapitel 4 zurückkommen.

⁴Dabei ist durchaus unklar, ob dieser Rückstand nur durch den KPK, oder auch aufgrund der mangelnden Erfahrung und Routine des Berufsanfängers zustande kam! Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass bei durchgängiger Anwendung des KPK die Analogiebildungen ausgenutzt werden können.

⁵Natürlich umfasst der Bereich „Evaluation“ mehr, als nur die Auswertung von Vergleichsuntersuchungen. Die Reflexion der Unterrichtserfahrung hat ebenfalls bewertenden Charakter (siehe dazu etwa die Modifikationsvorschläge in Kapitel 4).

⁶Ein ähnliches Problem war am 20. 9. 2007 Gegenstand der „kleinen Anfrage“ bei Leonardo (Wissenschaftsmagazin auf WDR5). Die Wissenschaftsendung „Kopfball“ hat diesem Problem ebenfalls eine Sendung gewidmet (20. 5. 2007), in der der Versuch mit einem Modellhubschrauber durchgeführt wurde. Manuskript und podcast sind unter [18] verfügbar. Dieses Material ist für den Einsatz im Unterricht hervorragend geeignet.

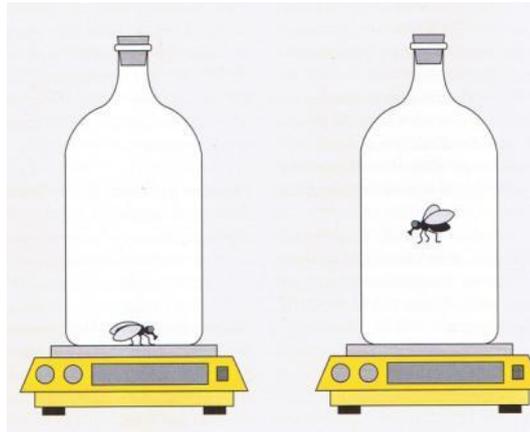


Abbildung 3.5: Illustration des Machschen Gedankenexperiments (Abb. aus [17], S. 18).

Die korrekte Lösung lautet, dass die Waage keinen Gewichtsunterschied anzeigt. In beiden Fällen werden die Flasche, die enthaltene Luft und die Fliege gewogen. Daran ändert das Abheben der Fliege nichts. Wenn die Fliege in der Luft ist, kompensiert sie durch ihren Flügelschlag den gravitativen Impulsstrom. Zu diesem Zweck muss sie den Impuls aus der Luft entnehmen, die also mit der gleichen Kraft auf die Waage drückt, wie zuvor das auf ihr ruhende Tier. Entscheidend ist, dass man ein abgeschlossenes System betrachtet und deshalb der Impuls, den die Fliege auf die Luft überträgt, die Waage erreichen muss.

In beiden Klassen ist die physikalische Erklärung des Fliegens (Bernoullieffekt etc.) nicht behandelt worden. Zum Zeitpunkt des Tests waren Auftrieb und Luftdruck ebenfalls noch nicht behandelt.

3.5.1 Ergebnisse des Vergleichstests

Die Bearbeitung der Aufgabe zur „Fliege in der Flasche“ ergab in der KPK Lerngruppe (31 Teilnehmer) 71% korrekte Antworten (d.h. *keinen* Gewichtsunterschied). Ca. 50% aller Schüler gaben dabei neben der richtigen Antwort auch eine sinnvolle Begründung. In der Regel wurde argumentiert, dass die Waage das Gewicht von Luft und Fliege anzeige und dieses bliebe in den betrachteten Fällen konstant⁷. Jedoch argumentierten nur 10% der Schüler explizit mit Hilfe des Impulsstroms, der von den Flügeln der Fliege durch die Luft auf die Waage wirkt.

In der traditionell unterrichteten Kontrollgruppe nahmen 28 Schüler an dem Test teil. Hier fanden nur 50% die korrekte Lösung. Bei 32% aller Schüler waren Antwort *und* Begründung korrekt und sinnvoll. 46% der Schüler gaben eine falsche Antwort – ein Schüler mochte sich nicht entscheiden und zählte Argumente für verschiedene Lösungen auf. Die typische Begründung für die richtige Lösung war ähnlich wie in der KPK Gruppe. Ebenso ähnelten sich die Begründungen für die falsche Lösung in beiden Gruppen. Hier wurde von fast allen Schülern mit falschen Antworten argumentiert, dass die Waage weniger anzeige,

⁷Diese Antwort ist natürlich noch nicht ganz vollständig, denn erst der Bewegungszustand der Fliege liefert die vollständige dynamische Erklärung des angezeigten Gewichts. Fliegt die Fliege nach oben zeigt die Waage mehr an, bewegt sie sich nach unten verringert sich das angezeigte Gewicht.

falls die Fliege in der Luft ist, da diese sich „selber trägt“ bzw. „nicht mehr auf die Waage drückt“. Tabelle 3.1 stellt die Ergebnisse noch einmal zusammen.

	richtige Lösung	richtige Lösung mit sinnvoller Begründung	falsche oder keine Lösung
KPK (31 Schüler)	71%	50%	29%
traditionell (28 Schüler)	50%	32%	50%

Tabelle 3.1: Ergebnisse des Vergleichstest zwischen KPK und traditionell unterrichteter Kontrollgruppe.

Natürlich kann auf der Grundlage dieser kleinen Untersuchung mit knapp 60 Schülern und nur einer Kontrollfrage keine verlässliche Aussage über den Erfolg oder Misserfolg des KPK getroffen werden. Dennoch ergibt sich ein verblüffend eindeutiges Ergebnis, von über 20% mehr richtigen Lösungen in der KPK Gruppe. Es ist plausibel anzunehmen, dass die Vorstellung von einem „Strom“ des Impulses zwischen Fliege, Luft und Waage hilfreich ist, um das Ergebnis des Gedankenexperiments vorauszusagen. In den Begründungen für die falsche Antwort, hört die Fliege auf zur Gewichtskraft auf der Waage beizutragen, wenn sie sich selber in der Luft hält. Das deutlich häufigere Auftreten dieser Fehlvorstellung in der traditionell unterrichteten Gruppe könnte mit der dort üblichen Einführung der Kraft zusammenhängen. In der traditionellen Einführung des Kraftbegriffs wird nicht von Anfang an betont, dass Kräfte aufgrund der Impulserhaltung immer paarweise auftreten müssen. Das Wechselwirkungsprinzip muss hier nachgeliefert werden, nachdem die Schüler in vielen Zusammenhängen bereits „freischwebende“ Kraftpfeile gesehen haben. Im KPK Konzept wird von Anfang an hervorgehoben, dass ein Impulsstrom in einen Körper auch eine Quelle haben muss. Auf diese Quelle des Impulses muss dann aber das wirken, was man üblicherweise die „Gegenkraft“ nennt. Damit scheint unsere Untersuchung den Befund von Maurer [10][S. 12] zu bestätigen, der ebenfalls den KPK zur Vermeidung von Fehlvorstellungen hinsichtlich des Wechselwirkungsprinzips empfiehlt.

4 Zusammenfassung und Perspektiven

Wie in der Einleitung ausgeführt, waren für diese Arbeit im wesentlichen drei Fragen leitend: (i) Welche detaillierten Lernschwierigkeiten treten bei Anwendung des KPK Konzeptes auf? (ii) Können Teile des KPK in das übliche Curriculum integriert werden und führt die zusätzliche Behandlung der traditionellen Begriffe zu Problemen? (iii) Kann der KPK helfen, verbreitete Fehlvorstellungen der Mechanik zu vermeiden? Im Folgenden fassen wir unsere Ergebnisse in Hinblick auf diese eng zusammenhängenden Ausgangsfragen noch einmal zusammen.

Mit dem KPK liegt ein gut strukturiertes Konzept vor, das eine hervorragende Grundlage für die Planung von Unterricht bietet. Die Gegenstände sind eng miteinander verzahnt und den Schülern stellt sich die Physik schlüssig und einheitlich dar. Die zusätzliche Behandlung der Begriffe des traditionellen Unterrichts stellt wider Erwarten kein Problem dar (siehe Abschnitt 3.4). Aber natürlich ist auch der KPK kein „Königsweg“¹ zur Mechanik. Die Schwierigkeiten und Probleme wurden in Kapitel 3 bereits angesprochen. Aus der Erfahrung dieser Unterrichtsreihe ergeben sich deshalb folgende Verbesserungsvorschläge für eine erneute Durchführung:

- Der Stromstärkenbegriff (d.h. „mengenartige Größe pro Zeiteinheit“) muss zumindest schon bei der Energie eingeführt werden! Eine kurze Sequenz zum Strömen von Flüssigkeiten erscheint ebenfalls sinnvoll – jedoch zeitkritisch.
- Wünschenswert wären eindrucksvolle Versuche, die die Rolle der Erde als Impulsreservoir verdeutlichen – etwa durch eine große Anordnung mit Impulsisolation (große reibungsarme Platte, auf der sich ein Schüler bewegen kann o.ä.).
- Der Vektorcharakter des Impulses sollte schon früher eingeführt werden. Dadurch kann auch die Problematik des „negativen“ Impulses sinnvoll behandelt werden.
- Eine etwas frühere Einführung der Beziehung $p = m \cdot v$ erscheint sinnvoll. Zudem muss deutlicher problematisiert werden, dass dieses Ergebnis *nicht* selbstverständlich ist.

Das Modell vom Strömen mengenartiger Größen ist zwar intuitiv, aber falls diese Größen so abstrakt wie der „Impuls“ sind, ist dieses Strukturmodell dennoch anspruchsvoll. Der notwendige Aufwand scheint mir vor allem dann gerechtfertigt, wenn das KPK Modell auch in den anderen Bereichen der Schulphysik (Wärme- und E-Lehre sowie dem Mechanikunterricht der Oberstufe) angewendet wird. Seine volle Stärke kann der KPK

¹Im Sinne der legendären Unterhaltung zwischen Euklid und Ptolemaios über einen sicheren und zugleich anstrengungslosen Weg zur Geometrie.

offensichtlich erst dann ausspielen, wenn die vertikale Vernetzung aller Gebiete der Schulphysik deutlich hervortritt.

Die Ergebnisse unserer kleinen Untersuchung zum Vergleich des Lernerfolges („Fliege in der Flasche“, Abschnitt 3.5.1) ermutigen allerdings durchaus dazu, das KPK Konzept für die Mechanik alleine zu integrieren. Hier deutete sich das Potenzial des KPK an, verbreitete Fehlvorstellungen bezüglich des Wechselwirkungsprinzips zu vermeiden. In diesem Fall sollte jedoch mindestens eine enge Abstimmung mit dem Lehrplan der Jahrgangsstufe 11 (G9) erfolgen. Der Versuch, noch kleinere Einheiten des KPK in das Curriculum aufzunehmen, erscheint wenig sinnvoll.

Zu klären bliebe in diesem Fall jedoch, wie mit dem Energieträgermodell verfahren wird. In der vorliegenden Unterrichtsreihe wurde es eingeführt und der Impuls als Energieträger der Mechanik charakterisiert. Dieses Vorgehen setzt streng genommen voraus, dass das Strömen der jeweiligen mengenartigen Größe in *allen* Teilbereichen der Physik in den Mittelpunkt gestellt wird. Hinsichtlich der Elektrizitätslehre ist dies offensichtlich unproblematisch – hier unterscheiden sich KPK und traditioneller Unterricht ohnehin nur geringfügig. Verzichtet man jedoch auf die Einführung der Entropie in der Wärmelehre, kann die Regel „Energie hat immer einen Träger“ nicht formuliert werden. An dieser Stelle verliert man somit ein wichtiges Instrument, um den Zusammenhang *und* Unterschied zwischen Impuls und Energie zu klären.

4.1 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Friedrich Hermann und seine Mitarbeiter mit dem Karlsruher Physikkurs eine einheitliche und schlüssige Neuformulierung (nicht nur) der Schulphysik vorgelegt haben. Zahlreiche Gymnasien in Baden-Württemberg arbeiten bereits erfolgreich nach diesem Konzept². Die in dieser Unterrichtsreihe gemachten Erfahrungen sind positiv und ermutigen zu seiner weiteren Anwendung. Insbesondere kann der KPK ein Beitrag sein, um den Herausforderungen der Schulzeitverkürzung zu begegnen.

Das vielleicht größte Problem des KPK liegt darin, dass seine Umsetzung an der Schule mit beträchtlichem Aufwand verbunden ist: idealerweise müssen mehrere Kollegen die Zeit aufbringen, sich in das Konzept einzuarbeiten. Sinnvoll wäre etwa die Teilnahme an entsprechenden Fortbildungsveranstaltungen (siehe etwa die Veranstaltungsübersicht unter [19]). Zusätzlich muss das bereits vorhandene Unterrichtsmaterial umgestaltet bzw. Material in großem Umfang neu entwickelt werden. Es ist also gerade die Geschlossenheit des KPK, die sich gleichzeitig als Stärke und Schwäche erweist. Während sie durch Analogiebildung zwischen verschiedenen Bereichen der Physik eine effizientere Lernzeitnutzung verspricht und den Schülern das Verständnis erleichtern kann, erschwert sie, dass einzelne Elemente herausgelöst werden können und damit die Einführung des KPK schrittweise erfolgen kann.

²Der KPK ist auch Grundlage von Physikvorlesungen für Ingenieure, z. Bsp. an der FH Dortmund und der TU München.

Anhang A

Arbeitsblätter

Energie und Energieträger

Aufgabe: Vervollständige die Energieflussdiagramme! Was passiert mit dem Energieträger anschließend?

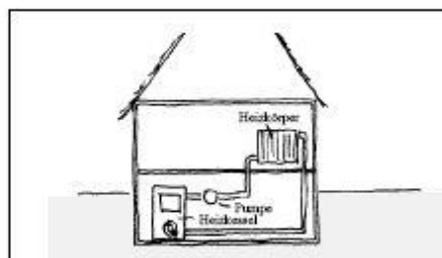


Abb. 1.1. Die Energie geht mit dem Energieträger "warmes Wasser" vom Heizkessel zum Heizkörper.

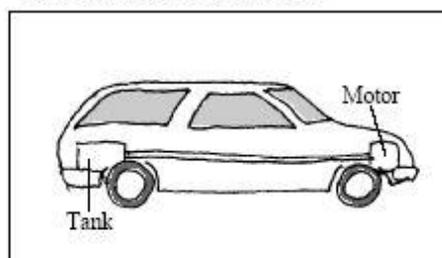
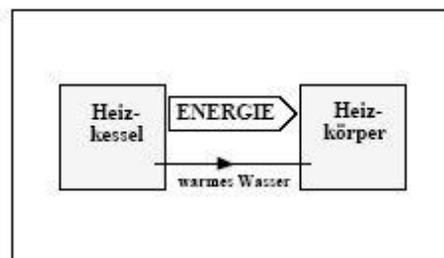


Abb. 1.2. Die Energie gelangt mit dem Energieträger Benzin vom Tank zum Motor.

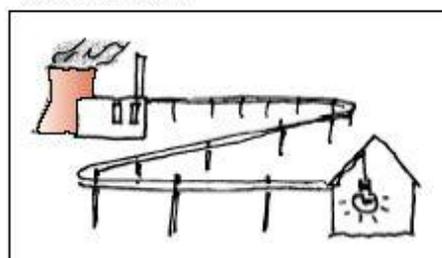
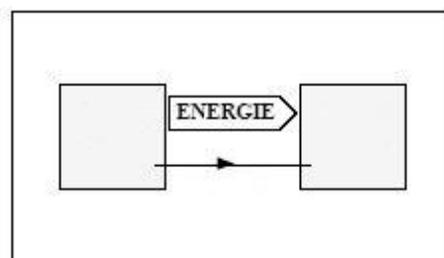
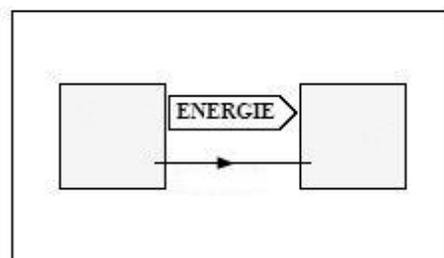
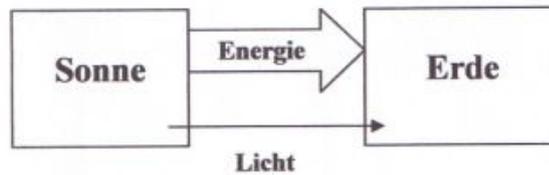


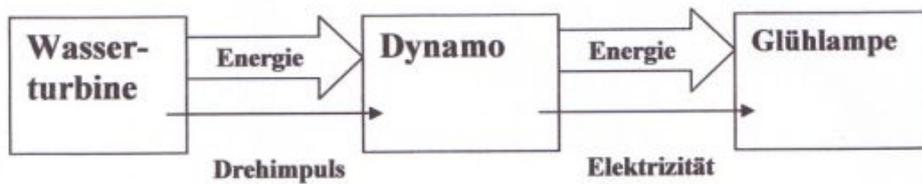
Abb. 1.3. Die Energie kommt mit dem Energieträger Elektrizität vom Kraftwerk zur Lampe.



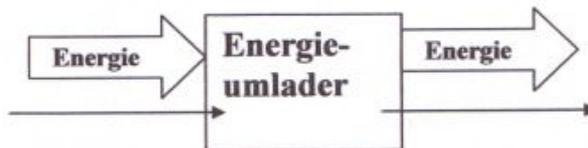
Beispiele für Energieflussdiagramme



Beachte: Der Empfänger kann auch wieder eine Quelle sein!



Beispiele für „Energieumlader“



Elektrizität	Elektromotor	Drehimpuls
Elektrizität	Glühlampe	Licht
Elektrizität	Elektropumpe	Druckwasser
Licht	Solarzelle	Elektrizität
Licht	Wald	Holz (Brennstoff, Kohle, Öl)
Licht	Sonnenkollektor	warmes Wasser
Druckwasser	Turbine	Drehimpuls
bewegte Luft	Windrad	Drehimpuls
Drehimpuls	Dynamo	Elektrizität
Drehimpuls	Ventilator	bewegte Luft
Brennstoff	Kohlekraftwerk	Elektrizität
Brennstoff	Öllampe	Licht
Brennstoff	Ölheizung	warme Luft
Brennstoff	Benzinmotor	Drehimpuls

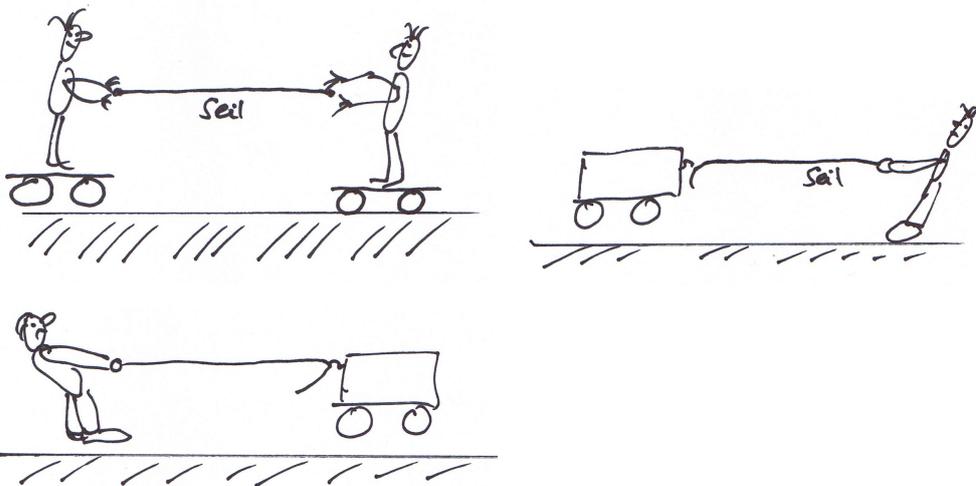
Arbeitsauftrag: Konstruiert in Partnerarbeit eine Kette von möglichst vielen „Energieumladevorgängen“. Fertigt neben dem Energieflussdiagramm auch eine Zeichnung eurer „Maschine“ an!

Impulsflüsse

Vorbemerkung: Wir wissen, dass Impuls positive und negative Werte haben kann. Wir haben (willkürlich) festgelegt: Ein Körper hat positiven Impuls, wenn er sich nach rechts bewegt und negativen Impuls, wenn er sich nach links bewegt.

Aufgabe 1

Betrachte die folgenden Abbildungen und zeichne die Impulsflüsse ein. Achte auch auf die Richtung!



Aufgabe 2

Räder dienen der Isolation gegen Impulsfluss in die Erde. Welche anderen Methoden gibt es, zu verhindern, dass Impuls in die Erde abfließt?

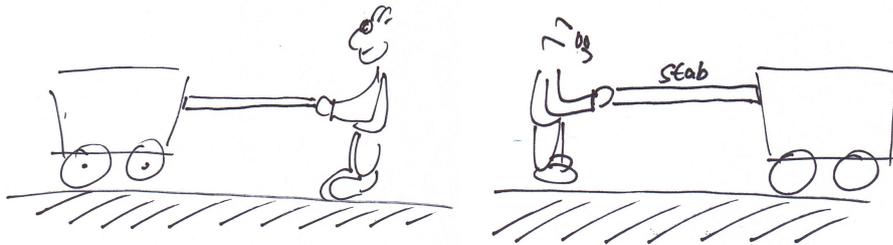
Aufgabe 3

Ein Auto versucht bei Glatteis, scharf zu bremsen. Was passiert? Für den Bremsvorgang spielt die Impulsleitfähigkeit eine wichtige Rolle. Was ist dazu im Falle des Glatteises zu sagen?

Impulsflüsse II

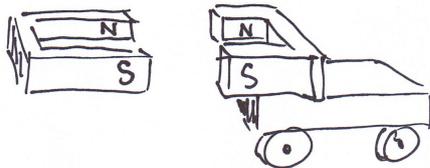
Aufgabe 1

Auf den beiden Abbildungen schiebt die Person den Wagen mit einem Stab. Zeichne die Impulsflüsse und ihre Richtung ein!



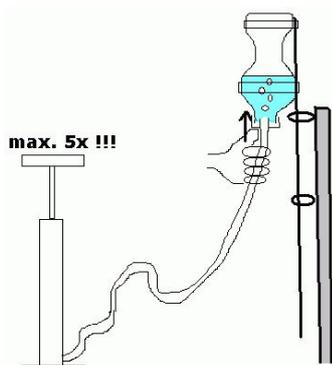
Aufgabe 2

Betrachte die folgende Abbildung. Wer oder was leitet hier den Impuls?



Bauanleitung Wasserrakete

An eine Softdrink-Plastikflasche wird ein leichter Stab geklebt, in den Schraubverschluss wird ein kleines (!) Loch gebohrt. Die Flasche wird teilweise mit Wasser gefüllt, in die Startrampe gestellt und mittels Schlauch und Luftpumpe mit Luft befüllt. Nach maximal fünf (Achtung: die Flasche könnte platzen) Kolbenhüben der Luftpumpe den Schlauch zwischen 4 Fingern und der Handfläche festhalten und die Flasche mit dem Daumen vom Schlauch drücken.



Warum fliegt eine Rakete?

Vorbemerkung: Bei einer senkrechten Bewegung legen wir fest: Ein Körper hat positiven Impuls, wenn er sich nach unten bewegt und negativen Impuls, wenn er sich nach oben bewegt.



1. Zeichne den *Impulsfluss* bei unserem Raketenexperiment ein:
2. Welche *Funktion* hat der Überdruck in der Flasche und was macht er mit dem *Impuls*?
3. Welchen Impuls haben Rakete und das Luft-Wassergemisch vor dem Start?
4. Überlege dir den Zusammenhang zwischen dem Raketenexperiment und der folgenden Situation:



(Tipp: was entspricht hier dem Überdruck, dem Luft-Wasser Gemisch und der Rakete?)

Der Antrieb von Impulsströmen

Die folgenden Abbildungen stammen aus dem Buch des Karlsruher Physikkurses. Ihr könnt das Buch von meiner Webseite laden (www.psiquadrat.de Link ganz unten: Mechanik Buch für die 9b).

Betrachte die folgende Abbildung:

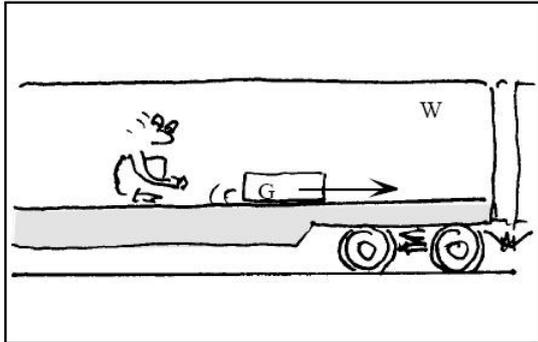


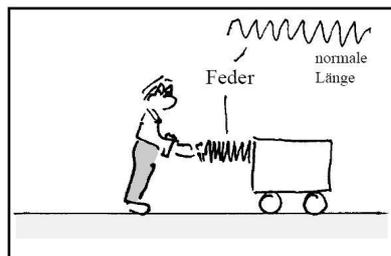
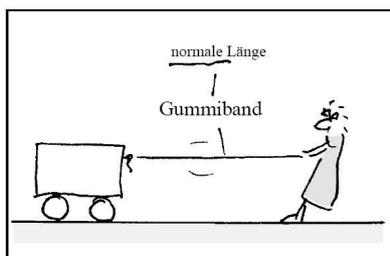
Abb. 3.30. In einem Eisenbahnwagen rutscht ein Gegenstand über den Boden.

In einem nach rechts fahrenden Eisenbahnwagen W, Abb. 3.30, wird ein Gegenstand G auf den Boden geworfen, und zwar so, daß er über den Boden nach rechts rutscht. Die Geschwindigkeit von G ist also unmittelbar nach dem Auftreffen auf dem Boden größer als die des Zuges. Der Gegenstand kommt aber schnell zum Stillstand. Mit Stillstand meinen wir hier, daß er sich relativ zum Zug nicht mehr bewegt. Oder anders ausgedrückt: er bewegt sich jetzt genauso schnell wie der Eisenbahnwagen. Während des Rutschens hat der Impuls von G abgenommen, es ist Impuls von G nach W geflossen. Wir werfen nun G noch einmal auf den Boden, aber diesmal so, daß er nach links gleitet. Jetzt ist seine Geschwindigkeit zunächst kleiner als die des Zuges. Wieder gleichen sich aber beide Geschwindigkeiten schnell an. Diesmal nimmt der Impuls von G während des Rutschens zu. Es fließt also Impuls vom Wagen W in den Gegenstand G. Hast Du bemerkt, daß für die Richtung, in die der Impulsstrom fließt, eine einfache Regel gilt?

Regel:

Druck und Zugspannung

Betrachte die folgenden Abbildungen: In welche Richtung fließt der Impuls, und was passiert mit dem Gummiband bzw. der Feder?



Definition:

Versuch mit der Schwefelbahn

Funktionsweise:

An der Fahrbahn liegt über einen $1\text{ M}\Omega$ -Widerstand die „normale“ Wechselspannung an, das heißt, 50mal in der Sekunde wechseln Plus- und Minus-Pol („die Frequenz der Wechselspannung beträgt 50Hz“). Der elektrische Widerstand ist übrigens so groß, dass nur Ströme in der Größe von 0,2 mA (Milliampere) fließen. Dies ist vollkommen ungefährlich!

Der Schwefel wird beim Verteilen mit dem Pinsel und durch ein Metallstück am Wagen durch Reibung negativ aufgeladen. Dieser Staub wird von dem Schleifkontakt am Wagen abwechselnd angezogen und abgestoßen und es entstehen gelbe und schwarze Streifen, die für je 0,01 s stehen (d.h. ein gelber Streifen = 0.01s und ein schwarzer Streifen = 0.01s).

Versuchsprogramm:

1. Macht euch zunächst mit der Apparatur vertraut. Verteilt eine dünne Schwefelschicht auf die schwarze Bahn unter dem Wagen. Schließt die Bahn an die Netzspannung und versucht „Staubfiguren“ (d.h. ein Streifenmuster) zu erzeugen, indem ihr den Wagen über die Bahn laufen lasst. Achtung: lasst den Wagen nicht ständig auf den Boden fallen!
2. Die Wagen laufen leider nicht reibungsfrei. Das erkennt man daran, dass der Abstand zwischen den Schwefelstreifen nicht konstant ist. Versucht durch die Holzklötzchen ein geeignetes Gefälle herzustellen, um diese Reibung zu kompensieren.
3. Messt nun die Geschwindigkeit des Wagens. Dazu muss man die Anzahl schwarzer und gelber Streifen zählen (nicht alle! Es reicht eine Strecke von vielleicht 10cm). Multipliziert man die Anzahl der Streifen mit 0,01s erhält man die Zeit, die der Wagen gebraucht hat, um dieses Muster zu erzeugen. Teilt man die ausgemessene Strecke (z.Bsp. 10cm) durch diese Zeit, so erhält man die Geschwindigkeit in cm/s. Tragt die Werte in die erste Zeile der Tabelle ein:

Versuch	Strecke	Anzahl der Streifen	Zeit	Geschwindigkeit
Zu Teil 3.				
2 Wagen vor Stoß				
2 Wagen nach Stoß				
3 Wagen vor Stoß				
3 Wagen nach Stoß				

4. Nun kommen wir zu den eigentlichen Versuchen: Zuerst untersucht ihr den Stoß eines Wagens mit einem anderen, der zuerst ruht. Ihr sollt die Kupplung verwenden, bei der die Wagen nach dem Stoß zusammenbleiben. Nach dem Stoß bewegen sich beide mit dem halben Impuls. Messt die Geschwindigkeit vor und nach dem Stoß!
5. Macht den selben Versuch wie in Teil 4, nur jetzt mit 2 zuvor ruhenden Wagen. Der Impuls des Wagens nach dem Stoß ist jetzt also $1/3$. Wie groß ist die Geschwindigkeit vor und nach dem Stoß?

Arbeitsblatt zur Impulsberechnung

Aus dem KPK Physikbuch, S. 47f

1. Aufgabe: Ein Lastwagen von 12t (=12000kg) fährt mit einer Geschwindigkeit von 90km/h. Welchen Impuls hat er?
4. Aufgabe: Eine Person beschleunigt einen gut gelagerten Wagen. Ein Kraftmesser zeigt den Impulsstrom an, der dabei in den Wagen fließt (15N). Die Person zieht 5 Sekunden. Wie groß ist die Endgeschwindigkeit? (Der Wagen wiegt 150kg)
5. Aufgabe: Eine Lok beschleunigt einen Zug. Durch die Kupplung zwischen Lok und Wagen fließt dabei ein Impulsstrom von 200kN. Wie groß ist der Impuls des Zuges (ohne) nach 30 Sekunden? Der Zug hat jetzt eine Geschwindigkeit von 54km/h. Wie viel wiegt der Zug?
6. Aufgabe Ein 42kg schwerer Wagen, der zunächst steht, wird beschleunigt, wobei ein Impulsstrom von 20N durch die Zugstange fließt. Wie viel Impuls ist in 3 Sekunden in den Wagen geflossen? Seine Geschwindigkeit beträgt zu diesem Zeitpunkt 1,2 m/s. Wie groß ist sein Impuls? Wo ist der fehlende Impuls geblieben?

Der freie Fall

Wir haben gesehen, dass der Impulsfluss durch das Schwerfeld der Erde umso stärker ist, je größer die Masse des Körpers ist:

$$F_{\text{Gravitation}} = m \cdot 9,81 \frac{N}{kg}$$

Der Proportionalitätsfaktor $g = 9,81N/kg$ wird auch „Ortsfaktor“ genannt. Meistens reicht es aus, mit $g \approx 10N/kg$ zu rechnen.

Aufgabe 1

Betrachte zwei Körper mit Massen $m_1 = 1kg$ und $m_2 = 5kg$. Beide lassen wir für 5 Sekunden fallen. Wie viel Impuls ist nun von der Erde in diese Körper geflossen?

Aufgabe 2

Der erste Körper hat nach 5 Sekunden also einen Impuls von $\approx 50Hy$, und der zweite einen Impuls von $\approx 250Hy$. Berechne nun, welche Geschwindigkeit die beiden Körper haben! Ist das Ergebnis verblüffend?

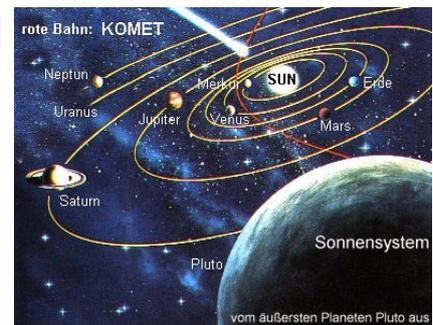
Der Ortsfaktor und Gedankenversuche an exotischen Orten

Wir haben gesehen, dass der Impulsfluss durch das Schwerfeld der Erde umso stärker ist, je größer die Masse des Körpers ist:

$$F_{\text{Gravitation}} = m \cdot g$$

Der Proportionalitätsfaktor g wird „Ortsfaktor“ genannt. Wie der Name schon andeutet, hängt sein Wert davon ab, an welchem Ort man sich befindet. Wir haben schon besprochen, dass die „Impulsstromstärke“ auch „Kraft“ genannt wird. Der Ausdruck $m \cdot g$ heißt deshalb auch „Gewichtskraft“.

Ort	g in N/kg
Mitteleuropa	9,81
Nord- oder Südpol	9,83
Äquator	9,78
Mondoberfläche	1,62
Marsoberfläche	3,8
Sonnenoberfläche	274
Oberfläche eines Neutronensterns	1000000000000

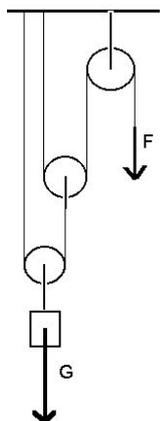


Aufgabe Gruppe A: Wie groß ist der Impulsstrom, der aus der Erde in deinen eigenen Körper fließt (d.h. welche Gewichtskraft wirkt auf deinen Körper)? Wie stark wäre dieser Impulsstrom auf dem Mond, der Sonne oder einem Neutronenstern?

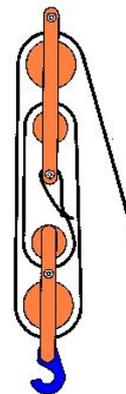
Aufgabe Gruppe B: Astronauten bestimmen bei einer Mondexpedition die Gewichtskraft eines Körpers mit einem Kraftmesser. Sie finden $F = 300N$. Welche Masse hat der Körper?

Aufgabe Gruppe C: Welche Geschwindigkeit bekommt ein Körper, wenn man sie für 1, 2 oder 3 Sekunden auf der Oberfläche a) der Erde, b) des Mondes oder c) der Sonne fallen lässt?

Ein etwas anderer Flaschenzug



Betrachte den links abgebildeten Flaschenzug. Er besteht (bis auf die Umlenkrolle rechts) nur aus losen Rollen (also solchen, die sich mitbewegen). Berechne für ein Gewicht von $G=100N$ die Zugkraft bei diesem Modell! Überlege dir, wie man ihn um zusätzliche Rolle erweitern kann und vergleiche das Ergebnis mit dem Modell, das wir im Unterricht behandelt haben (Abb. rechts). Was fällt dir auf?



Aufgaben zur Energie im Schwerfeld

Regel: Um einen Körper der Masse m auf der Erde um die Höhe h anzuheben, braucht man die Energie $E = m \cdot g \cdot h$. Diese Energie wird manchmal auch „Hubarbeit“ genannt. Umgekehrt wird diese Energie auch wieder frei, wenn ein Körper der Masse m die Höhe h herunterfällt. Gibt man die Masse in „kg“ und die Höhe in „Meter“ an, kommt die Energie in der Einheit „Joule“ heraus!

Aufgaben

a) Berg- oder Stauseen können zur Energiegewinnung genutzt werden, wenn deren Wasser zu einem Wasserkraftwerk geleitet wird. Wieviel Energie ist durch einen Stausee gespeichert, der 120m oberhalb des Wasserkraftwerkes liegt und 1 Millionen m^3 Wasser enthält? (Hinweis: Ein m^3 (sprich „Kubikmeter“) Wasser enthält 1000 Liter – hat also ziemlich genau die Masse von 1 Tonne.)

b) Die gespeicherte Energie kann genutzt werden, wenn man mit dem Wasser eine Turbine antreibt. Die Energie, die man dabei gewinnt, hängt natürlich davon ab, wieviel Wasser man durch das Rohr zur Turbine leitet! Durch ein Rohr kommen bei unserem Wasserkraftwerk 100 Liter pro Sekunde aus dem 130m hoch gelegenen Stausee. Welche Energie pro Sekunde kann damit aus dem Schwerfeld der Erde entnommen (und in Energie mit dem Träger „elektrischer Strom“ umgeladen) werden?

c) Bei Soft-Air-Pistolen wird die Energie angegeben, mit der die Munition aus der Mündung kommt. Es gibt 3 Hauptkategorien: weniger als 0,08 Joule (ab 3 Jahren frei), von 0,08 bis 0,5 Joule (unsichere Rechtslage) und zwischen 0,5 Joule bis 7,5 Joule (frei ab 18 Jahren). Die Softairmunition wiegt ca. 0,2g. Berechne, wie hoch man mit einer 0,08J und einer 0,5J Waffe schießen kann!

Zeitungsartikel zu „Energiespeicherung durch Verformung“

SC 15.1.2008

Schneller mit Prothesen

Paralympicsieger Oscar Pistorius darf nicht bei Olympia starten

Monte Carlo (sid/dpa) – Der unterschenkelamputierte Leichtathlet Oscar Pistorius aus Südafrika darf nicht bei den Olympischen Spielen in Peking (8. bis 24. August) starten. Diese Entscheidung gab der Weltverband IAAF bekannt. Er bezieht sich dabei auf ein 30-seitiges Gutachten der Sporthochschule Köln, das nach ausgiebiger Untersuchung des Sprinters im November zu dem Schluss gekommen war, dass sich der Paralympicsieger über 200 Meter durch seine hochtechnologischen Carbonprothesen einen zu großen Vorteil verschafft. Pistorius war ohne Wadenbeine zur Welt gekommen, mit elf Monaten wurden ihm die Beine knieabwärts amputiert. Laut IAAF verstößt er gegen die Wettkampffregel 144.2 (e), die technische Hilfsmittel wie Federn, Räder oder andere Geräte verbietet.

Oscar Pistorius hatte vor der Entscheidung angekündigt, notfalls vor den Obersten Sportgerichtshof Cas nach Lausanne zu gehen. „Ich fühle, es ist meine Verantwortung, für mich und alle behinderten Athleten die Entscheidung auf dem höchsten Level zu suchen, um bei Olympia und den Paralympics zugleich starten zu können“, sagte der 21 Jahre alte Student der Betriebswirtschaftslehre.

Der Kölner Biomechanik-Professor Gert-Peter Brüggemann meinte nach den Tests über Pistorius: „Er hat erhebliche Vorteile gegenüber von uns getesteten Vergleichssportlern ohne Prothesen. Ich hätte das nicht so deutlich erwartet.“ Die Studien am Institut für Biomechanik und Orthopädie hätten ergeben, dass der Südafrikaner bei gleicher Laufgeschwindigkeit 25 Prozent weniger Energie einsetzen muss als unversehrte Sprinter.

Pistorius hält die Behinderten-Weltrekorde über 100 (10,91 Sekunden), 200 (21,58) und 400 Meter (46,56). Er wollte in Peking in der 4x400-Meter-Staffel mitlaufen. Die IAAF hatte ihm im vorigen Jahr mit einer Sonderregelung den Start bei zwei Grand-Prix-Meetings „zu Studienzwecken“ erlaubt und auch die biomechanische Studie in Köln finanziert.



Zusammenhang von Energie und Impuls beim Gummiband

Wir haben gesehen, dass beim Spannen des Gummibandes Energie in ihm gespeichert wird! Auch hier ist der Energieträger der Impuls. Aber bekanntlich ist nicht jeder Impulstrom mit einem Energiestrom verbunden. Dies ist nur der Fall, wenn der Impulsleiter (z.Bsp. das Seil) sich bewegt.

Betrachte die folgende Abbildung. Zeichne Impuls- und Energiestrom ein. Überlege dir dazu, wo der Impulsleiter (d.h. das Gummiband und die Erde) sich bewegen.



Anhang B

Diskussion und Evaluation des KPK

Unsere Darstellung soll mit einem Blick auf die fachdidaktische Diskussion des KPK, der an ihm geübten Kritik und den Arbeiten zu seiner Evaluation abgerundet werden.

B.1 Der KPK in der fachdidaktischen Diskussion

Martin Bader, der am „Münchener Unterrichtskonzept“ zur Wärmelehre [7] mitgearbeitet hat, bemerkt in seiner Promotion [20]:

„Hermann und Falk wagen hier einen völlig neuen, von der Thermodynamik geprägten Zugang zur Physik. Es ist fraglich, ob die Anwendung der thermodynamischen Denkweise außerhalb dieses Spezialgebiets den Schülern das Lernen erleichtert. Der Ansatz von Hermann und Falk birgt zudem die Gefahr in sich, dass die Schüler/innen den Impuls, den Drehimpuls und die Entropie aufgrund ihrer Eigenschaft strömen zu können, als materiellen Stoff verstehen.“ (S. 25)

Mit Bezug auf die Wärmelehre kritisiert er explizit:

„Meines Erachtens haben sich Hermann und Falk zu weit von den gängigen Wegen der Physikdidaktik entfernt. Das von ihnen entworfene Unterrichtskonzept schafft neue Fehlvorstellungen, so zum Beispiel die Gleichstellung von Wärme und Entropie.“ (S. 32)

Im Oktober 1998 veranstaltete der „Deutscher Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts e.V.“ (MNU) ein „Symposium Karlsruher Physikurs – Pro und Contra“. Diese Debatte ist online dokumentiert [21] (die folgenden Zitate stammen aus diesem Online-Dokument und sind deshalb ohne Seitenangaben. Bei dem Dokument handelt es sich um ein Protokoll – es zitiert teilweise im Konjunktiv.). Zu Wort kamen Vertreter aus Schule, Wissenschaft und Bildungsbürokratie. Einige zentrale Beiträge dieser Diskussion sollen an dieser Stelle exemplarisch zitiert werden. So bemerkt Lochhaas (ehemaliger FL Physik, Darmstadt):

„Der KPK orientiere sich vor allem an der mathematischen Struktur, die die Heranziehung von Analogien erlaubt. Dabei bleiben andere wichtige Aspekte außen vor, etwa die Berücksichtigung des Aufbaus einer Sachstruktur, die die Vorerfahrungen der Schüler mit einbezieht.“

Lochhaas kritisiert ebenfalls, dass die historische Entwicklung der Physik im KPK vernachlässigt wird. In dieser Hinsicht sei der KPK lediglich „mitteilend gestaltet“. In eine ähnliche Richtung geht die Kritik von Beck (theoretischer Physiker, TH Darmstadt), der anmerkt, dass der KPK zu einer falschen Vorstellung von Physik verleiten kann. Immerhin handelt es sich nicht um eine axiomatische Wissenschaft. Stattdessen erweckt die geschlossene Darstellung des KPK den Eindruck, dass sich alle Zusammenhänge zwangsläufig ergeben. Friedrich Hermanns Erwiderung auf diese Kritik lautet:

„Aber schauen Sie doch erst einmal hin, was wir gefunden haben. Nicht auf das, was fehlt. Klar, dass all diese Aspekte fehlen. Wir haben ja keinen neuen Unterricht entwickelt.“

Offermann (Schulleiter aus Marbach) berichtet aus seinen langjährigen Erfahrungen mit einem KPK Schulversuch. Diese seien sehr positiv – vor allem existieren einfache Nahtstellen zwischen KPK und traditionellem Physikunterricht. Aus diesem Grund haben sich auch bei der zentralen Abiturprüfung in Baden-Württemberg keine Schwierigkeiten ergeben. Allerdings hebt er hervor: „Es soll um Gottes Willen nicht die Struktur unterrichtet werden. Dies wäre eine katastrophale Missinterpretation des KPK“.

Zu einer ebenfalls positiven Bewertung des KPK kommt Heiner Schwarze (Lehrerbildung in Schleswig-Holstein). Er hat an der Aufnahme von KPK Elementen in den Lehrplan mitgewirkt und betont, dass es nicht um eine Übernahme des gesamten Konzeptes geht. Einzelne Teile können landesspezifisch in das Curriculum integriert werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch eine Aussage von Friedrich Hermann:

„Der KPK ist der Versuch einer Neuordnung - ein Vorschlag für ein vereinheitlichtes Konzept. Das Konzept flächendeckend einzuführen wäre das Schlimmste, was man machen kann.“

In einer zusammenfassenden Äußerung stellt die Diskussionsleiterin Heber (StDn, Darmstadt) fest,

„(...)dass für den Bereich der Mechanik im KPK keine inhaltlichen Fehler gefunden wurden. In Bezug auf die Schulphysik findet sich von beiden Seiten eine gewisse Annäherung: Der KPK gibt viele Denkanstöße, in einigen heute besprochenen Punkten muss er sich jedoch der klassischen Physik annähern.“

In [22] schildert Herbert Kurt Schmidt die Erfahrungen seiner Schule (einem Gymnasium in Darmstadt) mit dem KPK. Er resümiert mit den Worten:

„Wer in dieser allgemeinen Dynamik sein physikalisches Weltbild findet, dem kann es mehr als eine Hilfe sein, der kann damit vielleicht Türen öffnen. Wer versucht, Teile in die Newtonsche Mechanik einzubauen, dem kann es zum Hindernis werden.“(S. 8)

In [23] übt Wolfhard Herzog heftige Kritik am KPK und behauptet sogar, Widersprüche im Karlsruher Kurs zu entdecken. Hinsichtlich der Mechanik weist er darauf hin, dass in der Ableitung $\frac{dp}{dt} = \dot{m}v + m\dot{v}$ nur der erste Term als „Strom“ gedeutet werden kann. Dieser Punkt ist aber durchaus unstrittig und war bereits Gegenstand des oben erwähnten MNU Symposiums. Der Strombegriff des KPK ist eben nicht durchgängig „Dichte \times Geschwindigkeit“ – die meisten Ströme des KPK sind natürlich nicht mit Stofftransporten zu

verwechseln und ihnen lassen sich auch nicht immer Geschwindigkeiten zuordnen. Schon für die elektrische Ladung wird man hier an die „Grenzen“ des Strom-Modells geführt; das selbe gilt für die Energie. In [21] schreibt Friedrich Hermann dazu: „Das Strommodell ist ein Modell, die Gültigkeit der Vorstellung hört irgendwann auf.“

Die weitere Kritik von Herzog bezieht sich auf die Einführung neuer Grundgrößen („Carnot“ und „Huygens“), die nach seiner Auffassung dem Prinzip der Denkökonomie („Ockham’s razor“) widerspricht. Ebenfalls kritisiert er, dass mit dem Konzept des Strömens von Entropie, Ladung, Impuls etc. einer „stofflichen“ Vorstellung all dieser Größen Vorschub geleistet wird, die historisch längst überwunden (und widerlegt) sei. Schließlich bezieht sich Herzog hinsichtlich des Lernerfolgs durch den KPK auf die Arbeiten von Starauschek. Im nächsten Abschnitt fassen wir die Ergebnisse dieser Arbeiten zur Evaluation des KPK kurz zusammen.

B.2 Die Evaluation des KPK durch Starauschek

Die bisher gründlichste empirische Untersuchung zur Wirkung des KPK wurde von Erich Starauschek [24] vorgelegt¹. Es handelt sich um eine Treatment-Kontrollgruppen-Untersuchung von 266 KPK Schülern und 286 traditionell unterrichteten Schülern (im folgenden kurz „T-Schüler“ genannt)². Diese Studie untersucht Schülervorstellungen zur Mechanik (8. Klasse), Wärmelehre (9. Klasse) und E-Lehre (10. Klasse). Das Evaluationskriterium war die „Veränderung von Alltagsvorstellungen“ und damit wenig abhängig von konkreten Unterrichtsinhalten. Zusätzlich wurden das Selbstkonzept der Schüler, die Beliebtheit des Faches Physik und die Schulbuchnutzung untersucht. Angesichts der Unwägbarkeiten einer solchen Untersuchung schätzt Starauschek seine Ergebnisse als „statistisch erhärtete Hypothesen“ ein [25](S. 9).

Aus KPK Sicht erscheinen die Resultate auf den ersten Blick enttäuschend. Die Ergebnisse der KPK Schüler sind nur in der Wärmelehre signifikant besser als bei T-Schülern. Sowohl in der Mechanik als auch in der E-Lehre ergibt sich kein Hinweis auf die stärkere Ausbildung von „mental Modellen“ bei KPK Schülern im Vergleich zu T-Schülern (d.h. die gesteigerte Fähigkeit, Aufgaben und Probleme zu lösen). Allerdings beobachtet man in *allen* Klassenstufen, dass KPK Schüler eine gesteigerte Fähigkeit haben, physikalische Sachverhalte *sprachlich* korrekt auszudrücken. Starauschek sieht in diesen „sprachlichen Repräsentationen“ eine Vorstufe zum Erwerb von mentalen Modellen [27] (S. 47). Eine Erklärung dieses Phänomens liegt ebenfalls nahe: Der KPK erlaubt eine vertikale Vernetzung der Themen, die ihren Niederschlag auch in der sprachlichen Redundanz findet. Hinzukommt, dass die Schüler das KPK Buch mehr schätzen (und benutzen) als T-Schüler [28]. Die KPK Lehrer geben an, dass der Redeanteil der Schüler im KPK Unterricht stärker ist³. In Bezug auf das Selbstkonzept der Schüler hat der KPK ebenfalls eine positive Wirkung. Während die männlichen KPK bzw. T-Schüler die selben Werte bezüglich ihres Selbstkonzepts aufweisen, haben nach dem KPK unterrichtete Mädchen signifikant bes-

¹In [25] werden die Ergebnisse zusammengefasst, [26] stellt eine Einzelveröffentlichung zur Wärmelehre dar, [27] befasst sich gesondert mit der E-Lehre und [28] betrachtet die Schulbuchnutzung.

²Im Jahr 1998 wurden in Baden-Württemberg 2080 Schüler nach dem KPK unterrichtet.

³Man beachte, dass viele KPK Lehrer auch Erfahrung mit traditionellem Physikunterricht haben.

sere Werte als die weiblichen T-Schüler [25] (S. 15). Hinsichtlich der Beliebtheit des Faches Physik ergeben sich wiederum keine signifikanten Effekte.

Bei all dem darf jedoch nicht vergessen werden, dass eine erfolgreiche Unterrichtsentwicklung Sachstruktur *und* Methoden gemeinsam in den Blick nehmen muss. Starauschek kommt in seinen Arbeiten zur Evaluation des KPK (die im Anhang B.2 kurz zusammengefasst werden) zu dem Fazit, dass der KPK als „gelungenes Sprachspiel“ [25] (S. 17f) gedeutet werden kann. Dies ist nicht despektierlich gemeint, sondern als wichtige Vorstufe zu „echtem“ Verständnis. Zudem drückt es aus, dass die Schüler erkennen, „dass es etwas zu verstehen gibt und das ein Verstehen gelingen kann.“ [25] (S. 18). Diese Botschaft wird im traditionellen Physikunterricht nicht immer vermittelt. Starauschek sieht seine Resultate als Hinweis darauf, dass die einseitige Betonung der Sachstruktur durch den KPK nicht ausreicht. Die lerntheoretische Vorstellung, die dem KPK zugrunde liegt, persifliert er mit den Worten [25] (S. 7):

„Mit Hilfe einer redundanten Sachstruktur soll es gelingen, in kürzerer Zeit mehr „Inhalt“ in die Köpfe der Schüler zu schaffen.“

Anstatt dieser „Transport-Vorstellung“ von Lernen empfiehlt er [27] (S. 47) eine Einbettung des KPK in konstruktivistische Lehr-Lern-Umgebungen oder sinnstiftende Kontexte (siehe etwa Ari Widodo und Reinders Duit [29]).

Literaturverzeichnis

- [1] Hermann, Friedrich (Hrsg.), „Das Energiebuch“, online unter (Juni, 2007):
http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/energiebuch/Energiebuch_komplett.pdf
- [2] Hermann, F. (Hrsg.), *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe I*, Karlsruhe 1995,
Schülerband 1 (Energie, Strömungen, Mechanik, Wärmelehre), ISBN: 3-7614-2517-1
Schülerband 2 (Daten, Elektrizitätslehre, Optik), ISBN: 3-7614-2518-X
Schülerband 3 (physikalische Chemie, Wellen, Photonen, Atome, Festkörper, Kerne), ISBN: 3-7614-2519-8
Bezug über AULIS Verlag Deubner & Co KG.
- [3] Hermann, F. (Hrsg.), *Der Karlsruher Physikkurs – Unterrichtshilfen*, 3. Auflage Karlsruher 1995, ISBN: 3-7614-2526-0. Bezug über AULIS Verlag Deubner & Co KG.
- [4] Hermann, F. (Hrsg.), *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe II*, Karlsruhe 1995,
Band 1: Elektrodynamik, ISBN: 3-7614-2428-0
Unterrichtshilfen zur Elektrodynamik, ISBN: 3-7614-2429-9
Band 2: Thermodynamik, ISBN: 3-7614-2603-8
Unterrichtshilfen zur Thermodynamik, ISBN: 3-7614-2604-6
Band 3: Schwingungen und Wellen; Daten, ISBN: 3-7614-2515-5
Unterrichtshilfen zu Schwingungen und Wellen; Daten, 3-7614-2516-3
Bezug über AULIS Verlag Deubner & Co KG.
- [5] Hauptmann, H., *Der Karlsruher Physikkurs für die Sekundarstufe II - Unterrichtskonzepte zur Rotationsmechanik, Elektrodynamik, Schwingungslehre und Physik der Sonne*, Promotion, Karlsruhe Juli 2001.
- [6] Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung (Hrsg.), *Richtlinien und Lehrpläne für das Fach Physik in der gymnasialen Oberstufe*, Ritterbach Verlag, Frechen, 1. Auflage 1999.
- [7] Bader, M. und Wiesner, H., *Das „Münchener Unterrichtskonzept“ zur Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre*, Physik in der Schule 37 (1999) S. 363. Skriptum von Martin Bader online verfügbar über:
http://www.physik.uni-regensburg.de/didaktik/Schulphysik/Mechanik/MUK_Energie_Waermel.pdf

- [8] *Impulse Physik 1*, Klett, Stuttgart 1993.
- [9] Zwick, M. M. und Renn, O., *Die Attraktivität von technischen und ingenieurwissenschaftlichen Fächern bei der Studien- und Berufswahl junger Frauen und Männer*, Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart 2000.
- [10] Themenheft: *Fehlvorstellungen in der Mechanik*, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 7/51 (2002).
- [11] Falk, G., *Theoretische Physik auf der Grundlage einer allgemeinen Dynamik*, Band I und II, Springer, Heidelberg 1968.
- [12] Hermann, F., *Der Karlsruher Physikkurs*, Praxis der Naturwissenschaften 5, 41 (1995).
- [13] Hermann, F., *Atlanten der Physik (15) - Der Impuls als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit*, Physik in der Schule 34, 122 (1996).
- [14] Gerthsen Ch. und Vogel, H., *Physik*, Springer Verlag Berlin, 17. Auflage (1993).
- [15] Hermann, F. *Atlanten der Physik (14) - Das Feld als Raumbereich mit Eigenschaften*, Phys. in der Schule 34, 82 (1996).
- [16] Pohlig, M. *persönliche Mitteilung*, 9. 10. 2007.
- [17] Wiesner, H. und Hopf, M., *Die Fliege in der Flasche – die didaktische Relevanz der Überlegungen von Ernst Mach und anderen zu Gedankenexperimenten*, Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 5/56 (2007).
- [18] Kleine Anfrage bei Leonardo (Wissenschaftsmagazin auf WDR5) vom 20.9.2007. Manuskript und podcast unter:
http://www.wdr5.de/service/service_kleine_anfrage/971270.phtml
Kopfball Sendung (WRD Fernsehen) vom 20.5.2007. Podcast unter:
<http://www.kopfball.de/arcflm.phtml?kbsec=arcflm&selFilm=730&dr=datum>
- [19] Siehe:
<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>
- [20] Bader, M., *Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges „Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre“*, Dissertation LMU München, 2001.
- [21] Diskusson auf dem „MNU-Symposium Karlsruher Physikkurs“ vom 12. Oktober 1998, online dokumentiert unter (Juni, 2007)
http://www.mnu.de/show_page.php?id=77

- [22] Schmidt, H. K., *Einführung des Energiebegriffs mit dem Karlsruher Physik Kurs - Hilfe oder Hindernis?*, Vortrag auf der 31. Hessischen Landestagung des Vereins zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU) am 28. 8. 2002 in Darmstadt. Online unter (September 2007):
<http://www.tu-darmstadt.de/schulen/lgg/schule/vortrag.pdf>
- [23] Herzog, W. , *Der Karlsruher Physikkurs – Anspruch und Widersprüche eines didaktischen Konzepts*, MNU Jahrgang 60 (2007) Heft 8, S. 500.
- [24] Starauschek, E., *Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer Evaluationsstudie*, Logos Verlag, Berlin 2002.
- [25] Starauschek, E., *Ergebnisse einer Evaluationsstudie zum Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs*, Zeitschrift für die Didaktik der Naturwissenschaften, Jg.8 (2002) S.7-21. Online verfügbar unter:
<http://www.ipn.uni-kiel.de/zfdn/jg8a.htm>
- [26] Starauschek, E., *Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs - Ergebnisse einer empirischen Studie*, Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, PhyDid 1/1 (2002) S.12-18. Online verfügbar über:
<http://www.phydid.de/>
- [27] Starauschek, E., *Elektrizitätslehre nach dem Karlsruher Physikkurs - Ergebnisse einer empirischen Studie*, Physik und Didaktik in Schule und Hochschule, PhyDid 1/2 (2003) S.39-47. Online verfügbar über:
<http://www.phydid.de/>
- [28] Starauschek, E., *Ergebnisse einer Schülerbefragung über Physikschulbücher*, Zeitschrift für die Didaktik der Naturwissenschaften, Jg.9 (2003) S.135-146. Online verfügbar über:
<http://www.ipn.uni-kiel.de/zfdn/jg9a.htm>
- [29] Widodo, A. und Duit, R., *Konstruktivistische Sichtweise vom Lehren und Lernen und die Praxis des Physikunterrichts*, Zeitschrift für die Didaktik der Naturwissenschaften, Jg.10 (2004) S.233-255. Online verfügbar über:
<http://www.ipn.uni-kiel.de/zfdn/jg10a.htm>

Erklärungen

Ich versichere, dass ich die Arbeit eigenständig verfasst, keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt und die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen sind, in jedem einzelnen Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe. Das Gleiche gilt auch für beigegebene Zeichnungen, Kartenskizzen und Darstellungen.

Ich bin damit einverstanden, dass diese Hausarbeit nach Abschluss meiner Zweiten Staatsprüfung wissenschaftlich und pädagogisch interessierten Personen oder Institutionen zur Einsichtnahme zur Verfügung gestellt wird und dass zu diesem Zweck Ablichtungen dieser Hausarbeit hergestellt werden, sofern diese keine Korrektur- oder Bewertungsvermerke enthalten.

Wuppertal, den 23. 2. 2008