

**Untersuchung zum konzeptionellen Verständnis des Lehrstoffes
bei Studierenden im ingenieurwissenschaftlichen Grundstudium
an der Technischen Universität Hamburg-Harburg**

Christian H. Kautz

Department of Physics
Syracuse University

kautz@phy.syr.edu

Januar 2001

1.	Einführung	5
1.1	Ziele und Methoden der Studie	5
1.2	Aufbau des vorliegenden Berichtes	6
2.	Beschreibung der Aufgaben und Ergebnisse in den drei Fächern	8
2.1	Mechanik	8
2.1.1	Statik des Starren Körpers	8
2.1.1.1	Baseball-Schläger-Aufgabe	8
2.1.2	Fluid-Statik	10
2.1.2.1	U-Rohr mit variierendem Durchmesser	11
2.1.2.2	N-Rohr	12
2.1.2.3	Drei-Würfel-Aufgabe	14
2.1.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Fluid-Statik	16
2.1.3	Kinematik in Zwei Dimensionen	16
2.1.3.1	Beschleunigungsvektoren für Fahrzeug auf gekrümmter Bahn	17
2.1.3.2	Beschleunigungsvektoren beim Fadenpendel	18
2.1.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Kinematik	20
2.2	Elektrotechnik	20
2.2.1	Strom, Spannung und Widerstand im Gleichstromkreis	20
2.2.1.1	Die Fünf-Lampen-Aufgabe	20
2.2.1.2	Die Vier-Lampen-Aufgabe	22
2.2.2	Stromkreis mit kapazitiven und induktiven Bauelementen	23
2.2.2.1	Strom und Spannung beim Kondensator	23
2.2.2.2	Strom und Spannung bei der Spule	25
2.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Elektrotechnik	26
2.3	Thermodynamik	27
2.3.1	Gasgrößen, Ideales Gasgesetz und Avogadro'sches Gesetz	27
2.3.1.1	Isobare Ausdehnung eines idealen Gases	27
2.3.1.2	Avogadro'sches Gesetz	28
2.3.2	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	29
2.3.2.1	Prozesse mit oder ohne Verrichten von Arbeit	29
2.3.2.2	Prozesse mit oder ohne Austausch von Wärme	30
2.3.3	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik, Wirkungsgrade	31
2.3.3.1	Zweiter Hauptsatz	31
2.3.3.2	Wirkungsgrade	33
2.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Thermodynamik	34

3.	Untersuchung im auslandsorientierten Studiengang GES.....	35
3.1	Aufgaben und Erbebnisse im Studiengang GES.....	35
3.1.1	Mechanik	35
3.1.1.1	Baseballschläger-Aufgabe	35
3.1.1.2	U-Rohr.....	36
3.1.1.3	Drei-Würfel-Aufgabe	36
3.1.2	Elektrotechnik	36
3.1.2.1	Fünf-Lampen-Aufgabe.....	36
3.2	Zum Vergleich der Studiengänge AIW und GES	36
4.	Folgerungen aus den empirischen Ergebnissen	38
5.	Schlussbetrachtungen	43
5.1	Empfehlungen für die betrachteten Lehrveranstaltungen.....	43
5.1.1	Neue Lehrformen in Übungen (Workshops).....	43
5.1.2	Interaktiver Vorlesungsbetrieb.....	44
5.2	Vorschläge zur Fortsetzung des Projektes	45
5.2.1	Untersuchungen zu weiteren Themen der Ingenieurwissenschaften	45
5.2.2	Vergleich des Eingangswissens	46
5.2.3	Entwicklung von Lehrmaterialien.....	46
5.3	Danksagung	46

1. EINFÜHRUNG

Mit der Einrichtung auslandsorientierter Studiengänge (AOS) im Jahr 1997 hat die Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH) als eine der ersten Hochschulen Deutschlands dem internationalen Wettbewerb um ausländische Studienbewerber verstärkt Rechnung getragen. Diesem Schritt sind weitere Hochschulen in Deutschland innerhalb weniger Jahre gefolgt. Diese und andere Veränderungen im Studienangebot der deutschen Hochschulen (z. B. die Vergabe von Bachelor- und Master-Abschlüssen) haben die bereits begonnene Diskussion um eine Annäherung des deutschen Hochschulsystems an das amerikanische weiter verstärkt. Zudem hat im Zuge dieser Entwicklung auch das Thema „Evaluation der Lehre“ noch weiter an Bedeutung gewonnen.

Die beiden genannten Themenbereiche sind zwar inhaltlich verwandt, werden aber unter sehr verschiedenen Gesichtspunkten diskutiert: Während sich die Diskussion um das deutsche Hochschulsystem überwiegend auf die strukturellen Rahmenbedingungen des Studiums konzentriert, werden bei der Evaluation häufig subjektive Bewertungen durch die Studierenden in den Vordergrund gestellt. Beide Ansätze lassen meist außer Acht, dass der Lernerfolg auch in hohem Maße von intuitiven Vorstellungen bestimmt wird. Untersuchungen an mehreren Universitäten in den Vereinigten Staaten und in Europa haben gezeigt, dass diese Vorstellungen durch traditionelle Lehrmethoden oft nur geringfügig verändert werden.

Die vorliegende Studie soll die Diskussion beider Themenbereiche dadurch bereichern, dass sie eine empirische Methode vorstellt, die zur Messung des Lernerfolgs beitragen kann. Exemplarisch werden hier inhaltliche Verständnisschwierigkeiten in drei Themengebieten bei Studierenden der Ingenieurwissenschaften im Detail untersucht.

Im Folgenden sollen zuerst die Ziele und Methoden dieser Untersuchung genauer beschrieben werden. Anschließend wird ein Überblick über den Aufbau dieses Berichtes gegeben.

1.1 ZIELE UND METHODEN DER STUDIE

Ziel der vorliegenden Studie war es, Erkenntnisse über das konzeptionelle Verständnis des Lehrstoffes bei Studierenden im ingenieurwissenschaftlichen Grundstudium zu gewinnen. Zu diesem Zweck sollten die Methoden des *Science Education Research* auf für die Ingenieurwissenschaften relevante Fächer ausgedehnt werden. Dabei sollte auch ein erster Vergleich zwischen Studierenden an der TUHH und an mehreren amerikanischen Hochschulen angestellt werden, sowie ein Vergleich zwischen den Teilnehmern der deutschsprachigen und englischsprachigen Vorlesungen an der TUHH.

Als Gegenstand der Untersuchung wurden drei deutschsprachige und zwei englischsprachige Vorlesungen ausgewählt: Mechanik für Ingenieure II, Grundlagen der Elektrotechnik II und Thermodynamik I, sowie Engineering Mechanics II und Electrical Engineering Fundamentals II. Die Auswahl dieser Vorlesungen lag nahe, da auf den Ergebnissen früherer Untersuchungen aufgebaut und ein Vergleich zwischen deutsch- und englischsprachigen Veranstaltungen an der TUHH ermöglicht werden sollte.

Ein wichtiges Ergebnis der oben erwähnten Untersuchungen ist, dass die Fähigkeit, quantitative Aufgaben zu lösen, in vielen Fällen *nicht* gleichbedeutend mit einem qualitativen Verständnis des Lehrstoffes ist. Studierende, die in der Abschlussklausur einer einsemestrigen Vorlesung zur Mechanik oder Elektrizitätslehre anspruchsvolle quantitative Aufgaben lösen konnten, zeigten oft in Interviews erhebliche Schwierigkeiten mit einfachen qualitativen Fragestellungen.¹ Durch die Entwicklung und den Einsatz eines standardisierten Mechanik-Tests mit rein qualitativen Fragen erfuhr diese Einsicht in den neunziger Jahren zunehmend weitere Verbreitung unter den Lehrkräften an High-Schools, Colleges und Universitäten in den Vereinigten Staaten.²

Zudem zeigten Daten von vergleichbaren Aufgaben, die an verschiedenen Universitäten gestellt wurden, dass die Häufigkeit vieler Verständnisschwierigkeiten von den Details der Lehrveranstaltungen (z. B. mit oder ohne Laborpraktikum) sowie der Person des Dozenten weitgehend unabhängig sind.

Aufgrund dieses Ergebnisses erschien es erstrebenswert, bei Studierenden an der TUHH das Verständnis der ingenieurwissenschaftlichen Grundlagen zu untersuchen. Durch die Verwendung von überwiegend qualitativen Fragen sollte erreicht werden, dass die Studierenden bei der Beantwortung der Aufgaben auf ihr konzeptionelles Verständnis zurückgreifen, anstatt einen auswendig gelernten Lösungsalgorithmus zu verwenden.

1.2 AUFBAU DES VORLIEGENDEN BERICHTES

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Testaufgaben beschrieben und die jeweiligen Antworten der Studierenden analysiert. Kapitel 3 widmet sich kurz dem Vergleich der Lehrveranstaltungen in den Studiengängen *Allgemeine Ingenieurwissenschaften* und *General Engineering Science*. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse dieser Untersuchung verallgemeinert und im Zusammenhang mit bisherigen Ergebnissen der Fachdidaktik in den Naturwissenschaften diskutiert. Abschließend (in Kapitel 5) werden Folgerungen für die betrachteten Lehrveranstaltungen gezogen und Vorschläge für eine mögliche Fortsetzung der Untersuchung präsentiert.

Die nachstehende Tabelle gibt eine Übersicht über die in dieser Untersuchung erfassten Themen innerhalb der drei Fächer und ihrer Teilgebiete.

<p>Mechanik für Ingenieure:</p> <ul style="list-style-type: none">• Statik<ul style="list-style-type: none">– Gleichgewicht des starren Körpers• Fluid-Statik<ul style="list-style-type: none">– Hydrostatisches Gleichgewicht– Druck in inkompressiblen Fluiden– Auftriebskraft• Kinematik in zwei Dimensionen<ul style="list-style-type: none">– Beschleunigungsvektoren bei konstantem Geschwindigkeitsbetrag– Beschleunigungsvektoren bei veränderlichem Geschwindigkeitsbetrag <p>Elektrotechnik:</p> <ul style="list-style-type: none">• Gleichstromkreise<ul style="list-style-type: none">– Strom, Spannung und Widerstand• Kapazitive und induktive Bauelemente<ul style="list-style-type: none">– Kondensatoren– Spulen <p>Thermodynamik</p> <ul style="list-style-type: none">• Ideales Gas<ul style="list-style-type: none">– Gasgrößen (Druck, Volumen, Molzahl, Temperatur)– Avogadro'sches Gesetz• Erster Hauptsatz der Thermodynamik• Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik
--

Tabelle 1: Auflistung der in dieser Untersuchung erfassten Themen aus den drei Grundvorlesungen *Mechanik*, *Elektrotechnik* und *Thermodynamik*.

2. BESCHREIBUNG DER AUFGABEN UND ERGEBNISSE IN DEN DREI FÄCHERN

2.1 MECHANIK

In der Vorlesung *Mechanik für Ingenieure II* wurden in den Teilgebieten Statik, Fluid-Statik und Kinematik insgesamt 6 Aufgaben gestellt, die zu drei Kurztests (Quizzes) zusammengefasst waren. Quiz 1 beinhaltete zwei Aufgaben zur Fluid-Statik (Hydrostatisches Gleichgewicht, Druck); Quiz 2 eine Aufgabe zur Fluid-Statik (Auftriebskraft) sowie eine Aufgabe zur Statik (Gleichgewicht des starren Körpers); Quiz 3 zwei Aufgaben zur Kinematik (Beschleunigungsvektoren bei konstantem und veränderlichem Geschwindigkeitsbetrag). Die Diskussion in den folgenden Abschnitten folgt dem Aufbau der Vorlesung und gibt nicht die chronologische Abfolge der einzelnen Aufgaben wieder.

2.1.1 STATIK DES STARREN KÖRPERS

Die Statik des Starren Körpers war bereits Gegenstand der Vorlesung *Mechanik für Ingenieure I*. Dennoch wurde in der *Mechanik für Ingenieure II* eine Aufgabe zu diesem Teilgebiet gestellt. Ziel dieser Aufgabe war es, das Verständnis der Gleichheit der Momente im Gleichgewichtszustand in einem Fall zu überprüfen, in dem die Massen auf beiden Seiten des Massenmittelpunktes nicht gleich sind. Dieser Fall erschien unter anderem auch deshalb interessant, da in einer der Aufgaben zur Fluid-Statik (siehe Abschnitt 2.1.2.1) Schwierigkeiten mit der Gleichgewichtsbedingung im hydrostatischen Fall beobachtet wurden. Ein möglicher Zusammenhang zwischen den Antworten der Studierenden auf die beiden Fragestellungen wird in Kapitel 4 kurz diskutiert.

2.1.1.1 Baseball-Schläger-Aufgabe

Die Aufgabe zur Statik des starren Körpers bezog sich auf die Skizze eines Baseball-Schlägers, der von einem Studenten auf einem Finger balanciert wird. Der auf der Längsachse des Schlägers liegende Punkt direkt über dem Finger ist mit P bezeichnet. In Teil A dieser Aufgabe sollten die Studierenden angeben, ob der Massenmittelpunkt des Schlägers links von Punkt P , rechts von Punkt P oder am Punkt P liegt. In Teilaufgabe B sollte angenommen werden, dass der Schläger am Punkt P vertikal durchschnitten würde. Die beiden Teile des Schlägers sollten bezüglich ihrer Masse verglichen werden.

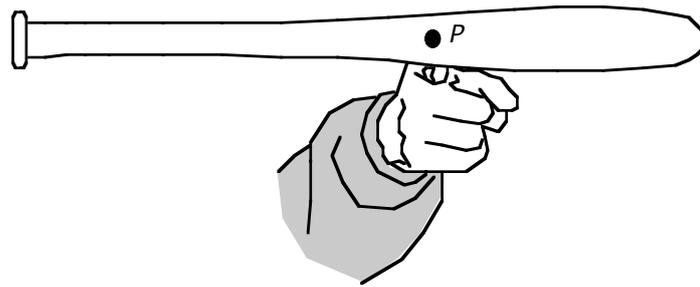


Abbildung 1: Skizze zu Teil A der Baseball-Schläger-Aufgabe.

Da der Schläger im Gleichgewicht ist, muss die Summe der Drehmomente gleich Null sein. Da im homogenen Feld Massenmittelpunkt (MMP) und Schwerpunkt identisch sind, kann außerdem die gesamte Gewichtskraft als im MMP angreifend angenommen werden. Deshalb muss der MMP auf einer senkrechten Linie durch den Angriffspunkt der Normalkraft (also den Finger) liegen. Aus Symmetriegründen muss dies genau der Punkt P sein. Stellt man sich die Massenmittelpunkte der durch Zerschneiden entstandenen Teile getrennt vor, so liegt der MMP des linken Teils weiter vom MMP des gesamten Körpers entfernt als der MMP des rechten Teils. Um gleiche Momente zu bewirken, muss also die Masse des linken Teils geringer sein.

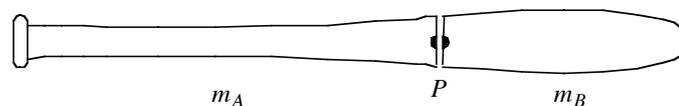


Abbildung 2: Skizze zu Teil B der Baseball-Schläger-Aufgabe.

Ergebnisse: Von 163 abgegebenen Aufgabenblättern trugen 138 (85%) eine richtige Antwort zur Teilaufgabe A. Die häufigste unrichtige Antwort war, dass der MMP rechts vom Punkt P liegt (14mal; 9%). Die häufigste Begründung für diese Antwort („linke Seite ist leichter“) ist vor allem hinsichtlich der Ergebnisse von Teilaufgabe B interessant (siehe unten).

Die Ergebnisse in den einzelnen Studiengängen unterschieden sich nur geringfügig. Die Studierenden im Studiengang AIW schnitten etwas besser ab (94%) als alle anderen Gruppen.

Von den Studierenden, die Teilaufgabe A richtig beantworteten, erkannten 45 (also 33% von 138), dass der linke Teil des Schlägers eine geringere Masse haben muss. Fast alle anderen (64%) gaben an, dass die beiden Teile gleich schwer seien. Als Begründung wurde am häufigsten angegeben, dass Punkt P der Massenmittelpunkt sei. (Da nicht ausdrücklich darum gebeten wurde, gaben einige Studenten keine Begründung an.) Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass viele Studierende intuitiv die Gleichheit der Massen auf beiden Seiten als Definition des Massenmittelpunkts ansehen.³

Diese Interpretation des Begriffs „Massenmittelpunkt“ tritt auch in der Mehrzahl der unrichtigen Antworten zur Teilaufgabe A zutage. Einige der Studierenden erkannten, dass im Gleichgewicht die Drehmomente gleich sein müssen, und dass deshalb der linke Teil des Schlägers eine geringere Masse haben muss. Entsprechend ihrer unrichtigen Definition des Massenmittelpunktes zogen sie jedoch den falschen Schluß, dass der MMP rechts von Punkt P liegen muss.

Berücksichtigt man die Antworten zu beiden Teilaufgaben gemeinsam, so erzielten 45 Studenten (28% aller 163 Teilnehmer) ein vollständig richtiges Ergebnis. Die Ergebnisse nach Studiengängen waren wie folgt: AIW und HSB jeweils etwa 35%, MB etwa 30%, und BU etwa 15%.

Die Ergebnisse von Aufgaben 2.A und 2.B sind in Tabelle 2 zusammengefaßt wobei Vergleichsdaten aus den USA mit angegeben sind.⁴

	TU Harburg Mech. f. Ing. II (nach Vorl. u. Üb.) (N = 163)	U. of Wash. Intro. Physics (nach Vorl.) (N = 240)	U. of Wash. Honors Physics (nach Vorl.) (N = 21)
Massenmittelpunkt in P (Teilaufgabe A richtig)	85%	95%	95%
davon $m_A < m_B$ (korrekt)	30%	15%	30%
davon $m_A = m_B$	55%	80%	65%

Tabelle 2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Aufgabe zum Massenmittelpunkt. (Alle Prozentangaben in dieser und in den folgenden Tabellen sind auf 5% gerundet.)

2.1.2 FLUID-STATIK

In der Vorlesung *Mechanik für Ingenieure II* wurden drei Aufgaben zur Fluid-Statik gestellt. In den ersten beiden Aufgaben ging es um das Verständnis des hydrostatischen Gleichgewichtes und des hydrostatischen Drucks als Ortsfunktion in schweren Flüssigkeiten; in der dritten Aufgabe um das Verständnis der Auftriebskraft als einer von der Masse und (in inkompressiblen Fluiden) von der Position des eingetauchten Körpers unabhängigen Größe.

2.1.2.1 U-Rohr mit variierendem Durchmesser

Gegenstand der ersten Aufgabe war ein teilweise mit Wasser gefülltes U-Rohr, dessen rechter Schenkel einen größeren Durchmesser hatte als der linke Schenkel. Die Füllhöhe im linken Schenkel war eingezeichnet; die im rechten Schenkel sollte von den Studenten eingetragen werden. Ziel der Aufgabe war es, festzustellen in welchem Maße die Studierenden den hydrostatischen Druck als eine Ortsfunktion wahrnehmen, die nicht unmittelbar durch das Gewicht der auftretenden Flüssigkeitsmengen bestimmt wird.

Die richtige Antwort (gleiche Füllhöhen, wenn von Kapillareffekten abgesehen wird) ist im Experiment mit sogenannten kommunizierenden Röhren direkt zu beobachten und kann wie folgt theoretisch begründet werden. Bei einer homogenen schweren Flüssigkeit im Gleichgewicht ist der hydrostatische Druck nur eine Funktion der senkrechten Koordinate. In gleicher Tiefe herrscht deshalb in beiden Schenkeln der gleiche Druck. Da über den Flüssigkeitssäulen auf beiden Seiten der gleiche Umgebungsdruck herrscht, müssen die beiden Füllhöhen ebenfalls gleich sein.

Ergebnisse: Von 168 ausgefüllten Aufgabenblättern enthielten 127 (76%) eine richtige Antwort zur ersten Aufgabe. Mit einer Ausnahme zeichneten alle anderen Studierende (23%) im rechten Schenkel (mit größerem Durchmesser) eine niedrigere Füllhöhe ein. Als Begründung für die geringere Höhe wurde oft ‚gleiches Gewicht‘ oder ‚gleiches Volumen‘ angegeben. In einigen Fällen gaben die Studierenden auch ‚gleichen Druck‘ an, ohne jedoch in der Regel anzudeuten, an welchen Punkten der Druck gleich sein müsste. Ähnlich wie bei der oben besprochenen Aufgabe zur Statik des starren Körpers scheinen einige Studenten davon auszugehen, dass Gleichgewicht immer durch gleiche Massen auf beiden Seiten der Versuchsanordnung erreicht wird.

Bei dieser Aufgabe waren die Unterschiede zwischen den Ergebnissen in den verschiedenen Studiengängen gering. Nur die ‚HSB‘-Studenten (Hochschulübergreifender Studiengang Schiffbau) erzielten ein deutlich besseres Ergebnis als die anderen Gruppen (100% von 14 Antworten korrekt).

Die Ergebnisse der ersten Aufgabe sind in Tabelle 3 noch einmal dargestellt (alle Angaben auf 5% gerundet), wobei Vergleichsdaten aus den Vereinigten Staaten mit angegeben sind.⁵ Diese Vergleichsdaten wurden in verschiedenen Lehrveranstaltungen und unter unterschiedlichen Bedingungen ermittelt. Bei den Ergebnissen von der U. of Washington handelt es sich zum einen um eine Vorlesung zur Wärmelehre im zweiten Studienjahr, zum anderen um eine

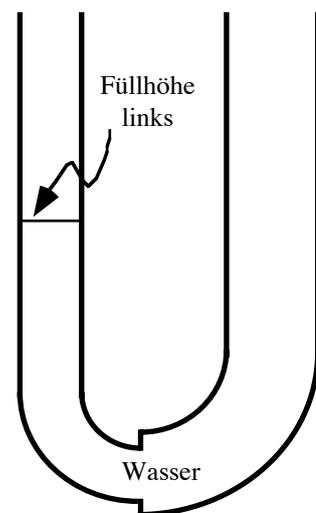


Abbildung 3: Skizze zur U-Rohr-Aufgabe

Einführungsvorlesung (*algebra-based introductory physics*), die überwiegend von angehenden Medizinstudenten (*pre-med students*) besucht wird. In beiden Fällen wurde die Aufgabe gestellt, nachdem der entsprechende Stoff in der Vorlesung behandelt worden war. Bei den Daten von Harvard University und Syracuse University handelt es sich um Ergebnisse *vor* Behandlung des Stoffes in der Vorlesung. In den letzteren beiden Fällen waren die entsprechenden Abschnitte im Lehrbuch aber bereits zur Vorbereitung aufgegeben.

	TU Harburg Mechanik (nach Vorlesung) ($N = 168$)	U. of Wash. Thermal Physics (nach Vorl.) ($N = 98$)	U. of Wash. Intro. Physics (nach Vorl.) ($N = 236$)	Harvard U. Intro. Physics (vor Vorl.) ($N = 138$)	Syracuse U. Intro. Physics (vor Vorl.) ($N = 174$)
Richtige Antworten (Gleiche Füllhöhe)	75%	70%	45%	30%	30%
Füllhöhe rechts geringer	25%	20%	50%	70%	55%
Sonstige	<1%	10%	10%	<5%	15%

Tabelle 3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Aufgabe zum hydrostatischen Gleichgewicht mit Vergleichsdaten. (Die Kategorie „Sonstige“ schließt auch unklare und unvollständige Antworten mit ein.)

2.1.2.2 *N-Rohr*

In der zweiten Aufgabe zur Fluid-Statik sollten vier Punkte in einem N-förmigen Gefäß nach ihrem Druck sortiert werden. Drei der Punkte (X , Y und Z) befanden sich auf gleicher Höhe in verschiedenen Schenkeln. Punkt G (im oben geschlossenen, senkrechten Schenkel) lag höher als die Füllhöhe im offenen Rohr und damit auch höher als die anderen Punkte. (In der folgenden Diskussion wird der Buchstabe „ G “ jeweils als Kürzel für den Druck P_G am Punkt G verwendet. Entsprechendes gilt für X , Y und Z .)

Ergebnisse: Eine richtige Reihenfolge ($G < X = Y = Z$) wurde von 65 Studierenden (39%) angegeben. Zusätzlich noch 6 Studierende (4%) hatten ein umgekehrtes Ergebnis ($G > X = Y = Z$), was möglicherweise auf Flüchtigkeitsfehler zurückzuführen ist. Die häufigste unrichtige Antwort ($X > G > Z$, mit Y an

verschiedener Stelle) kam 63 mal vor (38%). Viele der hierfür angegebenen Begründungen verwiesen auf die Höhe bzw. das Gewicht der Flüssigkeitssäule direkt über dem jeweiligen Punkt. Eine andere Begründung (speziell für die Antwort $X > G > Y > Z$) schien von einem Druckanstieg entlang des Rohres unabhängig von der Tiefe auszugehen (d. h. größerer Druck bei größerer „Entfernung“ von der Flüssigkeitsoberfläche).

Weitere 16 Studierende (10%) gaben an, dass der Druck am Punkt Z größer ist als an allen anderen Punkten. Dabei wurde mehrmals auf das Wirken des Luftdrucks speziell am Punkt Z verwiesen.

Beide Vorstellungen, die zu der unrichtigen Rangfolge " $X > G > Z$ " führten, wurden in ähnlich großer Anzahl auch bei Studierenden in den Vereinigten Staaten festgestellt. Zudem wurde ein möglicher Zusammenhang zwischen der unrichtigen Interpretation von " $P = \rho gh$ " als "Druck gleich Gewicht pro Fläche" und Schwierigkeiten bei der Klassifizierung von Kräften bei verschiedenen Aufgabenstellungen zur Statik der starren Körper beobachtet.⁵ Auf diesen Zusammenhang wird in Kapitel 4 noch einmal kurz eingegangen.

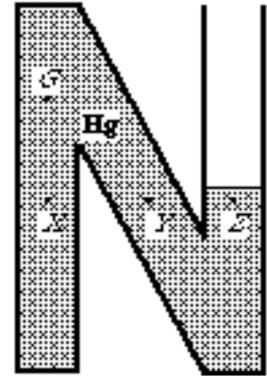


Abbildung 4: Skizze zur N-Rohr Aufgabe

Bei dieser Aufgabe traten deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Studiengängen auf. Vor allem die Studierenden im Studiengang AIW (Allgemeine Ingenieurwissenschaften) zeigten eine wesentlich größere Erfolgsquote (63%) als der Durchschnitt (39%). Die Studierenden in den Studiengängen HSB (Schiffbau) und MB (Maschinenbau) schnitten leicht überdurchschnittlich ab (50% bzw. 45%). Überraschend war vor allem das deutlich schlechtere Abschneiden der Gruppe BU (Bauingenieurwesen und Umwelttechnik) mit nur 7% richtigen Antworten.

Die Ergebnisse der zweiten Aufgabe sind in Tabelle 4 noch einmal dargestellt (alle Angaben auf 5% gerundet), wobei Vergleichsdaten aus den Vereinigten Staaten mit angegeben sind.⁵ Die Vergleichsdaten wurden in verschiedenen Lehrveranstaltungen und unter unterschiedlichen Bedingungen ermittelt. Bei den Ergebnissen von der U. of Washington handelt es sich erneut um eine Einführungsverlesung (algebra-based introductory physics), sowie um eine Vorlesung zur Wärmelehre im zweiten Studienjahr. In beiden Fällen wurde die Aufgabe gestellt, nachdem der entsprechende Stoff in der Vorlesung behandelt worden war.

	TU Harburg Mechanik (nach Vorlesung) ($N = 168$)	U. of Wash. Intro. Physics (nach Vorl.) ($N = 201$)	U. of Wash. Therm. Phys. (nach Vorl.) ($N = 23$)
Richtige Antworten ($G < X = Y = Z$)	40%	65%	60%
$G > X = Y = Z$	5%		
$X > G > Z$ (Y beliebig)	40%	NV	NV
Z am größten	10%	NV	NV

Tabelle 4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Aufgabe zum Druck mit Vergleichsdaten.
(„G“ steht hier für den Druck P_G am Punkt G; mit NV gekennzeichnete Felder:
Daten nicht verfügbar.)

2.1.2.3 Drei-Würfel-Aufgabe

In der dritten Aufgabe zur Fluid-Statik wurden die Studierenden zunächst aufgefordert, drei Würfel gleicher Größe nach der auf sie wirkenden Auftriebskraft zu sortieren (Teilaufgabe A). Würfel X und Y unterschieden sich nur durch die Tiefe, bis zu der sie untergetaucht wurden; Würfel X und Z unterschieden sich durch ihre Masse (siehe Skizze). Da alle drei Würfel das gleiche Volumen haben und vollständig untergetaucht sind, sind (nach $F_A = \rho g V$) die Auftriebskräfte alle gleich. (In der folgenden Diskussion wird der Buchstabe „X“ jeweils als Kürzel für die Auftriebskraft F_X auf den Körper X verwendet. Entsprechendes gilt für Y und Z.)

Im zweiten Teil der Aufgabe sollten die drei Würfel nach den auf sie wirkenden Seilkräften sortiert werden. Da die Auftriebskräfte alle gleich sind, hängen die Seilkräfte nur vom Gewicht ab. Die Seilkräfte auf X und Y sind also gleich, und größer als die Seilkraft, die auf Z wirkt.

Ergebnisse: Von 163 ausgefüllten Aufgabenblättern zeigten 96 (nahezu 60%) ein vollständig richtiges Ergebnis (Auftriebskräfte alle gleich). 28 Studierende (17%) erkannten, dass auf X und Y (also unabhängig von der Tiefe) gleiche Auftriebskräfte wirken, gaben aber an, dass Z eine größere (11%) oder kleinere (6%) Auftriebskraft erfährt. In ihren Begründungen bezogen sich die meisten Studierenden auf die geringere Masse oder geringere Dichte von Würfel Z. (In ein paar Fällen wurde

offensichtlich angenommen, dass sich die in der Formel auftretende Größe ρ auf den eingetauchten Körper bezieht.) 18 Studierende (11%) stellten fest, dass auf X und Z (also unabhängig von der Masse) gleiche Auftriebskräfte wirken, behaupteten aber (mit einer Ausnahme), dass Y eine größere Auftriebskraft erfährt. Zu dieser Antwort wurde als Begründung oft die größere Tiefe von Y angegeben, in einigen Fällen auch explizit der in dieser Tiefe herrschende größere Druck. Weitere 21 Studenten (13%) gaben Antworten, denen zufolge die Auftriebskraft sowohl von der Masse als auch von der Tiefe abhängt.

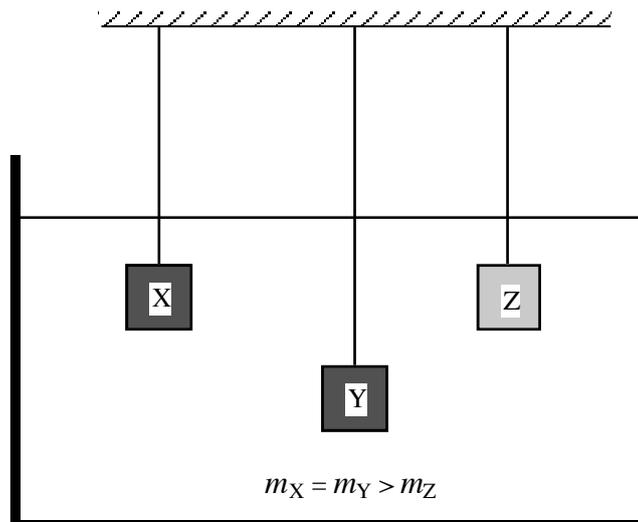


Abbildung 5: Skizze zur Drei-Würfel-Aufgabe

Die Erfolgsquoten in den einzelnen Studiengängen unterschieden sich zum Teil erheblich. Die in den Studiengängen AIW (Allgemeine Ingenieurwissenschaften) und HSB (Schiffbau) lagen mit rund 75% über dem Mittel aller Studierenden; die Erfolgsquote im Studiengang BU (Bauingenieurwesen und Umwelttechnik) lag mit etwa 20% erheblich niedriger.

Die Ergebnisse dieser Teilaufgabe sind in Tabelle 5 noch einmal zusammengefasst, wobei erneut Vergleichsdaten angegeben sind.⁵

Hinsichtlich der Antworten zur zweiten Teilaufgabe ist vor allem bemerkenswert, dass von den Studierenden, die Teil A vollständig richtig beantwortet hatten, etwa 10% für Y eine größere Seilkraft als für X angaben. Als Grund hierfür wurde mehrmals die auf Y lastende Wassersäule oder der höhere Druck auf Y angegeben. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass diese Studierenden die Auftriebskräfte zwar richtig vergleichen konnten; dass sie diese Größe aber nicht als Summe *aller* auf den Körper wirkenden Wasserkräfte verstehen.

	TU Harburg Mech. f. Ing. II (nach Vorl.) (N = 163)	U. of Wash. Intro. Physics (nach Vorl.) (N = 201)	U. of Wash. Therm. Phys. (nach Vorl.) (N = 37)
Richtige Antworten (X=Y=Z)	60%	10-30%	50%
Auftrieb massenabhängig	15%	NV	NV
Auftrieb tiefenabhängig	10%	NV	NV
Auftrieb hängt von Masse und Tiefe ab	15%	NV	NV

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der Aufgabe zur Auftriebskraft (Teilaufgabe A) mit Vergleichsdaten. („X“ steht hier für die Auftriebskraft auf den Körper X; mit NV gekennzeichnete Felder: Daten nicht verfügbar.)

2.1.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Fluid-Statik

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein großer Teil der Studierenden auch nach dem Besuch von Vorlesungen und (teilweise) Übungen kein funktionsfähiges Verständnis ("*functional understanding*") des hydrostatischen Drucks erreicht hat. Dies äußert sich zum einen in der Schwierigkeit, den Druck als Funktion des Ortes in einer statischen Flüssigkeit qualitativ richtig zu beschreiben; zum anderen im Unvermögen, das bekannte Ergebnis für den Druckverlauf als Funktion der Tiefe im Kontext anderer Fragestellungen richtig anzuwenden. Letztere Schwierigkeit wurde sowohl bei einer Frage zur Lage des Flüssigkeitsspiegels im offenen U-Rohr als auch bei einer Aufgabe zur Auftriebskraft beobachtet. Ein möglicher Zusammenhang mit verschiedenen Schwierigkeiten auf dem Gebiet der Mechanik starrer Körper wurde angedeutet und wird in Kapitel 4 weiter diskutiert.

2.1.3 KINEMATIK IN ZWEI DIMENSIONEN

Zum Themenbereich Kinematik wurden den Hörern und Hörerinnen der Vorlesung *Mechanik für Ingenieure* zwei Aufgaben gestellt. Gegenstand beider Aufgaben war die Richtung (in der ersten Aufgabe auch der Betrag) des Beschleunigungsvektors in zweidimensionalen Bewegungen, sowohl bei konstantem als auch bei veränderlichem Geschwindigkeitsbetrag (erste bzw. zweite Aufgabe).

2.1.3.1 Beschleunigungsvektoren für Fahrzeug auf gekrümmter Bahn

In der ersten Aufgabe zur Kinematik sollten an mehreren Punkten die Beschleunigungsvektoren eines Fahrzeugs bestimmt werden, das sich mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag auf einer gekrümmten Bahn bewegt. Die Bahn hat annähernd die Form eines Ovals, enthält jedoch eine zusätzliche Kurvenfolge (siehe Abbildung 6).

Da der Betrag der Geschwindigkeit konstant ist, muss der Beschleunigungsvektor überall senkrecht auf dem Geschwindigkeitsvektor am jeweiligen Punkt stehen und damit zum Innern des lokalen Krümmungskreises zeigen. Der Betrag der Beschleunigung ist um so größer, je kleiner der Krümmungsradius ist (bzw. je stärker die Bahn gekrümmt ist).

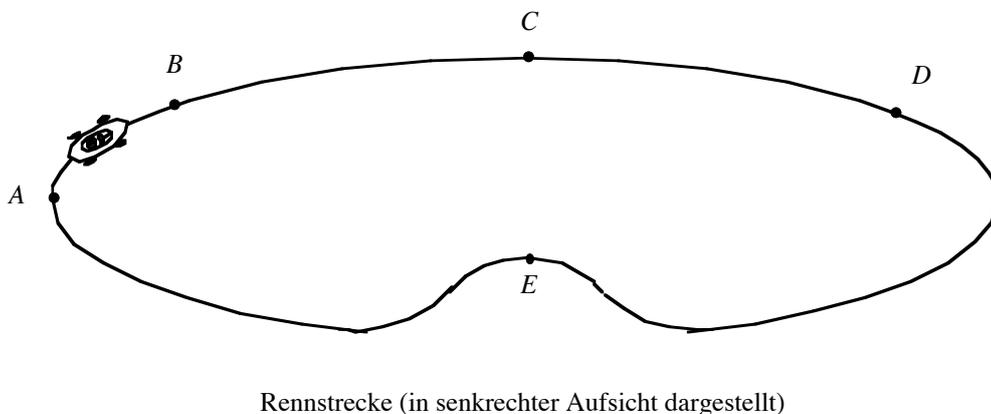


Abbildung 6: Skizze zur Aufgabe „Beschleunigungsvektoren für Fahrzeug auf gekrümmter Bahn“.

Ergebnisse: Von 148 Studierenden, die am Quiz teilnahmen, beantworteten 28 (18%) diese Frage vollständig richtig (d. h. in Bezug auf Richtung und Betrag aller fünf Beschleunigungsvektoren). Weitere 25 (16%) zeichneten Vektoren, deren Richtungen mit der erwarteten Antwort übereinstimmten, ohne jedoch die Beträge der Vektoren zu differenzieren. Zusätzlich noch einmal 11 Studierende (7%) gaben an, dass die Beschleunigung am Punkt C oder E gleich Null ist, hatten aber sonst zumindest die Richtung der anderen Vektoren richtig eingezeichnet. (Als Begründung wurde hierfür oft angegeben, dass die Bahn an einem oder beiden Punkten nicht gekrümmt ist.) Damit hat also annähernd die Hälfte der Studierenden (43%) erkannt, dass die Richtung der Beschleunigung bei konstantem Geschwindigkeitsbetrag senkrecht zur Geschwindigkeit steht und zum Inneren des Krümmungskreises zeigt. Eine (ansonsten richtige) Antwort, bei der die Richtung des Beschleunigungsvektors am Punkt E vertauscht war, trat nur dreimal auf (2%).

In 24 Fällen (15%) zeichneten die Studierenden alle Beschleunigungsvektoren radial nach außen. Zur Begründung dieser Lösung wurden oft die Begriffe „Zentrifugalkraft“ (bzw. „-beschleunigung“) oder „Zentripetalkraft“ (bzw. „-beschleunigung“) angeführt. In einigen Fällen wurde beschrieben, dass der Wagen in der Kurve „nach außen getragen“ (oder „beschleunigt“) wird. 15 Studierende (9%) zeichneten die Beschleunigungsvektoren zwar zum Inneren der Bahn, jedoch nicht senkrecht zur Geschwindigkeit. In diesen Fällen zeigten die Vektoren entweder zum Ovalmittelpunkt oder zu den mutmaßlichen Brennpunkten der Ellipse. (In mehreren Fällen wurde der Mittelpunkt in der angegebenen Begründung explizit erwähnt.) Jeweils 9 Studierende (also jeweils 6%) zeichneten die Beschleunigungsvektoren in tangentialer Richtung ein oder gaben an, dass die Beschleunigung an allen Punkten gleich Null ist. Als Begründung hierfür wurde angegeben, dass sich der Geschwindigkeitsbetrag nicht ändert. In mehreren Fällen wurde auch erwähnt, dass die Beschleunigung die zeitliche Ableitung der Geschwindigkeit ist und daher bei konstantem Geschwindigkeitsbetrag Null sein muss. Weitere 24 Studierende (15%) gaben eine unklare, unvollständige oder gar keine Antwort.

2.1.3.2 Beschleunigungsvektoren beim Fadenpendel

In der zweiten Aufgabe zur Kinematik sollte die Bewegung eines Fadenpendels mit Hilfe rein kinematischer Methoden analysiert werden. An fünf Punkten auf der Bahn des Pendels (darunter der Anfangspunkt *A*, der Scheitelpunkt *C* und der Umkehrpunkt *E*) sollten die Geschwindigkeitsvektoren (Aufgabenteil a) sowie näherungsweise die Richtung der Beschleunigungsvektoren (Aufgabenteil b) eingezeichnet werden.

Aufgrund ihrer Definition als der zeitlichen Änderung des Ortsvektors liegen die Geschwindigkeitsvektoren überall tangential zur Bahnkurve, sofern sie nicht (wie an den Punkten *A* und *E*) gleich Null sind. Der Betrag der Geschwindigkeit ist am Punkt *C* am größten und an den Punkten *B* und *D* etwa gleich groß. (Die richtige Bestimmung der relativen Geschwindigkeitsbeträge beruht auf der Anwendung des Energieerhaltungssatzes, und wurde deshalb nicht in die Auswertung einbezogen.)

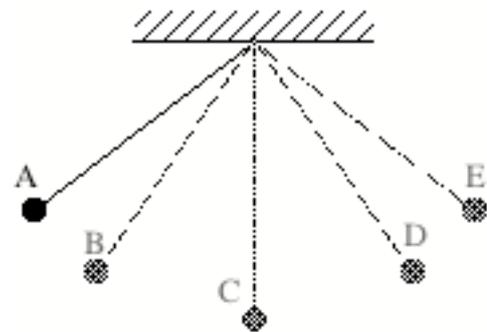


Abbildung 7: Skizze zur Aufgabe „Beschleunigungsvektoren beim Fadenpendel“.

Die näherungsweise Richtung der Beschleunigungsvektoren an den fünf Punkten lässt sich durch Betrachten der natürlichen Komponenten parallel und senkrecht zur Bahnkurve ermitteln. Da die Geschwindigkeit an den Punkten *A* und *E* gleich Null ist, müssen dort die Normalkomponenten verschwinden. Die Beschleunigung ist an diesen Punkten also tangential zur Bahn (und abwärts gerichtet). In der Umgebung der Punkte *B* und *D* ändern sich sowohl Betrag als auch Richtung der Geschwindigkeitsvektoren. Die Beschleunigungen müssen dort also sowohl eine tangentiale als auch

eine senkrechte Komponente besitzen. Entsprechend der Änderung der Geschwindigkeitsbeträge ist der Winkel zwischen Geschwindigkeit und Beschleunigung am Punkt B kleiner als 90° , am Punkt D jedoch größer als 90° . Am Punkt C ändert sich der Geschwindigkeitsbetrag momentan nicht. Die Tangentialkomponente der Beschleunigung muss also verschwinden. Die Normalkomponente zeigt zum Berührungskreismittelpunkt, also senkrecht nach oben. Abbildung 8 zeigt mögliche Lösungen für die beiden Aufgabenteile.

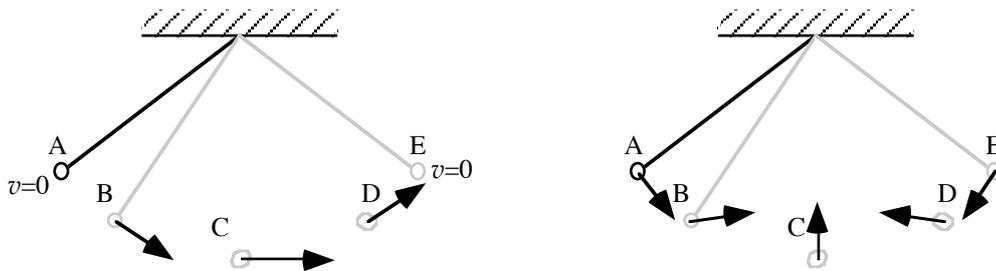


Abbildung 8: Mögliche Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren für die Aufgabe zum Fadenpendel

Ergebnisse: Richtige Geschwindigkeitsvektoren an allen fünf Punkten wurden von 111 Studierenden (75%) eingezeichnet. Weitere 16 Studierende (11%) zeichneten am Punkt A oder E einen von Null verschiedenen Vektor ein, hatten aber richtige Ergebnisse an den anderen drei Punkten. Darüber hinaus gab es noch fünf Fälle (3%), in denen die umgekehrte Bewegung (von E nach A) richtig durch Vektoren beschrieben wurde. Nahezu 90% der Studierenden waren also in der Lage, die Geschwindigkeitsvektoren völlig oder zumindest annähernd richtig anzugeben. Die weitere Auswertung unten bezieht sich nur auf diese 132 Aufgabenblätter.

Nur zwei Studierende zeichneten an allen fünf Punkten richtige Beschleunigungsvektoren ein (wobei in der Aufgabenstellung nur nach der Richtung der Vektoren gefragt wurde). Weitere 8 skizzierten richtige Beschleunigungen an den Punkten B, C und D, jedoch entweder eine nicht verschwindende Normalkomponente an Punkt A oder E, oder eine (Gesamt-) Beschleunigung gleich Null an einem der beiden Punkte. Selbst wenn man von den vielleicht besonders schwierigen Punkten A und E absieht, waren also nur etwa 7% der Studierenden in der Lage die natürlichen Komponenten der Beschleunigung erfolgreich anzuwenden, um eine näherungsweise Richtung des Vektors anzugeben.

Die häufigste Antwort (36mal, 24%) bestand in ausschließlich tangentialen Beschleunigungsvektoren (zum Punkt C hin) an den Punkten A, B, D und E. Am Punkt C wurde in diesen Fällen meistens der Nullvektor, manchmal jedoch auch ein senkrechter Vektor (nach unten oder oben) angegeben. 26 Studierende (18%) antworteten, dass der Beschleunigungsvektor an allen fünf Punkten senkrecht nach unten zeigt; 17 (11%) zeichneten radial nach innen oder außen gerichtete Vektoren. Siebenmal (5%)

wurden tangentielle Beschleunigungsvektoren in Richtung der Geschwindigkeiten angegeben; elfmal (7%) Vektoren, die an allen Punkten nach rechts und zum Äußeren der Bahn zeigten. In 25 Fällen (17%) wurden uneindeutige oder gar keine Antworten gegeben.

2.1.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Kinematik

Auf dem Gebiet der zweidimensionalen Kinematik wurde festgestellt, dass viele der Studierenden auch nach dem Besuch der entsprechenden Lehrveranstaltungen nicht in der Lage waren, die Definition des Beschleunigungsvektors als zeitliche Änderung ("Ableitung") des Geschwindigkeitsvektors anzuwenden. Auch die in der Vorlesung hergeleitete Zerlegung des Beschleunigungsvektors in die natürlichen Komponenten tangential und senkrecht zur Bahnkurve wurde in beiden Aufgaben nur von wenigen der Studierenden vollständig richtig angewandt. Ein richtiges qualitatives Verständnis der Beschleunigung als vektorieller Größe wurde also nur von einer geringen Anzahl der Studierenden erreicht.

2.2 ELEKTROTECHNIK

In der Vorlesung *Grundlagen der Elektrotechnik II* wurden in zwei Kurztests (*Quizzes*) insgesamt vier Aufgaben gestellt. In den ersten beiden Aufgaben ging es um das Verständnis von Strom, Spannung und Widerstand in einfachen Gleichstromkreisen. Zwei weitere Aufgaben behandelten Stromkreise mit kapazitiven und induktiven Bauelementen.

2.2.1 STROM, SPANNUNG UND WIDERSTAND IM GLEICHSTROMKREIS

Gegenstand der folgenden beiden Aufgaben war ein qualitatives Verständnis von Strom, Spannung und Widerstand im Gleichstromkreis, also der Kirchhoffschen Regeln sowie des im Ohmschen Gesetz ausgedrückten Zusammenhanges zwischen den drei Größen. Diese Themen wurden bereits in der Lehrveranstaltung *Grundlagen der Elektrotechnik I* behandelt und bilden die Grundlage für nahezu alle in der *Grundlagen der Elektrotechnik II* behandelten Stoffgebiete.

2.2.1.1 Die Fünf-Lampen-Aufgabe

In der ersten Aufgabe wurden die Studierenden aufgefordert, fünf Glühlampen in drei Stromkreisen nach ihrer Helligkeit zu sortieren und ihre Antwort zu begründen (siehe Schaltbilder in Abbildung 9). Bei der Beantwortung dieser Aufgabe sind vor allem zwei konzeptionelle Merkmale einfacher Stromkreise wichtig: die Batterie als Quelle konstanter Spannung (und daher nicht konstanten Stroms) und die Gleichheit des Stroms (bzw. Erhaltung der Ladung) innerhalb einer Reihenschaltung. Die Aufgabenstellung enthält Glühlampen anstelle von ohmschen Widerständen, um eine konzeptionelle

Betrachtungsweise (anstelle einer rein formelhaften Anwendung des Ohmschen Gesetzes oder der Kirchhoff'schen Regeln) nahezulegen.

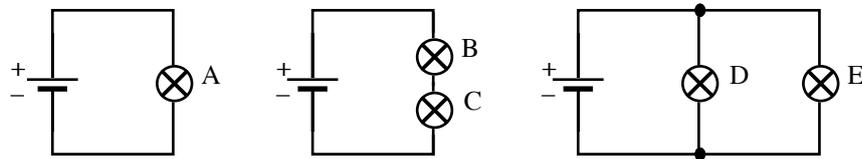


Abbildung 9: Schaltbilder zum Fünf-Lampen-Test.

Da die Batterien in der Aufgabe als ideale Spannungsquellen betrachtet werden sollen, liegt an den Glühlampen A, D und E die gleiche Spannung (nämlich die Batteriespannung) an. A, D und E müssen deshalb auch die gleiche Helligkeit haben. An den Lampen B und C liegt jeweils nur die halbe Batteriespannung an. B und C haben deshalb die zwar die gleiche Helligkeit im Vergleich zueinander, aber eine geringere als A, D und E. (Alternativ lässt sich auch argumentieren, dass die Reihenschaltung von B und C einen größeren Widerstand besitzt als A allein und deshalb im gesamten Kreis ein geringerer Strom fließt. Da dieser Strom durch B und C fließen muss, haben B und C gleiche Helligkeit und sind weniger hell als A.)

Ergebnisse: Es wurden 146 Aufgabenblätter ausgefüllt. Davon hatten 87 (60%) Aufgabe 1 richtig beantwortet. Die unrichtigen Antworten teilten sich wie folgt auf:

In 14 Fällen (10%) wurde die Helligkeit von B als größer angegeben als die von C (mit allen anderen Lampen in beliebiger Reihenfolge). Die häufigsten Begründungen (zusammen 8 Antworten) waren, dass B „zuerst“ kommt oder dass der Spannungsabfall an B größer ist. Dies deutet daraufhin, dass ein Teil der Studierenden noch Schwierigkeiten mit der Erhaltung der Ladung (bzw. der Kirchhoff'schen Knotenregel) in Reihenschaltungen hat. Zudem scheinen die Begriffe Spannung bzw. Spannungsabfall und Potential nicht klar voneinander getrennt zu sein.

In 18 Fällen (12%) wurde angegeben, dass die Helligkeit von A größer sei als die von D und E, während B und C noch geringere Helligkeit haben ($A > D = E > B = C$). In 19 weiteren Fällen (13%) wurde die Helligkeit von A auch als größer als die von D und E angegeben, jedoch mit $B = C$ an beliebiger Stelle relativ zu den anderen Lampen. Beide Ergebnisse zusammen wurden etwa zu zwei Dritteln mit der *Aufteilung des Stroms* und zu einem Drittel mit der *Anzahl der Verbraucher* begründet. Die Begründung legt nahe, dass manche Studierenden die Batterie als konstante *Strom-* oder *Leistungsquelle* ansehen.

Die Ergebnisse von der ersten Aufgabe sind in nachstehender Tabelle noch einmal dargestellt, wobei Vergleichsdaten aus den Vereinigten Staaten mit angegeben sind.⁶ Die Vergleichsdaten wurden jeweils im zweiten Semester eines zwei- bzw. dreiteiligen Einführungskurses zur Physik gewonnen. Da es sich um ‚*calculus-based physics*‘ (Physik mit Differential- und Integralrechnung als Voraussetzung) handelt, kann davon ausgegangen werden, dass die Hörer und Hörerinnen in diesen Vorlesungen überwiegend Studierende der Ingenieur- und Naturwissenschaften waren. Die in den Vereinigten Staaten untersuchten Studenten waren also weit weniger spezialisiert als die Hörer der Vorlesung an der TU Harburg. Dies muss bei einem Vergleich der Ergebnisse natürlich beachtet werden. Die beiden Gruppen in den USA unterscheiden sich insofern, als an der *U. of Washington* die zugehörigen Praktikumsversuche überwiegend qualitativer und semi-quantitativer Art sind. (Die ansonsten nahezu identischen Ergebnisse deuten daraufhin, dass dadurch möglicherweise eine geringe Verbesserung des Verständnisses der Erhaltung der Ladung erreicht worden ist.)

	TU Harburg (N = 146)	U. of Illinois (N = 305)	U. of Washington (N = 301)
Richtige Antworten (A=D=E>B=C)	60%	20%	20%
Antworten mit B>C	10%	30%	20%
A>D=E>B=C	10%	15%	15%
A>D=E u. B=C (sonstige)	15%	Keine Angabe	Keine Angabe

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse der ersten Aufgabe zu Spannung, Strom und Widerstand im Gleichstromkreis, einschließlich Vergleichsdaten. (Nicht alle Antwortkategorien sind dargestellt.)

2.2.1.2 Die Vier-Lampen-Aufgabe

In der zweiten Aufgabe wurden die Studierenden zuerst aufgefordert, die Glühlampen in der dargestellten Schaltung (siehe Abbildung 10) bei geöffnetem Schalter nach ihrer Helligkeit zu sortieren (Aufgabenteil a). Anschließend sollte bestimmt werden, ob die Helligkeit der Lampe A bei Schließen des Schalters zunimmt, abnimmt oder gleich bleibt (Aufgabenteil b). In Teil (a) ging es im Wesentlichen um die Rolle des Schalters sowie erneut um die Konstanz des Stroms in der Reihenschaltung. In Teil b ging es um die Erkenntnis, dass Veränderungen in einem Teil der Schaltung das Verhalten

eines anderen Teils beeinflussen können und dass der Widerstand zweier parallel geschalteter Lampen geringer ist als der Widerstand einer einzelnen Lampe.

Da der Ast von Lampe C durch den Schalter unterbrochen ist, leuchtet Lampe C nicht. A, B und C sind in Reihe und daher gleich hell. Beim Schließen des Schalters wird der Widerstand von BC geringer als der von B allein zuvor. Dadurch fließt ein größerer Strom im gesamten Kreis (und folglich durch A). Die Helligkeit von Lampe A nimmt deshalb zu.

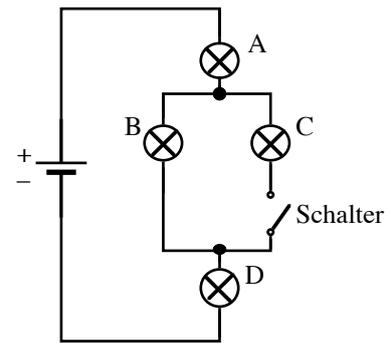


Abbildung 10: Schaltbild zum Vier-Lampen-Test.

Ergebnisse: Von den 146 ausgefüllten Aufgabenblättern hatten 129 (88%) ein richtiges Ergebnis für Teil a. Mit einer Ausnahme wählten alle anderen Studierende (11%) die Reihenfolge $A > B > D$. (Von diesen 16 Studierenden wiederum hatten 14 in Aufgabe 1 eine Antwort mit $B > C$ gewählt, was auf eine konsistente Beantwortung der beiden Fragen hindeutet.). In Teil b gaben 80 Studierende (55%) eine richtige Antwort. Die mit Abstand häufigste falsche Antwort (34mal, 23%) war, dass sich die Helligkeit von Lampe A nicht ändern würde. Dies wurde oft mit der Annahme eines *konstanten Stroms* oder mit der Reihenfolge der Lampen („A zuerst“) begründet. 18 Studierende (12%) erwarteten, dass die Helligkeit von Lampe A abnimmt, 14 Studierende (10%) gaben eine uneindeutige Antwort. (Einige von ihnen schienen die Aufgabenstellung missverstanden zu haben und gaben eine neue Rangfolge der vier Lampen ohne die gestellte Frage zu beantworten.)

Zu Aufgabe 2b liegen folgende Vergleichsdaten vor: Bei umgekehrter Fragestellung (Schalter zuerst geschlossen) gaben 20% der Studenten an der U. of Washington eine richtige Antwort. Nach Einführung von *Tutorials* (siehe hierzu Kapitel 5) stieg dort der Anteil der richtigen Antworten auf 70%.

2.2.2 STROMKREIS MIT KAPAZITIVEN UND INDUKTIVEN BAUELEMENTEN

Zusätzlich zum in den beiden vorigen Aufgaben behandelten Lehrstoff ging es in den folgenden beiden Aufgaben um das Verhalten von Kondensatoren (Kapazitäten) und Spulen (Induktivitäten) beim Anlegen einer Gleichspannung an den Stromkreis. Das Verhalten von kapazitiven und induktiven Bauteilen war zum Zeitpunkt des Quiz bereits in Vorlesungen und Übungen behandelt worden.

2.2.2.1 Strom und Spannung beim Kondensator

Die Aufgabe zum Stromkreis mit kapazitiven Bauelementen bezog sich auf das in Abbildung 11 gezeigte Schaltbild mit offenem Schalter und anfänglich ungeladenen Kondensatoren, von denen C_1 eine größere Kapazität hat als C_2 . Die Studierenden sollten das Verhalten der beiden Glühlampen nach Schließen des Schalters qualitativ beschreiben (Aufgabenteil a) sowie explizit angeben, ob die

beiden Lampen zu irgendeinem Zeitpunkt gleiche Helligkeit haben (Aufgabenteil b). Für einen Zeitpunkt lange nach Schließen des Schalters sollten außerdem noch Ladung und Spannung der beiden Kondensatoren verglichen werden (Aufgabenteil c). Wie bei den vorigen beiden Aufgaben sollte die Batterie als ideal (d. h. mit vernachlässigbarem Innenwiderstand) angenommen werden.

Sofort nach Schließen des Schalters ist die Ladung der beiden Kondensatoren immer noch Null. Deshalb liegt an Lampe A momentan die volle Batteriespannung an und Lampe A leuchtet (bei richtig gewählter Spannung) hell auf. Der durch A fließende Strom lädt die beiden Kondensatoren auf, so dass die an ihnen anliegende Spannung ansteigt. Lampe A wird deshalb immer dunkler, bis sie nach einer gewissen Zeit (praktisch) erlischt. Da an Lampe B ständig die volle Batteriespannung anliegt, ändert sich ihre Helligkeit nach Schließen des Schalters nicht. Aufgrund der anliegenden Spannungen sind die beiden Lampen sofort nach Schließen des Schalters momentan gleich hell.

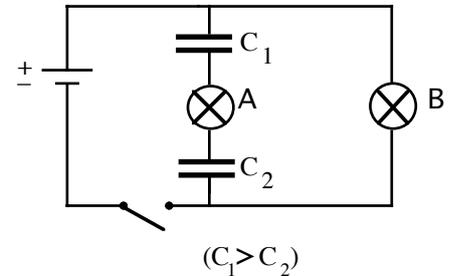


Abbildung 11: Schaltbild zur Kondensator-Aufgabe.

Wegen der Erhaltung der Ladung ist die Ladung des Kondensators C_1 zu jedem Zeitpunkt gleich der Ladung des Kondensators C_2 . Aufgrund der größeren Kapazität ist die Spannung an C_1 daher stets kleiner als die an C_2 .

Ergebnisse: Von den 125 ausgefüllten Aufgabenblättern wiesen 45 (36%) richtige Antworten zu Aufgabenteil 1.a auf. (Antworten zu Teil 1.a wurden als richtig bewertet, wenn enthalten war, dass Lampe A dunkler wird und erlischt und dass Lampe B gleich bleibende Helligkeit hat.) Die häufigste unrichtige Antwortkombination war, dass die Helligkeit von Lampe A abnimmt, während die von Lampe B zunimmt (35mal, 28%). Als Begründung wurde hierfür häufig angegeben, dass bei "vollständig aufgeladenen" Kondensatoren „der gesamte Strom“ für Lampe B zur Verfügung steht. Die Ursache für die Häufigkeit dieser Antwort scheint also die gleiche Schwierigkeit zu sein wie bei den Aufgaben zum Gleichstromkreis (das heißt, die Betrachtung der Batterie als Quelle konstanten Stroms). Weitere 24 Studierende (20%) gaben an, dass Lampe A verzögert hell wird oder mit anfangs zunehmender und später gleich bleibender Helligkeit leuchtet. Diese Antwort wurde meist damit begründet, dass die beiden Kondensatoren erst „aufgeladen“ werden müssen, damit Lampe A leuchten kann. Dabei wurde von den Studierenden offenbar nicht erkannt, dass mit zunehmender Ladung auf den Kondensatoren die an Lampe A anliegende Spannung *geringer* wird. Auch bei dieser Frage scheinen also Schwierigkeiten mit dem Begriff der Spannung und seiner richtigen Verwendung eine Rolle zu spielen.

Die Antworten zu Aufgabenteil 1.b hingen stark von den Antworten auf Frage 1.a ab. Studierende, die das Verhalten der beiden Lampen qualitativ richtig beschrieben hatten, erkannten in der Regel auch, dass die Helligkeit direkt nach Schließen des Schalters gleich sein muss. Studierende, die annahmen, dass Lampe A heller wird, gaben oft an, dass die Helligkeit am Ende des Aufladevorgangs gleich sein muss.

Aufgabe 1.c (Vergleich von Ladung und Spannung an den beiden Kondensatoren) wurde von 42 Studierenden (34%) richtig beantwortet. (Gleiche Ladung und wegen $Q=CU$ niedrigere Spannung an C_1 .) Nahezu gleich viele Studierende (34%) gaben an, dass die Ladung auf C_1 wegen der größeren Kapazität größer sein muss. (Etwa die Hälfte von diesen antwortete, dass die Spannungen gleich seien. Oft wurde diese Antwort mit der „Reihenschaltung“ begründet.) Weitere 24 Studierende (etwa 20%) erkannten zwar, dass die Ladungen auf den beiden Kondensatoren gleich sein muss, gaben dann aber eine unrichtige (oder gar keine) Antwort auf die Frage nach den Spannungen. Ebenfalls wie bei den beiden Aufgaben zum Gleichstromkreis scheinen also auch bei dieser Aufgabe Schwierigkeiten mit der Ladungserhaltung aufgetreten zu sein.

2.2.2.2 Strom und Spannung bei der Spule

Die Aufgabe zur Spule bezog sich auf die in Abbildung 12 dargestellte Schaltung. In der Aufgabenstellung war angegeben, dass der Schalter bereits seit langer Zeit geschlossen ist. Zunächst sollte die Helligkeit der beiden Glühlampen A und B bei weiterhin geschlossenem Schalter verglichen werden (Aufgabenteil a). Anschließend sollte das Verhalten der beiden Lampen nach Öffnen des Schalters qualitativ beschrieben werden (Aufgabenteil b). Außerdem wurde noch nach der Helligkeit von Lampe B unmittelbar nach Öffnen des Schalters im Vergleich zur Helligkeit von Lampe A kurze Zeit vor Öffnen gefragt (Teil c).

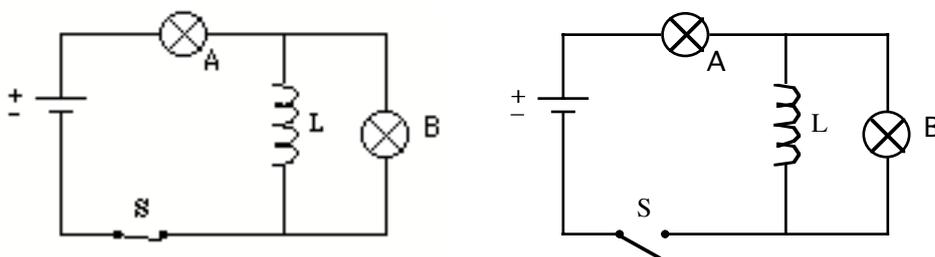


Abbildung 12: Schaltbilder zur Spulen-Aufgabe; links bei geschlossenem, rechts bei offenem Schalter.

Sofern der Schalter seit langer Zeit geschlossen ist, ändert sich der durch die Spule fließende Strom nicht mehr. Die in ihr induzierte Spannung ist daher Null. Da wegen der Parallelschaltung von L und

Lampe B an beiden ebenfalls keine Spannung abfallen kann, leuchtet B nicht. An A fällt die gesamte Batteriespannung ab. Lampe A leuchtet also mit maximaler Helligkeit.

Nach Öffnen des Schalters erlischt Lampe A sofort, da sie sich nicht mehr in einem geschlossenen Stromkreis befindet. Der Stromfluss durch L ist momentan unverändert und Lampe B leuchtet mit der gleichen Helligkeit wie Lampe A zuvor, beginnt aber sofort, an Helligkeit zu verlieren (da der Strom durch L abnimmt), bis sie schließlich erlischt.

Ergebnisse: Die Mehrzahl der Studierenden antwortete in Teil (a) richtigerweise, dass A heller leuchtet als B, ohne jedoch anzugeben, dass Lampe B nicht leuchtet. Umgekehrt ließ sich jedoch aus einigen Antworten zu Aufgabe (b) schließen, dass Lampe B auch in Teil (a) zumindest als schwach leuchtend angenommen wurde (z. B. „B leuchtet weiter“ oder „B leuchtet noch nach“). Hier wurde also von vielen Studierenden entweder nicht beachtet, dass bei konstantem Strom die Spannung an einer idealen Spule Null ist, oder es wurde wie bei den früheren Aufgaben nicht erkannt, dass die an zwei parallelen Bauelementen anliegende Spannung gleich sein muss.

In Teil (c) der Aufgabe wurde häufig angegeben, dass Lampe B nach Öffnen des Schalters heller ist als Lampe A vor Öffnen des Schalters. Als Begründung gaben viele Studierende an, dass an B eine „(große) induzierte Spannung“ anliegt. Offenbar wird eine induzierte Spannung unabhängig von der genauen Schaltung allgemein als sehr groß wahrgenommen.

2.2.3 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE ZUR ELEKTROTECHNIK

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sowohl bei den beiden Aufgaben zum Gleichstromkreis (Quiz 1) als auch bei der Aufgabe zum Kondensator (Quiz 2) jeweils etwa ein Viertel der Studierenden (23-28%) Antworten abgaben, die auf der Vorstellung der Batterie als einer Quelle konstanten Stroms zu basieren scheinen. Häufig wurde diese Vorstellung sogar explizit in die Begründung der Antworten einbezogen. Da die Aufgaben von Quiz 1 zwischenzeitlich in der Vorlesung besprochen wurden, kann ausgeschlossen werden, dass die Studierenden in ihren Überlegungen wissentlich von einer realen Batterie (mit Innenwiderstand) ausgingen. (Siehe hierzu auch Kapitel 4.)

In einem geringeren Umfang (etwa 10% der Studierenden) wurden auch Schwierigkeiten mit der Erhaltung der Ladung im unverzweigten Stromkreis festgestellt. Die hierbei auftretende Fehlvorstellung sollte trotz ihrer relativen Seltenheit nicht außer Acht gelassen werden, da es sich vermutlich um ein sehr fundamentales Missverständnis des technischen Strombegriffes handelt, das auch durch die Beschäftigung mit fortgeschrittener Materie oft nicht selbständig überwunden wird.

2.3 THERMODYNAMIK

In der Vorlesung *Thermodynamik* wurden in drei Kurztests insgesamt sechs Aufgaben gestellt. In den ersten beiden Aufgaben ging es um die Zustandsgrößen des idealen Gases, sowie um das ideale Gasgesetz und das Avogadro'sche Gesetz. Die nächsten beiden Aufgaben behandelten den ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Die Themen der letzten beiden Aufgaben waren der zweite Hauptsatz der Thermodynamik und der Wirkungsgrad eines Kreisprozesses.

2.3.1 GASGRÖSSEN, IDEALES GASGESETZ UND AVOGADROSCHES GESETZ

2.3.1.1 Isobare Ausdehnung eines idealen Gases

Gegenstand der ersten Aufgabe war folgender Vorgang: Ein Glaszylinder mit reibungsfrei beweglichem Kolben enthält gasförmigen Stickstoff und befindet sich anfänglich in einem Gemisch aus Eis und Wasser. Der Zylinder wird dann aus dem kalten Bad genommen und in einen Behälter mit kochendem Wasser überführt. Die Studierenden sollten Druck und Volumen des Gases im neuen Gleichgewichtszustand (im heißen Bad) mit den Anfangswerten (im kalten Bad) vergleichen. Der Stickstoff sollte dabei als ideales Gas betrachtet werden.

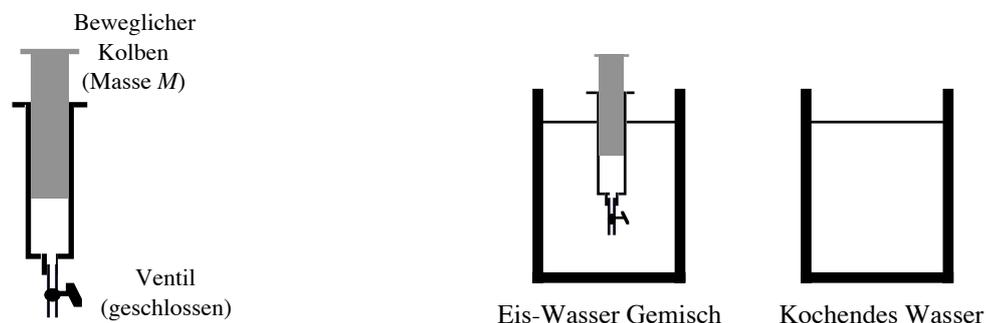


Abbildung 13: Skizzen zur Aufgabe zum idealen Gasgesetz

Da im Zustand thermischen Gleichgewichts auch der Kolben in Ruhe ist, muss die durch das Gas auf ihn ausgeübte Kraft nach Einführen in das heiße Bad wieder den gleichen Wert erreichen. Der Druck am Ende des Vorganges ist also gleich dem Anfangsdruck, d.h. es handelt sich (in quasistatischer Näherung) um einen isobaren Vorgang. Wegen des Temperaturanstiegs muss (entsprechend dem idealen Gasgesetz) das Volumen zunehmen.

Ergebnisse: Von den 72 abgegebenen Blättern trugen 68 ein richtiges Ergebnis bezüglich Druck und Volumen. Zwei Studierende antworteten, dass der Druck infolge der höheren Temperatur zunimmt. Beide hatten auch angegeben, dass das Volumen konstant ist, und zwar mit der Begründung, dass

wegen des geschlossenen Ventils keine Gasteilchen zu- oder abfließen können. Zwei weitere Studierende gaben andere oder missverständliche Antworten.

Die Vorstellung, dass bei steigender Temperatur der Druck eines Gases (ohne Berücksichtigung des Volumens) zunehmen muss, wurde bei Untersuchungen an mehreren amerikanischen Universitäten sehr häufig beobachtet. In einigen Fällen betrug der Anteil der richtigen Antworten weniger als 25%. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass etwa 15% der Studierenden in der vorliegenden Untersuchung zuerst antworteten, dass der Druck zunimmt, später dann aber ihre Meinung änderten.

Eine mangelnde Unterscheidung zwischen den Größen *Volumen* und *Teilchenzahl* (oder Anzahl der Mole) wurde in anderen Untersuchungen ebenfalls häufiger beobachtet. In der Regel zeigten etwa 15% der Studierenden in Einführungsvorlesungen der Physik oder Chemie Schwierigkeiten mit dem Verständnis des Volumens.

2.3.1.2 Avogadro'sches Gesetz

In der zweiten Aufgabe zum idealen Gas sollten zwei Behälter mit verschiedenen Gasen (Sauerstoff und Wasserstoff) bei gleichem Volumen, gleichem Druck und gleicher Temperatur bezüglich der Anzahl der enthaltenen Gasmoleküle verglichen werden.

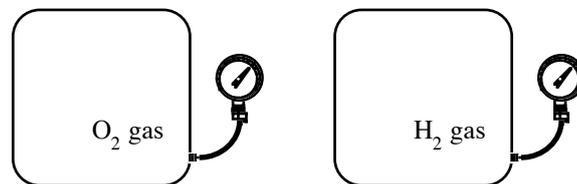


Abbildung 14: Skizzen zur Aufgabe zum Avogadro'schen Gesetz

Eine richtige Antwort (gleiche Anzahl an Wasserstoff- und Sauerstoffmolekülen) wurde von 40 Studierenden (etwa 55%) gegeben. 26 Studierende (etwa 35%) gaben an, dass die Anzahl der Sauerstoffmoleküle im linken Behälter geringer ist als die Anzahl der Wasserstoffmoleküle im rechten Behälter. Als Begründung für diese Antwort wurde oft angegeben, dass wegen der größeren Molmasse weniger Sauerstoffmoleküle benötigt werden, um den gleichen Druck zu erzeugen. In einigen Fällen wurde die Größe der Moleküle relativ zum Volumen des Behälters in Betracht gezogen. Mehrfach wurden aber auch unrichtige Antworten gegeben, deren Begründung in einer kurzen Rechnung bestand. Dabei wurde oft fälschlicherweise angenommen, dass die Masse oder Molmasse des Gases im idealen Gasgesetz auftritt, oder es wurde versucht, durch mehrfaches Umformen ein Bezug zur Masse herzustellen.

Untersuchungen in den Vereinigten Staaten ergaben eine Bandbreite von 35% bis 75% richtiger Antworten bei Tests im ersten und zweiten Studienjahr. Die am häufigsten auftretenden Begründungen für die unrichtigen Antworten sind mit den oben aufgeführten identisch.

2.3.2 ERSTER HAUPTSATZ DER THERMODYNAMIK

2.3.2.1 Prozesse mit oder ohne Verrichten von Arbeit

Die erste der beiden Aufgaben zum ersten Hauptsatz bezog sich auf zwei Zylinder, die gleiche Mengen eines idealen Gases enthalten. Die Ausgangszustände der beiden Systeme waren gleich. Zylinder A wurde dann bei festgehaltenem Kolben abgekühlt; Zylinder B bei beweglichem Kolben. (Das Abkühlen erfolgte in beiden Fällen durch Kontakt mit einem Eis-Wasser-Gemisch bei 0°C .) In Aufgabenteil (a) sollten die vier Zustandsgrößen T , V , P und U am Ende der beiden Prozesse miteinander verglichen werden. In Teil (b) sollte der Absolutbetrag der in den beiden Fällen übertragenen Wärme verglichen werden. Um eine Begründung wurde nur in Teil (b) gebeten.

Da sich in beiden Fällen thermisches Gleichgewicht einstellt, sind die Endtemperaturen der beiden Behälter gleich. In Zylinder A kann sich wegen des festgehaltenen Kolbens das Volumen nicht ändern. Infolge des idealen Gasgesetzes muss der Druck abnehmen. In Zylinder B bleibt wegen des frei beweglichen Kolbens der Druck konstant. Deshalb verringert sich das Volumen. Die innere Energie eines idealen Gases hängt jedoch nur von der Temperatur ab und ist deshalb in beiden Endzuständen gleich. Da die Umgebung bei der Verdichtung des Gases in Zylinder B positive Arbeit am System verrichtet, muss eine größere Wärmemenge abgegeben werden.

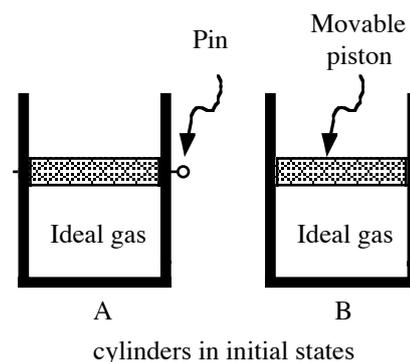


Abbildung 15: Skizze zur ersten Aufgabe zum ersten Hauptsatz

Ergebnisse: Von 64 abgegebenen Kurztests enthielten 63 eine richtige Antwort für die Temperatur ($T_A=T_B$), 60 eine richtige Antwort für das Volumen ($V_A>V_B$), und 56 eine richtige Antwort für den Druck ($P_A<P_B$). Der Vergleich der inneren Energien wurde hingegen nur von 40 Studierenden (63%) richtig angegeben ($U_A=U_B$). 11 Studierende (17%) gaben an, dass die innere Energie im Falle des beweglichen Kolbens am Ende größer ist ($U_A<U_B$). 8 (13%) gaben die umgekehrte Antwort ($U_A>U_B$); 5 (8%) gaben keine Antwort auf die Frage nach der inneren Energie.

Da in diesem Aufgabenteil nicht nach einer Begründung gefragt wurde, lässt sich nicht ermitteln, welche Vorstellungen zu den falschen Antworten auf diese Frage geführt haben. Die Vorstellung

eines Zusammenhangs zwischen Energie und Volumen wurde jedoch im Zusammenhang anderer mündlicher und schriftlicher Fragen bereits beobachtet. Vor allem die Schlussfolgerung, dass ein geringeres Volumen eine *größere* innere Energie zur Folge hat, wird oft mit dem Verhalten der mikroskopischen Gasteilchen begründet. In vielen Fällen verwiesen Studierende in den USA ausdrücklich auf die größere Teilchendichte und die dadurch häufigeren Zusammenstöße zwischen den Teilchen, die nach ihrer Vorstellung (manchmal: durch Reibung) zu einer größeren inneren Energie oder Temperatur führten. Möglicherweise könnten solche Vorstellungen auch hier zu unrichtigen Antworten geführt haben.

Für Teil (b) der ersten Frage wurden nur diejenigen Studierenden berücksichtigt, welche die obige Frage nach der inneren Energie richtig beantwortet hatten. Von diesen 40 Studierenden gaben nur 4 (10%) eine eindeutig richtige Antwort ($|Q_A| < |Q_B|$), 7 weitere (18%) antworteten „ $Q_A > Q_B$ “. Letztere Antwort ist formal richtig, da der Wärmeübertrag zum System in beiden Fällen negativ ist. (Diese Antwort wurde in der Regel durch Umformen des ersten Hauptsatzes erzielt.) Die häufigste Antwort (16mal; 40%) war, dass die übertragene Wärme in beiden Fällen gleich ist. Als Begründung wurde hierfür in der überwiegenden Zahl der Fälle angegeben, dass die Änderung der Temperatur oder der inneren Energie für beide Zylinder gleich ist. Dieses Ergebnis legt die Schlussfolgerung nahe, dass ein großer Teil der Studierenden noch kein solides Verständnis des ersten Hauptsatzes erreicht hat.

2.3.2.2 Prozesse mit oder ohne Austausch von Wärme

In der zweiten Aufgabe zum ersten Hauptsatz ging es um die Kompression gleicher Mengen eines idealen Gases unter verschiedenen Bedingungen: im Zylinder A mit ideal wärmeleitenden Wänden; im Zylinder B bei vollständiger thermischer Isolierung. In Teilaufgabe (a) sollten die beiden Endtemperaturen miteinander und mit der Umgebungstemperatur (T_U) verglichen werden; in Teilaufgabe (b) der Druck am Ende der beiden Prozesse. Abbildung 16 zeigt eine Skizze der beiden Zylinder, die der Aufgabe beigelegt war.

Wegen der ideal Wärme leitenden Wände von Zylinder A handelt es sich in diesem Fall um einen isothermen Prozess, d. h. das Gas im Inneren von Zylinder A ist ständig im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung. Die durch Arbeit zugeführte Energie muss also gleichzeitig als Wärme abgeführt werden, damit sich die innere Energie nicht ändert. Im Falle von Zylinder B verhindert die thermische Isolierung jeglichen Wärmeaustausch (d. h. es handelt sich um einen adiabaten Prozess). Die am Gas geleistete Arbeit führt deshalb zu einer Zunahme der inneren Energie und damit zu einem Ansteigen der Temperatur. Die Temperatur in Zylinder B ist also am Ende des Kompressionsprozesses höher als die Anfangstemperatur und damit auch höher als die Temperatur in Zylinder A.

Bei Kompression bis zum gleichen Endvolumen muss infolge der höheren Temperatur in Zylinder B entsprechend dem idealen Gasgesetz auch der Druck größer sein.

Ergebnisse: Nahezu alle Studierende beantworteten beide Fragen richtig (also $T_B > T_A = T_U$ und $P_B > P_A$). In vielen Fällen wurden jedoch unvollständige, zirkuläre oder unrichtige Begründungen gegeben. Einige Studierende versuchten zum Beispiel, $T_B > T_U$ allein mit dem idealen Gasgesetz zu begründen, oder $T_B > T_A$ mit dem größeren Druck in Zylinder B (was jedoch nur als Konsequenz der höheren Temperatur zu verstehen ist). In einigen Fällen wurde auch ungenaue Terminologie verwendet („Austausch“, „Abführen“ oder „Verlust“ von *Temperatur* anstatt von Wärme). Bei Untersuchungen in den Vereinigten Staaten, in denen die gleiche Aufgabe gestellt worden war, war der entsprechende Sprachgebrauch oft mit falschen Antworten verbunden, (z. B. dass die Temperatur infolge der thermischen Isolierung konstant bleibt). Dies scheint jedoch hier nicht der Fall zu sein.

Die oben beschriebenen Ergebnisse (nämlich richtige Antworten trotz unzureichender Begründungen) legen nahe, dass beide Aufgaben zum ersten Hauptsatz noch verbessert werden können. So sollte man in Zukunft in Teil (a) der ersten Aufgabe nach einer Begründung für den Vergleich der inneren Energien fragen. In der zweiten Aufgabe sollte auch nach der Änderung der inneren Energie gefragt werden. Zusätzlich wäre von Interesse, die in den beiden Zylindern am Gas geleistete Arbeit vergleichen zu lassen, um das Verständnis von Arbeit als (aufintegriertes) Produkt von Druck und Volumenänderung zu überprüfen.

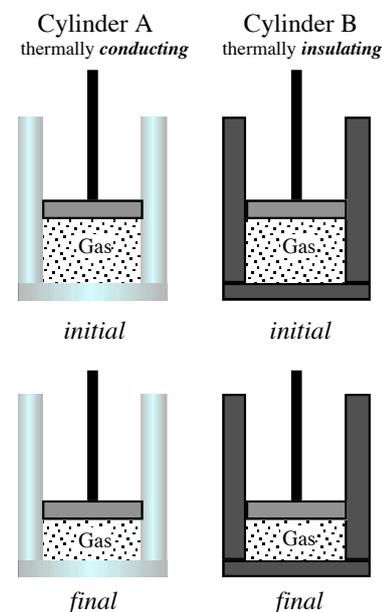


Abbildung 16: Skizze zur zweiten Aufgabe zum ersten Hauptsatz

2.3.3 ZWEITER HAUPTSATZ DER THERMODYNAMIK, WIRKUNGSGRAD

2.3.3.1 Zweiter Hauptsatz

In der Aufgabe zum zweiten Hauptsatz sollten die Studierenden die Durchführbarkeit von drei schematisch dargestellten Kreisprozessen beurteilen. Alle drei Prozesse finden zwischen zwei Wärmereservoirs mit festgelegten Temperaturen ($T_H = 800$ K und $T_L = 400$ K) statt. Die jeweils in einem Arbeitszyklus übertragene Wärme und geleistete Arbeit unterscheiden sich jedoch (wie aus den

Diagrammen ersichtlich) in Betrag und Vorzeichen. Die Summe aller zu- und abgeführten Energien ist in allen drei Prozessen gleich Null. Alle drei Entwürfe erfüllen also den ersten Hauptsatz.

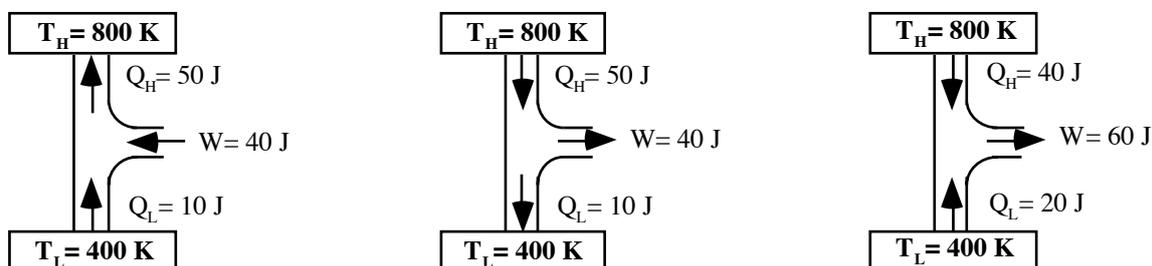


Abbildung 17: Schematische Darstellung der drei Kreisprozesse in der Aufgabe zum 2. HS.

Das erste Diagramm (a) zeigte einen Entwurf für eine Wärmepumpe (oder Kältemaschine), bei der 40 Joule Arbeit den Transport von 10 Joule Wärme vom kalten zum warmen Reservoir ermöglichen sollten. Bei dem gegebenen Verhältnis der beiden Temperaturen (2:1) liegt die am System verrichtete Arbeit weit über dem durch den zweiten Hauptsatz vorgegebenen Mindestwert von 10 Joule. Der Entwurf ist also theoretisch (d. h. unter Vernachlässigung von Reibungsverlusten) realisierbar.

Im zweiten Diagramm (b) sollten 50 Joule Wärme aus dem warmen Reservoir zu 80% als nutzbare Arbeit abgegeben werden. Nach dem zweiten Hauptsatz muss die an das kalte Reservoir abgegebene Wärme bei diesem Temperaturverhältnis jedoch mindestens 50% betragen (entsprechend einem Carnot-Wirkungsgrad von 0.5). Da dieser Prozess gerade die Umkehrung des vorigen darstellt, kann auch argumentiert werden, dass der Entwurf allein deshalb schon nicht realisierbar ist, da nur der Idealfall des Carnot-Prozesses umkehrbar ist. (Einer realisierbaren Kältemaschine entspricht also eine nicht realisierbare Wärmekraftmaschine.)

Dem dritten Diagramm (c) zufolge wird beiden Wärmereservoirs Wärme entnommen und als Arbeit abgegeben. Dieser Entwurf verletzt deshalb offensichtlich den zweiten Hauptsatz.

Ergebnisse: Etwa die Hälfte der teilnehmenden Studierenden (25 von 48, oder 52%) antwortete, dass Entwurf (a) durchführbar sei. Dabei wurde jedoch in keinem Fall das Erfüllen des zweiten Hauptsatzes explizit überprüft. Sechs Studierende (13%) überprüften immerhin die Energiebilanz. Jeweils 8 Studierende (17%) gaben als Begründung an, dass es sich um eine Kältemaschine handelte, oder gaben gar keine Begründung. Zwanzig Teilnehmer antworteten, dass der Entwurf nicht verwirklicht werden könnte. Die häufigste Begründung (13mal, 27%) war, dass in diesem Prozess Wärme vom kalten zum warmen Reservoir fließen müsste. Ein Viertel der Studierenden schien also Wärmetransport vom kalten zum warmen Reservoir (und damit die Existenz einer Wärmepumpe oder

Kältemaschine) als unmöglich anzusehen. Möglicherweise handelt es sich hier um ein grundlegendes Missverständnis des zweiten Hauptsatzes.

Der zweite Entwurf wurde von der Mehrheit der Studierenden (35 von 48 Teilnehmern, bzw. 73%) als durchführbar eingeschätzt. Die häufigsten Begründungen für diese (unrichtige) Antwort waren, dass es sich um eine Wärmekraftmaschine handelt (17%), dass die Energiebilanz stimme (13%), oder dass die Wärme vom warmen zum kalten Reservoir fließe (13%). Die Begründungen stimmen damit also mit denen im vorigen Beispiel weitgehend überein. Dies deutet daraufhin, dass viele Studierende in sich konsistente Vorstellungen von der Durchführbarkeit von Kreisprozessen haben, die jedoch ein richtiges Verständnis des zweiten Hauptsatzes nicht einschließen. Wegen der guten Übereinstimmung der Begründungen kann man auch davon ausgehen, dass die Beantwortung der Fragen nicht willkürlich oder durch Raten erfolgte.

Entwurf (c) wurde von den meisten Teilnehmern (35 von 48, bzw. 73%) richtigerweise als nicht realisierbar angesehen. Elfmal (23%) wurde als Begründung ausdrücklich angegeben, dass nicht die ganze den beiden Reservoiren entnommene Wärme als Arbeit abgegeben werden könnte. Sechs weitere Studierende (13%) gaben andere richtige Begründungen an. Die Unmöglichkeit der vollständigen Umwandlung von thermischer Energie in nutzbare Arbeit als ein Teilaspekt des zweiten Hauptsatzes scheint also von der Mehrheit der Studierenden verstanden worden zu sein. Acht Teilnehmer (17%) gaben an, dass der Prozess durchführbar sei. Die Begründungen hierfür waren uneinheitlich und zum Teil nicht nachvollziehbar. In drei dieser Fälle (6% aller Teilnehmer) wurde keine Begründung angegeben.

2.3.3.2 Wirkungsgrade

In der Aufgabe zum Wirkungsgrad waren zwei Kreisprozesse für Wärmekraftmaschinen gegeben. Prozess A war im *PV*-Diagramm als Dreieck, Prozess B als Quadrat dargestellt. Den beiden Prozessen waren zwei Teilprozesse gemeinsam: isochores Erwärmen bei minimalem Volumen V_1 , sowie anschließendes isobares Erwärmen bei maximalem Druck P_2 . In Teilaufgabe (a) sollte der Umlaufsinn der beiden Prozesse im jeweiligen Diagramm eingezeichnet werden. In Teil (b) sollten diejenigen Teilprozesse identifiziert werden, in denen dem System Wärme zugeführt wird. Diese Teilaufgabe war vor allem als Hilfestellung für den folgenden Teil gedacht, in dem die Wirkungsgrade der beiden Prozesse verglichen werden sollten.

Da es sich um Wärmekraftmaschinen handelt, werden beide Prozesse im Uhrzeigersinn durchlaufen, sind also „rechtslaufend“. Wärmezufuhr erfolgt beim isochoren und isobaren Erwärmen, also gerade in den beiden Teilprozessen, die den beiden betrachteten Kreisprozessen gemeinsam sind. Da die verrichtete Arbeit der im *PV*-Diagramm eingeschlossenen Fläche entspricht, muss nach der Definition

des Wirkungsgrades (Verhältnis von Netto-Arbeit zu zugeführter Wärme) Prozess B einen höheren Wirkungsgrad besitzen.

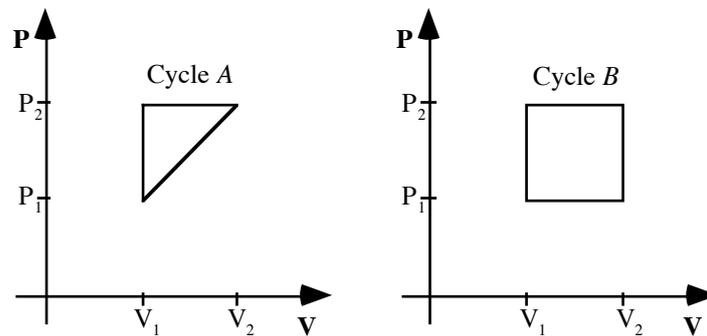


Abbildung 18: Darstellung der beiden Kreisprozesse im PV-Diagramm. (Aufgabe zum Wirkungsgrad)

Ergebnisse: Von den 48 abgegebenen Kurzttests zeigten 26 (54%) richtige Umlaufsinn für beide Prozesse. Sechs Teilnehmer (13%) stellten beide Prozesse als linkslaufend dar. Fünfmal wurden für die beiden Prozesse verschiedene Umlaufsinn angegeben (10%). Zehn Teilnehmer (21%) ließen Aufgabenteil (a) unbeantwortet.

Teilaufgabe (b) wurde nur von etwa zwei Dritteln der Studierenden beantwortet. Von ihnen markierten 8 (also 17% aller Teilnehmer) die richtigen Teilprozesse in beiden Diagrammen. Die häufigste Antwort war, dass Wärme nur in der isochoren Zustandsänderung bei V_1 zugeführt werde. Eine Begründung für diese Antwort wurde in den meisten Fällen nicht gegeben. Möglicherweise hielten manche Studenten die Zufuhr von Wärme und das Verrichten von Arbeit für unvereinbar.

Etwa ein Drittel der Studierenden antwortete, dass Prozess B den höheren Wirkungsgrad habe. Allerdings wurde diese richtige Antwort nur von 8 Teilnehmern (17%) richtig und mit der vorigen Antwort konsistent begründet. Knapp die Hälfte aller Teilnehmer ließ diesen Aufgabenteil unbeantwortet, was jedoch Aussagen der Studierenden zufolge in der Regel nicht aus Zeitgründen geschah.

2.3.4 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE ZUR THERMODYNAMIK

Die oben beschriebenen Ergebnisse deuten daraufhin, dass auch auf dem Gebiet der Thermodynamik eine Reihe von Verständnisschwierigkeiten vorliegt. Insbesondere zeigten sich Schwierigkeiten hinsichtlich des Avogadro'schen Gesetzes sowie des ersten und zweiten Hauptsatzes. Allerdings sollte auch erwähnt werden, dass Schwierigkeiten beim Verständnis der Gasgrößen Druck, Volumen und Temperatur deutlich weniger häufig auftraten als in den in den Vereinigten Staaten untersuchten Lehrveranstaltungen.

3. UNTERSUCHUNG IM AUSLANDSORIENTIERTEN STUDIENGANG GES

Diese Untersuchung wurde wesentlich durch das Interesse an auslandsorientierten Studiengängen (AOS) an der TUHH motiviert. Aus diesem Grund wurde ein Teil der beschriebenen Aufgaben auch in den englischsprachigen Lehrveranstaltungen des Studienganges *General Engineering Science (GES)* gestellt. Wegen der geringen Anzahl der Studierenden in diesem Studiengang lassen sich jedoch nur in geringem Maße verlässliche Aussagen über deren fachliches Verständnis machen. Im Folgenden werden die Einzelheiten der Teiluntersuchung im Studiengang GES beschrieben und die sich in den Ergebnissen abzeichnenden Tendenzen diskutiert.

3.1 AUFGABEN UND ERBEBNISSE IM STUDIENGANG GES

In den englischsprachigen Lehrveranstaltungen des Studienganges *General Engineering Science* wurden insgesamt drei Kurztests durchgeführt; zwei Tests im Fach *Engineering Mechanics II*, sowie ein Test im Fach *Electrical Engineering Fundamentals II*. Mit Ausnahme der Aufgabe zum N-Rohr, die durch eine ähnliche Aufgabe ersetzt wurde, wurden alle Aufgaben aus der Vorlesung *Mechanik für Ingenieure II* auch in der entsprechenden englischsprachigen Veranstaltung gestellt. Auf dem Gebiet der Elektrotechnik konnten nur die beiden Aufgaben zum Gleichstromkreis eingesetzt werden. (Alle Aufgaben in den englischsprachigen Veranstaltungen waren ins Englische übersetzt worden. Die beigefügten Skizzen waren jeweils mit denen der deutschen Aufgaben identisch.)

3.1.1 MECHANIK

3.1.1.1 Baseballschläger-Aufgabe

Die englische Fassung der in Abschnitt 2.1.1.1 beschriebenen Baseballschläger-Aufgabe wurde erst einige Wochen nach der deutschen Fassung gestellt. Dadurch kann nicht ausgeschlossen werden, dass einige Teilnehmer der englischsprachigen Lehrveranstaltung die in der Zwischenzeit öffentlich einsehbaren Musterantworten zur Kenntnis genommen hatten.⁷ Dennoch gaben auch hier nur 6 der 11 teilnehmenden Studierenden (55%, gegenüber 30% in der deutschsprachigen Vorlesung) eine richtige Antwort auf beide Teilaufgaben. Vier Studierende (35%, gegenüber 55%) antworteten, dass die Massen der beiden Teile gleich seien. Ein Student gab an, dass der Schwerpunkt rechts vom Punkt P liegen müsse. Dieses Ergebnis bedeutet also, dass die in der deutschsprachigen Lehrveranstaltung festgestellte Schwierigkeit beim Verständnis des Massenmittelpunktes auch hier auftritt. Da dieses Ergebnis aus obigen Gründen jedoch als obere Schranke für einen Testablauf unter identischen Bedingungen betrachtet werden muss, lässt sich nichts darüber aussagen, ob diese Verständnisschwierigkeit in den beiden Gruppen mit unterschiedlicher Häufigkeit auftritt.

Die folgenden beiden Aufgaben wurden jeweils zuerst in der englischsprachigen Lehrveranstaltung gestellt, ohne dass allerdings Musterlösungen veröffentlicht wurden. Es ist deshalb anzunehmen, dass die Teilnehmer in *keiner* der beiden Vorlesungen vorher Kenntnis von der Aufgabe hatten.

3.1.1.2 U-Rohr

Auch bei dieser Aufgabe schnitten die Studierenden in der englischsprachigen Lehrveranstaltung etwas besser ab. Von 16 Teilnehmern zeichneten 15 (etwa 95% gegenüber 75%) die Füllhöhe im rechten Schenkel richtig ein. Wegen der geringen Teilnehmerzahl kann das unterschiedliche Ergebnis jedoch nicht als signifikant betrachtet werden.⁸

3.1.1.3 Drei-Würfel-Aufgabe

Bei der Drei-Würfel-Aufgabe zur Auftriebskraft erzielten die Studierenden in der englischsprachigen Veranstaltung ein etwas schlechteres Ergebnis. Von den 16 Teilnehmern antworteten nur 6 (etwa 40% gegenüber 60%), dass die Auftriebskräfte für alle drei Würfel gleich seien. Wiederum gilt jedoch, dass das Ergebnis nach den üblichen Kriterien nicht signifikant ist.⁹

3.1.2 ELEKTROTECHNIK

3.1.2.1 Fünf-Lampen-Aufgabe

Bei der Fünf-Lampen-Aufgabe schnitten die Teilnehmer der englischsprachigen Lehrveranstaltung ebenfalls etwas schlechter ab als die Hörer und Hörerinnen der deutschsprachigen Vorlesung. Von 11 Teilnehmern gaben 5 eine richtige Antwort (also 45% gegenüber 60% in der deutschsprachigen Lehrveranstaltung). Auch in diesem Fall kann das Ergebnis nicht als signifikant betrachtet werden.¹⁰

3.2 ZUM VERGLEICH DER STUDIENGÄNGE AIW UND GES

Aufgrund der oben beschriebenen Ergebnisse lässt sich nicht beurteilen, ob die in den einzelnen Gebieten auftretenden Verständnisschwierigkeiten unter den Teilnehmern der deutschsprachigen oder englischsprachigen Lehrveranstaltungen unterschiedlich häufig verbreitet sind. Die Ergebnisse sind insofern uneinheitlich, als die Studierenden im Studiengang GES bei zwei der vier gemeinsamen Aufgaben besser abschnitten, bei den anderen beiden Aufgaben jedoch ein schlechteres Ergebnis erzielten. Obwohl die Unterschiede im Anteil der richtigen Antworten zum Teil 20% betragen, ist wegen der geringen Zahl der GES-Studierenden keines der Ergebnisse als signifikant anzusehen.

Damit lässt sich insbesondere keine belastbare Aussage darüber machen, ob die formal unterschiedlichen Anforderungen in der Lehrveranstaltung *Engineering Mechanics* (im Wesentlichen die

Bewertung von wöchentlichen Hausarbeiten, sowie, im Verlauf des Semesters, mehrerer *Quizzes* und *Exams*) einen positive Veränderung des Lernerfolgs mit sich gebracht haben. Um eine Antwort auf diese Frage zu erlangen, ist es notwendig, ein derartiges „Experiment“ über mehrere Semester fortzusetzen. Darüber hinaus muss unbedingt geklärt werden, ob die Studierenden der beiden Studiengänge (*General Engineering Science* und Allgemeine Ingenieurwissenschaften) ein vergleichbares Eingangsniveau besitzen.¹¹ (Siehe hierzu auch Abschnitt 5.2.2.)

Persönliche Gespräche mit mehreren Studierenden im Studiengang GES ergaben folgende Selbsteinschätzung: Die Teilnehmer der Lehrveranstaltung *Engineering Mechanics* waren der Meinung, sie seien auf „übliche Lehrbuchaufgaben“ in der Mechanik besser vorbereitet als die Teilnehmer der entsprechenden deutschsprachigen Vorlesung und könnten diese deshalb schneller und möglicherweise mit größerem Erfolg bearbeiten. Andererseits gingen sie auch davon aus, dass ihnen ihre Kommilitonen und Kommilitoninnen aus dem Studiengang AIW möglicherweise in der Bearbeitung unbekannter und neuartiger Problemstellungen überlegen seien. Diese Einschätzung mag zutreffen, lässt sich aber nicht durch Daten belegen. Eine langfristige Fortsetzung dieser Untersuchung erscheint notwendig, um einer Antwort auf diese Frage näher zu kommen.

4. FOLGERUNGEN AUS DEN EMPIRISCHEN ERGEBNISSEN

Auch wenn die Resultate der oben beschriebenen Testaufgaben in einzelnen Fällen überraschen mögen, bestätigen sie doch weitgehend die Ergebnisse einer großen Anzahl ähnlicher Untersuchungen. In diesem Kapitel sollen deshalb einige allgemeine Ergebnisse der fachdidaktischen Forschung erwähnt und anhand von Beispielen aus dieser Untersuchung erläutert werden.¹²

Die Fähigkeit, quantitative Aufgaben zu lösen, ist nicht gleichbedeutend mit einem qualitativen (oder „konzeptionellen“) Verständnis des Lehrstoffes.

Studierende, die in der Lage sind, komplizierte natur- oder ingenieurwissenschaftliche Aufgaben erfolgreich zu lösen, haben oft ein ungenügendes oder mangelhaftes qualitatives Verständnis des Lehrstoffes. Diese These, die bereits am Ausgang unserer Untersuchung stand und wesentlich die Methode der Untersuchung bestimmte, wird durch die Ergebnisse vieler früherer Studien gestützt.¹³ Sie erfährt erneute Bestätigung durch mehrere Beispiele im vorliegenden Bericht.

Auch wenn eine derartige Aufgabe nicht gestellt wurde, bestehen kaum Zweifel, dass nahezu alle Teilnehmer der Vorlesung *Grundlagen der Elektrotechnik II* in der Lage wären, das Ohm'sche Gesetz ($I=U/R$) in einfachen Reihen- oder Parallelstromkreisen anzuwenden und bei gegebenen Spannungs- und Widerstandswerten die entsprechenden Ströme richtig zu berechnen. Trotzdem zeigten viele der Studierenden zum Teil erhebliche Schwierigkeiten bei der Beantwortung der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Aufgaben, in der die Helligkeit mehrerer identischer Glühlampen in einfachen Stromkreisen verglichen werden sollte. Dabei ist zu betonen, dass die Schwierigkeiten *nicht* im Verständnis der Fragestellung lagen, sondern im Auffinden der richtigen Antwort.

Falsche Anwendung von Formeln deutet oft auf tiefer gehende Missverständnisse hin.

Eine falsche Anwendung von Formeln, die als ein Flüchtigkeitsfehler interpretiert werden könnte, ist oft ein Anzeichen von tiefer gehenden Missverständnissen. Beim Vergleich von Auftriebskräften, die in derselben Flüssigkeit auf drei gleich große Würfel wirken, verwendeten einige Studierende die Formel für die Auftriebskraft ($F_A = \rho Vg$) mit der Dichte des untergetauchten Körpers anstatt der ihn umgebenden Flüssigkeit. Betrachtet man nur diese Antworten, ließe sich leicht der Schluss ziehen, es handle sich um einen Flüchtigkeitsfehler. Bei Betrachtung aller Antworten zeigt sich jedoch, dass nahezu ein Drittel aller Studierender der Meinung sind, dass die Auftriebskraft auf einen Körper von dessen Masse abhängt. Eine Studie an der University of Washington zeigte ähnliche Ergebnisse¹⁴.

Das Auswendiglernen von Lehrinhalten führt in der Regel nicht zur Fähigkeit, diese in einem neuen Zusammenhang anzuwenden.

Wichtige Inhalte ("Merksätze") werden in Vorlesungen oft so vermittelt, dass die Studierenden auch lange Zeit später noch in der Lage sind, diese Inhalte wortgetreu wiederzugeben. Diese auf den ersten Blick erfolgreiche Vermittlung des Lehrstoffes bedeutet jedoch nicht, dass die Studierenden in der Lage sind, diese Ergebnisse in einem ihnen unbekanntem Zusammenhang anzuwenden.

Die Bedingungen für das statische Gleichgewicht des starren Körpers, "Gesamtkraft gleich Null" und "Gesamtdrehmoment gleich Null", können vermutlich von jedem Studierenden wörtlich zitiert werden. Weniger als ein Drittel aller Studierenden waren jedoch in der Lage, dieses Ergebnis erfolgreich auf einen im Schwerpunkt festgehaltenen Baseballschläger anzuwenden. Die Mehrheit der Studierenden schien davon auszugehen, dass nicht die Momente sondern die Massen auf beiden Seiten des Drehpunktes gleich seien.

Ähnliche Fehlvorstellungen (misconceptions) können in verschiedenen inhaltlichen Zusammenhängen beobachtet werden.

Das oben beschriebene Ergebnis der Aufgabe zur Statik, sowie das Ergebnis einer Aufgabe zur Hydrostatik deuten darauf hin, dass auf beiden Gebieten erhebliche Schwierigkeiten beim Verständnis der Gleichgewichtsbedingungen bestehen. Mehr als die Hälfte der anwesenden Studierenden in der Vorlesung "Mechanik II für Ingenieure" schien der Meinung zu sein, ein Gegenstand werde vom Schwerpunkt in Teile gleicher Masse geteilt. Etwa ein Viertel der Studierenden schien davon auszugehen, dass kommunizierende Röhren je nach Durchmesser verschiedene Füllhöhen aufweisen müssten, um (durch gleiche Masse oder gleiches Volumen auf beiden Seiten) Gleichgewicht zu ermöglichen. (Siehe Abschnitte 2.1.1.1 und 2.1.2.1.) In beiden Fällen mag die Vorstellung zugrunde liegen, dass Gleichgewicht nur bei "Gleichheit der Massen auf beiden Seiten" vorliegen kann (anstelle gleicher Momente oder gleicher Drücke).

In der wissenschaftsdidaktischen Literatur finden sich verschiedene Ansätze, die zur Erklärung dieses Sachverhalts beitragen können. Minstrell¹⁵ und diSessa¹⁶ schlagen vor, Antworten der Studierenden auf physikalische Fragen als Ausdruck von *facets* (Facetten) bzw. *phenomenological primitives* (phänomenologische Grundbausteine) zu betrachten. (Ähnliches haben auch Stavy und Tirosh mit so genannten *intuitive rules* versucht.¹⁷) Beide Ansätze wurden in erster Linie dazu entwickelt, unterschiedliche Antworten auf gleichartige Fragen mit verschiedenen äußerlichen Merkmalen zu erklären. (Zum Beispiel schlägt Minstrell vor, dass im Zusammenhang mit dem Newton'schen Kraftbegriff verschiedene *facets* miteinander konkurrieren. Auf diese Weise versucht er die scheinbar willkürliche Anwendung bzw. Nicht-Anwendung des dritten Axioms durch seine Schüler zu

erklären.¹⁸⁾ Umgekehrt können die beiden Modelle möglicherweise dabei helfen, vergleichbare Antworten auf Fragen mit unterschiedlichen physikalischen Hintergründen in Verbindung zu bringen. Man könnte also die Existenz eines *facet* „Gleichgewicht setzt gleiche Masse voraus“ postulieren. Da die Anwendbarkeit eines *facet* (für den Lernenden) jedoch nicht vorhersagbar ist, lässt sich dieser Ansatz allerdings nur als Ordnungsschema und nicht als Theorie des Lernens verwenden.

Widersprüche zwischen den eigenen Vorstellungen und alltäglichen Beobachtungen werden von den Studierenden oft nicht von selbst wahrgenommen.

In den beiden oben erwähnten Stoffgebieten (Statik und Hydrostatik) ist bemerkenswert, dass die gefundene "Fehlvorstellung" (*misconception*) durch einfache Experimente oder sogar alltägliche Beobachtungen widerlegt werden kann.¹⁹⁾ Dieser Sachverhalt steht jedoch im Einklang mit einem allgemein anerkannten Ergebnis der wissenschaftsdidaktischen Forschung: Widersprüche zwischen der eigenen Vorstellung und beobachtbaren Tatsachen (und deshalb auch zwischen der eigenen Vorstellung und der in der Lehre dargestellten wissenschaftlichen Sichtweise) werden vom Lernenden oft nicht spontan wahrgenommen, sondern müssen ihm (oder ihr) explizit bewusst gemacht werden. Erfolgreiches Lernen wird also oft erst dadurch ermöglicht, dass der Lernende veranlasst wird, selbst seine Vorstellungen zu formulieren, deren Unvereinbarkeit mit beobachtbaren Tatsachen (oder mit dem Lehrinhalt) zu erkennen und seine Vorstellungen mithilfe des gültigen wissenschaftlichen Modells zu korrigieren. (Man vergleiche die in der Literatur beschriebene Lehrstrategie: "*Elicit, Confront, Resolve*".²⁰⁾)

Ein weiteres Beispiel für den eben beschriebenen Sachverhalt stellt die Aufgabe zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik dar. Bei der Beantwortung dieser Aufgabe schienen viele Studierende davon auszugehen, dass das Funktionieren einer Kältemaschine (oder Wärmepumpe) durch den zweiten Hauptsatz nicht nur bestimmten Regeln unterworfen, sondern prinzipiell ausgeschlossen ist. Dass diese Vorstellung durch die Existenz eines täglich benutzten Haushaltsgerätes (Kühlschrank) widerlegt wird, ist demnach für die Studierenden nicht offensichtlich.

Fehlvorstellungen können durch falsche Verallgemeinerung eines in einem speziellen Fall zutreffenden Ergebnisses entstehen.

Ergebnisse einer Aufgabe zum hydrostatischen Druck sprechen dafür, dass zwischen einem Drittel und der Hälfte der Studierenden den hydrostatischen Druck an einem Punkt als "Gewicht der darüber liegenden Flüssigkeit" (pro Fläche) interpretieren. Wie die in Abschnitt 2.1.2.2 beschriebene Aufgabe zeigt, entspricht diese Vorstellung nicht dem wissenschaftlich richtigen Verständnis und führt zu einer falschen Rangfolge der Drücke an den gegebenen Punkten. Im Fall rechtwinkliger Behälter mit von der Höhe unabhängigem Querschnitt (also einer Situation, die in Lehrbüchern oft zur Einführung des

hydrostatischen Druckes verwendet wird) führt diese vereinfachende Sichtweise jedoch deshalb zu einem richtigen Ergebnis, weil die Behälterwände keine vertikalen Kräfte auf die Flüssigkeit ausüben. Es ist anzunehmen, dass viele Studierende dieses Ergebnis in falscher Weise verallgemeinern und dadurch zu der beschriebenen unrichtigen Vorstellung gelangen.²¹

Ein weiteres Beispiel einer Fehlvorstellung, die vermutlich aus einer falschen Verallgemeinerung resultiert, stellt die Kinematik-Aufgabe in Abschnitt 2.1.3.1 dar. Etwa 15 Studierende zeichneten Beschleunigungsvektoren ein, die zum Mittelpunkt oder „Brennpunkt“ des Ovals zeigten. Dieser Antwort, die in anderen Untersuchungen zum Teil noch häufiger beobachtet wurde, scheint die Vorstellung zugrunde zu liegen, dass es bei einer Bewegung mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag auf einer ovalen Bahnkurve (wie im Spezialfall eines Kreises) einen Punkt geben muss, auf den alle Beschleunigungsvektoren hinzeigen.

Verständnisschwierigkeiten bei fortgeschrittenen Themen können durch mangelndes Verständnis der Grundlagen hervorgerufen oder verstärkt werden.

Die oben erwähnte Verständnisschwierigkeit im Zusammenhang mit dem hydrostatischen Druck (Druck als „Gewicht pro Fläche“) lässt sich auch in Verbindung mit bereits bekannten Schwierigkeiten bezüglich des Kraftbegriffs und der Newton'schen Axiome verstehen. Eine Untersuchung an der *University of Washington* hat gezeigt, dass Studierende, die Schwierigkeiten bei der Unterscheidung verschiedenartiger Kräfte in einer einfachen Mechanikaufgabe haben, Fragen zum hydrostatischen Druck wesentlich häufiger auf eine Weise beantworten, die mit der Vorstellung von Druck als „Gewicht pro Fläche“ konsistent ist.²² Dieses Ergebnis ist besonders deshalb interessant, weil der Autor der Studie auch feststellt, dass die beiden Gruppen (Mechanikaufgabe richtig bzw. falsch beantwortet) in ihrer Durchschnittsnote nahezu identisch sind. Die oben beschriebene Schwierigkeit bei der Interpretation des hydrostatischen Druckes ist also nicht ein Merkmal von generell schwächeren Studierenden, sondern muss als Folge spezifischer Schwierigkeiten beim Kraftverständnis gesehen werden.

Lehre in weiterführenden Veranstaltungen trägt oft nicht dazu bei, das Verständnis der Grundlagen zu verbessern.

Aus der Tatsache, dass mangelndes Verständnis der Grundlagen zu Schwierigkeiten mit Spezialthemen führen kann, lässt sich auch folgern, dass die Lehre in weiterführenden Lehrveranstaltungen oft nicht den erhofften Effekt hat, das Verständnis der Grundlagen zu festigen und zu verbessern. Ein weiteres Beispiel hierfür sind die in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Aufgaben zum Gleichstromkreis, die in der Lehrveranstaltung *Grundlagen der Elektrotechnik II* gestellt wurden, also zu einem

Zeitpunkt, als in der Vorlesung bereits weiterführende Themen (Wechselstromkreise) behandelt wurden.

Ausdrückliches Ansprechen der Schwierigkeiten in der Vorlesung führt nicht immer zu deren Überwindung

Auf die bei vielen Studenten vorhandenen konzeptionellen Schwierigkeiten muss in den Lehrveranstaltungen eingegangen werden. Allerdings reicht es dabei in der Regel nicht aus, dass der Dozent in der Vorlesung auf diese Schwierigkeiten ausdrücklich hinweist. Selbst wenn den Studierenden die Möglichkeit gegeben wird, diese Schwierigkeiten im Rahmen eines Quiz selbst wahrzunehmen, hat die anschließende Klarstellung seitens des Dozenten nicht immer die erhoffte Wirkung. Die oben diskutierten Schwierigkeiten auf dem Gebiet der Elektrotechnik im Zusammenhang mit der Spannung im Parallelstromkreis können hierfür als Beispiel dienen.

In den beiden Aufgaben zum Gleichstromkreis (Abschnitt 2.2.1) gaben etwa 25% der Studierenden Antworten, die einer falschen Vorstellung von der Batterie als Quelle konstanten Stroms entsprechen. („ $A > D = E$ “ für die Fünf-Lampen-Aufgabe, „A bleibt gleich bei Schließen des Schalters“ für die Vier-Lampen-Aufgabe.) Obwohl beide Aufgaben in der auf den Test folgenden Vorlesung besprochen wurden, trat die gleiche Schwierigkeit mit nahezu identischer Häufigkeit in der Aufgabe zum Kondensator erneut auf. (In diesem Fall führte sie zu der Antwort, dass die Helligkeit von Lampe B bei geschlossenem Schalter zunimmt.)

Ähnliches trifft auf die in den ersten beiden Aufgaben beobachtete Schwierigkeit mit der Ladungserhaltung in der Reihenschaltung zu. Diese falsche Vorstellung trat im Zusammenhang mit der (schwierigeren) Aufgabe zum Kondensator sogar noch häufiger auf als bei den ersten beiden Aufgaben.

5. SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Die hier beschriebene Untersuchung hat bei den Studierenden in den ingenieurwissenschaftlichen Grundlagenvorlesungen eine Reihe von konzeptionellen Schwierigkeiten bezüglich des Stoffes der jeweiligen Lehrveranstaltungen festgestellt. In der Mehrzahl der Fälle liegt die Häufigkeit dieser Verständnisschwierigkeiten unter dem bei amerikanischen Studierenden²³ beobachteten Maß. Dieses Ergebnis sollte jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass es sich in einigen Fällen um sehr grundlegende physikalische Zusammenhänge handelt, die von einer recht großen Anzahl von Studierenden missverstanden werden.

Es besteht demnach ein Bedarf an gezielten Maßnahmen, mit deren Hilfe eine schrittweise Verbesserung der Lehre insbesondere hinsichtlich des qualitativen Verständnisses der Studierenden erreicht werden kann. Im Folgenden stellen wir einige Ansätze vor, die bereits an mehreren *Colleges* und Universitäten in den Vereinigten Staaten mit nachweisbarem Erfolg angewandt werden.

5.1 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE BETRACHTETEN LEHRVERANSTALTUNGEN

Die Ergebnisse dieser und anderer Untersuchungen deuten darauf hin, dass für viele Studierende traditionelle Lehrveranstaltungen (wie Vorlesungen, Übungen und Laborpraktika) oft nicht ausreichend sind, um weit verbreitete Verständnisschwierigkeiten zu überwinden. Unter den Vertretern der Physik-Didaktik (*Physics Education Research*) in den Vereinigten Staaten herrscht deshalb weitgehende Übereinstimmung, dass den Studierenden die Möglichkeit gegeben werden muss, sich ihrer intuitiven Vorstellungen bewusst zu werden, diese Vorstellungen in einer Reihe von Situationen auf ihre Richtigkeit zu überprüfen und sie gegebenenfalls zu korrigieren. Die Umsetzung dieses Lehrprinzips kann im Rahmen verschiedener Strukturen und auf verschiedene Weise versucht werden; zum Beispiel in Übungen, Vorlesungen, oder so genannten Studio-Kursen.²⁴ Letztere stellen eine aus Vorlesung, Laborpraktikum und Übungen integrierte Lehrveranstaltung dar, die in der Regel eine radikale Umstrukturierung des Lehrbetriebs erforderlich macht. Die Diskussion in den folgenden beiden Abschnitten beschränkt sich deshalb auf die Modifikation der „traditionellen“ Strukturen wie Vorlesung und Übungen.

5.1.1 NEUE LEHRFORMEN IN ÜBUNGEN (WORKSHOPS)

Als Beispiel für erfolgreiches Lernen in Übungen (*Workshops*) sollen kurz die an der *University of Washington* entwickelten *Tutorials in Introductory Physics* beschrieben werden. Kernstück dieser Unterrichtsform sind die gleichnamigen Arbeitsblätter,²⁵ die von der *Physics Education Group* auf der Grundlage von Forschungsergebnissen der fachspezifischen Hochschuldidaktik geschaffen wurden.²⁶ Jedes dieser Arbeitsblätter enthält eine genau strukturierte Folge von Fragen und Problemstellungen,

die von den Studierenden gemeinsam bearbeitet werden sollen. Die *Tutorials* sind nicht als eigenständiges Unterrichtswerk gedacht, sondern sollen in Verbindung mit Vorlesungen und Lehrbüchern das qualitative Verständnis der physikalischen Begriffe fördern.²⁷ Ein weiteres Ziel dieser Lehrmaterialien ist es, den Studierenden durch einen aktiven Prozess des Lernens die Fähigkeit zum selbständigen wissenschaftlichen Denken zu vermitteln.

Die Bearbeitung der *Tutorial*-Arbeitsblätter erfolgt überwiegend in Kleingruppen von drei oder vier Studierenden. Eine Übungsgruppe von 20 bis 24 Teilnehmern setzt sich also in der Regel aus bis zu sechs Kleingruppen zusammen. Für eine angemessene Betreuung der Studierenden während dieser einstündigen Veranstaltungen ist der Einsatz von zwei Lehrkräften ratsam. Um die dadurch entstehenden Mehrkosten in Grenzen zu halten, bietet sich der Einsatz von *student instructors* an, d. h. Studierenden, welche die gleiche Lehrveranstaltung in einem früheren Semester erfolgreich abgeschlossen haben und für ihre Mithilfe in der Lehre entweder in geringem Umfang bezahlt werden oder *academic credit* (d. h. die Bescheinigung der erfolgreichen Teilnahme an einer Lehrveranstaltung) erhalten. Im letzteren Fall wird von den Studierenden in der Regel zusätzlich die Teilnahme an einem Seminar zum naturwissenschaftlichen Unterrichten erwartet.

Um die Akzeptanz der *tutorial workshops* bei der Mehrheit der Studierenden zu erreichen, hat es sich an vielen Institutionen bewährt, diese Übungsgruppen *nicht* als zusätzliche Veranstaltung auf freiwilliger Basis anzubieten, sondern sie als Teil des für alle Studierenden verbindlichen Studienplans zu betrachten. Qualitative Aufgaben von der Art wie sie in den Arbeitsblättern auftreten, sollten dann auch unbedingt Gegenstand der Klausuren sein.

Die hier beschriebenen *Tutorials* werden inzwischen bereits an einer Reihe von amerikanischen Colleges und Universitäten eingesetzt. *Workshops*, die ähnliche Prinzipien auf andere Weise umzusetzen versuchen, haben sich bereits an einer noch größeren Zahl von Hochschulen durchgesetzt. Die wesentlichen Unterschiede zwischen dieser Lehrform und herkömmlichen Übungsgruppen, wie sie an vielen Hochschulen in Deutschland zu finden sind, bestehen zum einen im hohen Grad an selbständiger Arbeit der Studierenden in der Übungsgruppe (und der damit veränderten Rolle des Übungsgruppenleiters) sowie in der speziellen Ausrichtung der Arbeitsmaterialien auf die Überwindung spezifischer, weit verbreiteter Verständnisschwierigkeiten.

5.1.2 INTERAKTIVER VORLESUNGSBETRIEB

An einigen Hochschulen in den USA wird zudem versucht, die oben beschriebene Art des Lehrens auf Vorlesungen mit bis zu 300 Hörern und Hörerinnen zu übertragen. Eric Mazur, Professor für Physik an der Harvard University, propagiert eine Methode, die er als *Peer Instruction* bezeichnet.²⁸ Sie basiert auf der Einsicht, dass in der Vorlesung verbrachte Zeit sinnvoller genutzt werden kann, als

das bisher üblicherweise der Fall ist. Gegenstand einer Vorlesung sollte es nach Mazurs Meinung nicht sein, die im Lehrbuch oder Skriptum beschriebenen Sachverhalte erneut darzustellen, sondern viel mehr, den Studierenden Gelegenheit zu geben, mögliche Verständnisschwierigkeiten zu erkennen und Widersprüche zwischen der wissenschaftlichen Sichtweise und ihren Alltagsvorstellungen wahrzunehmen und zu überwinden.

Wesentliches Merkmal seiner Methode ist es, den Vortrag des Dozenten in regelmäßigen Abständen mit einer konzeptionellen (d. h. qualitativen oder semi-quantitativen) *multiple-choice* Frage zu unterbrechen. Nach einer kurzen „Bedenkzeit“ werden die Studierenden aufgefordert, dem Dozenten ihre Antwort mithilfe eines Rückmeldesystems mitzuteilen. Dies kann auf einfache Weise durch Handzeichen oder *flashcards*,²⁹ oder mithilfe elektronischer Systeme wie *Classtalk*³⁰ durchgeführt werden. Mazur erreicht dadurch zum einen, dass sich die Studierenden mit erfahrungsgemäß schwierigen Fragestellungen auseinandersetzen; zum anderen, dass er über den augenblicklichen Stand des Verständnisses informiert wird und im weiteren Verlauf der Vorlesung darauf reagieren kann.

5.2 VORSCHLÄGE ZUR FORTSETZUNG DES PROJEKTES

Die in diesem Bericht beschriebene Untersuchung stellt einen ersten Schritt zur langfristigen Verbesserung der Lehre dar. Eine Fortsetzung der Projektes erscheint sinnvoll, um weitere Teilgebiete der ingenieurwissenschaftlichen Grundlagenfächer in die Untersuchung einzubeziehen und im Anschluss daran wirkungsvolle Lehrmaterialien zu entwickeln oder bereits vorhandene Materialien auf die Situation an deutschen Hochschulen anzupassen. Zudem erscheint eine Untersuchung des Eingangsniveaus der Studierenden ratsam, um dadurch eine Evaluierung der Lehre im Vergleich mit anderen Hochschulen zu ermöglichen.

5.2.1 UNTERSUCHUNGEN ZU WEITEREN THEMEN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

Wie eingangs erwähnt wurde die Auswahl der hier untersuchten Stoffgebiete wesentlich durch Ergebnisse früherer Studien bestimmt. Dadurch wurde es uns ermöglicht innerhalb von nur zwei Monaten erste Ergebnisse zu erlangen, die ein hohes Maß an Validität aufweisen. Außerdem wurden dadurch Vergleiche mit Ergebnissen von verschiedenen Universitäten in den Vereinigten Staaten ermöglicht.

Eine Ausdehnung der Untersuchung auf andere Gebiete innerhalb der ingenieurwissenschaftlichen Grundlagenfächer erscheint aussichtsreich und könnte weitere hilfreiche Erkenntnisse für eine bessere Anpassung der Lehre an die Bedürfnisse der Studierenden mit sich bringen. Eine solche Erweiterung auf andere Fächer würde es notwendig machen, mithilfe von Einzelinterviews bestimmte Themen zu identifizieren, bei denen sich charakteristische Verständnisschwierigkeiten beobachten lassen. In

einem weiteren Schritt könnte dann durch schriftliche Tests (wie sie für die vorliegenden Untersuchung verwendet wurden) die Häufigkeit dieser Schwierigkeiten untersucht werden.

5.2.2 VERGLEICH DES EINGANGSWISSENS

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, Verständnisschwierigkeiten der Studenten aufzudecken und zu beschreiben. Es ging hierbei also nicht darum, die Qualität der Lehre zu beurteilen. Um die gewonnenen Erkenntnisse für eine Evaluation der Lehre zu verwenden, ist es zusätzlich notwendig, das Eingangsniveau der Studierenden genauer zu untersuchen. Zu diesem Zweck kann auf standardisierte Tests zurückgegriffen werden, die jeweils einzelne Teilgebiete der naturwissenschaftlichen Fächer zum Inhalt haben.

Ein solcher Test, der bereits seit mehreren Jahren in den Vereinigten Staaten eingesetzt wird, ist das *Force Concept Inventory (FCI)*, ein aus 30 Fragen bestehender *multiple-choice* Test zum Kraftbegriff in der Newton'schen Mechanik.³¹ Ähnliche Tests zu Teilgebieten der Elektrizitätslehre und des Magnetismus wurden seitdem veröffentlicht.

5.2.3 ENTWICKLUNG VON LEHRMATERIALIEN

Empirische Ergebnisse zum Verständnis des Lehrstoffes bei Schülern und Studierenden wurden bereits erfolgreich zur Entwicklung von Lehrmaterialien verwendet. Ein Beispiel stellen die von der *Physics Education Group* an der *University of Washington* entwickelten *Tutorials in Introductory Physics* dar. Dabei handelt es sich um eine Sammlung von Arbeitsblättern zu einzelnen Themen der Physik auf dem Niveau einer Lehrveranstaltung für das erste Studienjahr an Colleges und Universitäten. (Siehe auch Abschnitt 5.1.1.)

Bei einer Fortsetzung des hier beschriebenen Projektes sollte zuerst auf einem bereits untersuchten Themengebiet der Mechanik oder Elektrotechnik (in Absprache mit den Dozenten der jeweiligen Lehrveranstaltungen) versuchsweise ein *Tutorial* für die Studierenden durchgeführt werden. Durch diesen Schritt soll die Übertragbarkeit von in den USA entwickelten Lehrmaterialien und deren Akzeptanz durch die Studierenden an der TUHH erprobt werden. In einem weiteren Schritt könnte dann die Entwicklung spezieller Unterrichtsmaterialien für Studierende der Ingenieurwissenschaften an deutschen Hochschulen begonnen werden.

5.3 DANKSAGUNG

Für die Unterstützung dieses Projektes durch die Dozenten sowie die Präsidialverwaltung der Technischen Universität Hamburg-Harburg möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken.

¹ Siehe zum Beispiel: D. E. Trowbridge und L. C. McDermott, *Investigation of student understanding of the concept of velocity in one dimension*, Am. J. Phys. **48**, 1020 (1980), sowie L. C. McDermott und P. S. Shaffer, *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity, Part I: Investigation of student understanding*, Am. J. Phys. **60**, 994 (1992) und *Erratum*, Am. J. Phys. **61**, 81 (1993). Siehe hierzu auch die Einleitung zu E. Mazur, *Peer Instruction*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1997.

² D. Hestenes, M. Wells und G. Swackhamer, *Force Concept Inventory*, The Physics Teacher **30**, 141 (1992). Eine eindrückliche Schilderung, wie die Ergebnisse des FCI seine eigene Lehrtätigkeit beeinflusst haben, gibt Eric Mazur in seinem Buch *Peer Instruction*. (Siehe Fußnote 1.)

³ Man vergleiche die auf dem Gebiet der Statistik beobachtete Schwierigkeit der Unterscheidung zwischen *Mittelwert* und *Median*.

⁴ L. G. Ortiz, P. R. L. Heron und L. C. McDermott, *Identifying student difficulties with the static equilibrium of rigid bodies*, Vortrag auf der Tagung der American Association of Physics Teachers, Januar 1998, New Orleans, LA, sowie L. G. Ortiz, „An investigation of student understanding of rigid-body dynamics and static equilibrium.“ Dissertation, Department of Physics, U. of Washington, (expected) 2001.

⁵ M. E. Loverude, „Investigation of student understanding of hydrostatics and thermal physics and of the underlying concepts from mechanics“, Dissertation, Department of Physics, U. of Washington, 1999.

⁶ Vgl. S. Kanim, „An Investigation of student difficulties in qualitative and quantitative problem solving: Examples from electric circuits and electrostatics“, University of Washington, 1999 (unpublished doctoral dissertation), sowie L. C. McDermott und P. S. Shaffer, *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part I: Investigation of student difficulties*, Am. J. Phys. **60**, 994-1003.

⁷ Eine Bemerkung eines Teilnehmers nach Ende des Kurztests deutete dies sogar indirekt an.

⁸ Ein χ^2 -Test ergab eine Wahrscheinlichkeit von etwa 10%, dass ein derartiges Ergebnis durch Zufall auftritt. Im Allgemeinen werden Ergebnisse als signifikant betrachtet, wenn der Wahrscheinlichkeitswert unter 5% liegt.

⁹ Der χ^2 -Test ergab auch hier einen Wert von 10%.

¹⁰ In diesem Fall betrug die für den χ^2 -Test berechnete Wahrscheinlichkeit sogar 35%. Damit ist dieses Resultat von einem signifikanten Ergebnis sogar noch weiter entfernt als die Resultate der vorigen Fragen.

¹¹ Zudem kommt hier die Schwierigkeit, dass die Studierenden im Studiengang AIW nur eine vergleichsweise kleine Gruppe unter den Hörern und Hörerinnen der deutschsprachigen Lehrveranstaltungen darstellen, die bei einigen Aufgaben in der Mechanik ein deutlich überdurchschnittliches Ergebnis erzielte. In der Vorlesung *Grundlagen der Elektrotechnik II* schnitten die AIW-Studierenden jedoch (wie auch die GES-Studierenden) insgesamt etwas schlechter ab als die Studierenden der Fächer Elektrotechnik und Informatik.

¹² Diese Aufzählung erhebt weder Anspruch auf Vollständigkeit noch auf Originalität. Einige dieser Schlussfolgerungen sind in ähnlicher Weise bereits anderswo formuliert worden. Man vergleiche zum Beispiel den folgenden Artikel: Lilian C. McDermott, *Guest Comment: How we teach and how students learn – A mismatch?*, Am. J. Phys. 61, 295-298 (1993).

¹³ Siehe Fußnote 1.

¹⁴ Siehe Fußnote 5.

¹⁵ J. Minstrell, *Facets of students' knowledge and relevant instruction*, Research in Physics Learning: Theoretical Issues and Empirical Studies, Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) Kiel, 1991.

¹⁶ A. diSessa, *Toward an Epistemology of Physics*, Cognition and Instruction **10**, 105-225 (1993).

¹⁷ R. Stavy und D. Tirosh, *Intuitive rules in science and mathematics: The case of 'More A - more B'*, International Journal of Science Education, 18, 653-667 (1996).

¹⁸ Siehe Fußnote 15.

¹⁹ Zum Beispiel beim Balancieren eines Hammers, oder am Flüssigkeitsstand in Behältern, die aus zwei "kommunizierenden" Kammern bestehen.

²⁰ Eine kurze Darstellung der Lehrstrategie *Elicit, Confront, Resolve* im Zusammenhang mit anderen Ergebnissen der wissenschaftsdidaktischen Forschung findet sich in: L. C. McDermott, *Guest Comment: How we teach and how students learn – A mismatch?*, Am. J. Phys. **61**, 295 (1993).

²¹ Die weite Verbreitung dieser Vorstellung wurde von Arons beobachtet (Arnold B. Arons, *Teaching Introductory Physics*, John Wiley and Sons, New York, 1997).

²² Eine detaillierte Untersuchung der zugrunde liegenden Verständnisschwierigkeiten in der Mechanik findet sich bei Loverude (siehe Fußnote 5).

²³ Die hier berücksichtigten Untersuchungen wurden überwiegend mit Studierenden im ersten Studienjahr durchgeführt. Da es sich in den meisten Fällen um Lehrveranstaltungen in *Introductory Physics* handelte (sowohl *algebra-based* als auch *calculus-based*) sind die in den Vereinigten Staaten untersuchten Studierenden in der Regel weit weniger spezialisiert als die Studierenden an der TUHH. Vergleiche hierzu auch die Diskussion der Ergebnisse zur Elektrotechnik in Abschnitt 2.2.1.1.

²⁴ Hierbei handelt es sich natürlich nicht um eine vollständige Auflistung. Lehrveranstaltungen, die eine andere Struktur haben sind ebenfalls denkbar. Zudem können sich Übungsgruppen und Vorlesungen, die beide diesen Ansatz verfolgen, sinnvoll ergänzen.

²⁵ L. C. McDermott, P. S. Shaffer, and the Physics Education Group, *Tutorials in Introductory Physics*, Prentice Hall, Upper Saddle River, *Preliminary Edition*, 1998.

²⁶ Eine Darstellung dieses Prozesses findet sich in: P. S. Shaffer und L. C. McDermott, *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of instructional strategies*, Am. J. Phys. **60**, 1003 (1992). Für Teil 1 dieses zweiteiligen Artikels siehe Fußnote 1.

²⁷ Obwohl diese Materialien in erster Linie für einen kontinuierlichen Einsatz über ein oder zwei Semester konzipiert sind, deutet eine kürzlich erschienene Studie darauf hin, dass auch ein isoliert angewandtes Arbeitsblatt nachweisbaren Erfolg haben kann. Siehe hierzu: D. Abbott, J. Saul, G. Parker und R. Beichner, *Can one lab make a difference?*, Phys. Educ. Res., Am. J. Phys. Suppl. **68**, S60 (2000).

²⁸ Siehe die Literaturangabe am Ende von Fußnote 11.

²⁹ Bei *flashcards* handelt es sich um mehrere postkartenformatige Kartonstücke mit weit sichtbaren Buchstaben von A bis D oder F. Die Studierenden heben dann jeweils die ihrer Antwort entsprechende Karte. Siehe hierzu auch D. Meltzer und K. Manivannan, *The Physics Teacher* **34**, 72 (1996).

³⁰ *Classtalk* ist ein computergestütztes Rückmeldesystem der Firma Better Education, Inc. Siehe unter folgender Internetadresse: www.bedu.com/

³¹ D. Hestenes, M. Wells und G. Swackhamer, *Force Concept Inventory*, *The Physics Teacher* **30**, 141-158 (1992). Eine überarbeitete Version von 1995 findet sich in Mazurs Buch (siehe Fußnote 11).