

**VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNG EINES NEUEN LEHRGANGES
„EINFÜHRUNG IN DIE MECHANISCHE ENERGIE UND WÄRMELEHRE“**

**DISSERTATION DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK
DER LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

vorgelegt von
Martin Bader
aus Roggenburg/Schießen

München, den 12. März 2001

1. Gutachter: Prof. Dr. Dr. H. Wiesner
2. Gutachter: Prof. Dr. K. Stierstadt

Tag der mündlichen Prüfung:

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	3
1.	Einführung	5
2.	Ansätze der allgemeinen Didaktik, der Psychologie und der Soziologie	7
2.1	Didaktische Aspekte	7
2.2	Konstruktivistische Lerntheorie	7
2.3	Kognitionspsychologische Aspekte	9
2.3.1	Untersuchungen zur Invarianz	10
2.3.2	Untersuchungen zur Wärme, Wärmeausbreitung und zur Temperatur	11
2.4	Mädchen und Jungen im Physikunterricht	12
3.	Ansätze in der Physikdidaktik zu den Themengebieten „mechanische Energie“ und „Wärmelehre“	15
3.1	Unterrichtskonzepte und Untersuchungen zur Einführung der Begriffe Arbeit und Energie	15
3.1.1	Das Kraft - Arbeit – Energie – Konzept	15
3.1.2	Energie als Bootstrap – Idee	20
3.1.3	Vom Treibstoff zur Energie	21
3.1.4	Der Karlsruher Ansatz	22
3.1.5	Vom Systembegriff zur Energie	25
3.1.6	Von der Invarianz zur Energie	27
3.2	Unterrichtskonzepte und Untersuchungen zur Einführung der Begriffe Wärme und innere Energie	28
3.2.1	Konventionelles Unterrichtskonzept	29
3.2.2	Innere Energie als Zustandsgröße und Wärme als Prozeßgröße	30
3.2.3	Das thermische Gleichgewicht als Grundlage für die innere Energie und die Wärme	30
3.2.4	Der Karlsruher Ansatz	32
3.2.5	Zugang zur Wärme durch Messung des Wärmestroms	33
3.3	Der Temperaturbegriff	33
3.4.	Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik	35
3.5	Betrachtung einiger physikalischen Größen	37
3.5.1	Der Energieerhaltungssatz der Mechanik	37
3.5.2	Die Temperatur	39
3.5.3	Innere Energie, Arbeit und Wärme	40
4.	Vorstellung des Münchner Unterrichtskonzepts	41
4.1	Übersicht über das Münchner Unterrichtskonzept	41
4.2	Vergleich des Münchner Unterrichtskonzepts mit dem konventionellen Konzept	44
4.3	Versuche zur Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie	45
4.4	Das Skript des Münchner Unterrichtskonzepts	48
5.	Felduntersuchung des Lernerfolgs	102
5.1	Testverfahren	102
5.1.1	Intelligenztest und Unterteilung in Intelligenzklassen	102

5.1.2	Statistische Prüfverfahren	104
5.2	Beschreibung der Versuchs- und Kontrollgruppe	105
5.3	Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Versuchs- und Kontrollgruppe	106
5.3.1	Vergleich der kognitiven Fähigkeiten von Versuchs- und Kontrollgruppe	107
5.3.2	Physikalische Vorkenntnisse der Schüler	110
5.3.3	Abschließende Bewertung der Vergleichbarkeit der Versuchs- und der Kontrollgruppe	122
5.4	Untersuchung des Lernerfolgs von Versuchs- und Kontrollgruppe	123
5.4.1	Vorstellung der Lernerfolgstests	123
5.4.2	Globaler Lernerfolg von Versuchs- und Kontrollgruppe im Vergleich	129
5.4.2.1	Meßverfahren zur Bestimmung des globalen Lernerfolgs	129
5.4.2.2	Gegenüberstellung des globalen Lernerfolgs von Versuchs- und Kontrollgruppe	132
5.4.3	Detaillierte Untersuchung des Lernerfolgs	139
5.4.3.1	Items zur mechanischen Energie und zum Energieerhaltungssatz der Mechanik	140
5.4.3.2	Items zur Arbeit	165
5.4.3.3	Items zum Zusammenhang von Energie und Arbeit	174
5.4.3.4	Items zum nullten Hauptsatz der Wärmelehre und zur Temperatur	180
5.4.3.5	Items zur inneren Energie und zum ersten Hauptsatz der Wärmelehre	200
5.4.3.6	Item zur Wärme	215
5.4.3.7	Item zum zweiten Hauptsatz der Wärmelehre	218
5.4.3.8	Items zur Wärmeleitung und zur Wärmestrahlung	221
6.	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse	225
Anhang:		
1.	Literatur	231
2.	Vergleich der GP-Werte	233
3.	Ergebnisse des Vortests	238
4.	Ergebnisse des Lernerfolgstests I	243
5.	Ergebnisse des Lernerfolgstests II	262
6.	Korrelation der einzelnen Items	283
	Danksagung	301
	Erklärung	302
	Lebenslauf	303

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Unterrichtskonzept zur mechanischen Energie und zur Wärmelehre entwickelt. Basis für das Unterrichtskonzept war eine detaillierte didaktische Analyse, die sich aus relevanten Forschungsbeiträgen der allgemeinen Didaktik, der Psychologie, der Soziologie (Kapitel 2) und der Fachdidaktik (Kapitel 3) zusammensetzt. Das auf dieser didaktischen Analyse beruhende, neu entwickelte Unterrichtskonzept wird in Kapitel 4 ausführlich vorgestellt. Daran schließen sich in Kapitel 5 die Untersuchungsmethoden und die daraus gewonnenen Ergebnisse einer vergleichenden Untersuchung an. Bei dieser vergleichenden Untersuchung wird der Lernerfolg einer Versuchsgruppe, die nach dem neuen Unterrichtskonzept unterrichtet wurde, dem Lernerfolg einer Kontrollgruppe, die nach dem bisherigen bayerischen Lehrplan unterrichtet wurde, gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass der Lernerfolg der Versuchsgruppe in etwa doppelt so groß ist wie der Lernerfolg der Kontrollgruppe.

Im Folgenden werden kurz die wesentlichen Ziele (kursiv), die mit der Entwicklung des vorliegenden Unterrichtskonzepts verfolgt wurden und die dazugehörigen Ergebnisse vorgestellt.

- *Besseres Verständnis des Energiebegriffs*: Die Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe des Erhaltungsgedankens führt bei den Schülern/Schülerinnen der Versuchsgruppe zu einem deutlich höheren Lernerfolg verglichen mit den Schülern/Schülerinnen der Kontrollgruppe, bei denen die Energie anhand der physikalischen Arbeit eingeführt wurde. Wie die Lernerfolgstest weiterhin zeigen, haben die Schüler/innen neben dem Erhaltungsgedanken auch die Konzepte Energieumwandlung und Energietransport besser verstanden.
- *Auffinden einer geeigneten Verbindung zwischen den beiden Kapiteln „mechanische Energie“ und „Wärmelehre“*: Der Energieerhaltungssatz erwies sich als ideales Bindeglied zwischen den Kapiteln „mechanische Energie“ und „Wärmelehre“. Der Erhaltungsgedanke führt bei der Betrachtung mechanischer Systeme, die mit Reibung behaftet sind, zwangsläufig zur Einführung der inneren Energie eines Systems. Die Schüler/innen der Versuchsgruppe weisen beim Item, das den Zusammenhang zwischen der mechanischen Energie und der inneren Energie abfragt, einen deutlich höheren Lernerfolg als die Schüler/innen auf, bei denen die inneren Energie mit Hilfe der mechanischen Arbeit eingeführt wird (Kontrollgruppe).
- *Verwendung des nullten, ersten und zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik als strukturbildende Momente der Wärmelehre*: Die genannten Hauptsätze bilden bei dem neu entworfenen Unterrichtskonzept die Eckpfeiler, auf denen die Wärmelehre aufgebaut ist. Der Erfolg des neuen Konzepts zeigt sich darin, dass die Schüler der Versuchsgruppe beim Lernerfolgstest zur Wärmelehre wesentlich besser als die Schüler der Kontrollgruppe abschneiden.
- *Vermeidung von physikalischen Fehlvorstellungen*: Die bisherige Fachdidaktik - Literatur zeigt eine ganze Reihe von Fehlvorstellungen der Schüler/innen auf.

Diesen Fehlvorstellungen wird in dem neu entworfenen Unterrichtskonzept aktiv entgegengetreten. Das hat zur Folge, dass zum Beispiel der Wärmebegriff von den Schülern/Schülerinnen der Versuchsgruppe sehr viel besser beschrieben wurde als von Schülern/Schülerinnen der Kontrollgruppe.

- *Förderung von Mädchen im Physikunterricht:* Durch die Einbeziehung biologischer Beispiele und die gleichzeitige Reduzierung technischer Beispiele ist es gelungen, das Interesse der Mädchen zu verstärken. Das zunehmende Interesse der Mädchen hat zur Folge, dass die Mädchen der Versuchsgruppe bei den Lernerfolgstests etwas besser als ihre Mitschüler abschneiden. Im Vergleich dazu ist der Lernerfolg der Mädchen der Kontrollgruppe signifikant geringer als der Lernerfolg ihrer Mitschüler.

1. Einführung

Als ich 1989 nach Abschluss des Physikdiploms mein Referendariat als Gymnasiallehrer in den Fächern Mathematik und Physik antrat, war ich mit mehreren Unterrichtseinheiten des Physikunterrichts, wie sie in den Schulbüchern und im bayerischen Lehrplan behandelt wurden, sehr unzufrieden. Doch als Diplomphysiker, und damit Quereinsteiger in das Lehramt, schob ich dies auf meine mangelnde Erfahrung im Unterrichten von Schülerinnen und Schülern. Weil sich die Unzufriedenheit aber auch nach mehreren Berufsjahren mit einigen Bemühungen nicht gelegt hatte, wurde mir bewusst, dass das Problem nicht bei mir, sondern in der nach heutiger Sicht didaktisch unzulänglichen Ausarbeitung der entsprechenden Kapitel des Physikunterrichts zu suchen war. Zu dieser Zeit bot mir Herr Prof. Wiesner eine Dissertation zum Thema „Wärmelehre“ an.

Nach einer intensiven Einarbeitungszeit wurde mir klar, dass die Wärmelehre nicht getrennt von dem zuvor in der Schule besprochenen Kapitel „Mechanische Energie“ behandelt werden kann. Denn kein Schüler/keine Schülerin ist der Lage die innere Energie, den ersten Hauptsatz der Thermodynamik und die Wärme richtig zu verstehen, wenn er/sie zuvor die mechanische Energie, den Energieerhaltungssatz der Mechanik und die Arbeit nicht verstanden hat.

Daher entwickelte ich in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Wiesner ein Unterrichtskonzept, das die beiden Kapitel „mechanische Energie“ und „Wärmelehre“ umfasst. Mit diesem neuen Unterrichtskonzept wurde das Ziel verfolgt, die vom bayerischen Lehrplan vorgegebenen Unterrichtsinhalte nach didaktischen Gesichtspunkten neu zu ordnen und gegebenenfalls weitere, für das Verständnis benötigte Lerninhalte anzufügen. Folgende Ziele wurden im einzelnen verfolgt:

- Bei der Einführung der mechanischen Energie sollte der Zirkelschluß „Definition der mechanische Energie mit Hilfe der Arbeit und anschließende neue Definition der Arbeit als Wert der Energieänderung“ vermieden werden.
Diese gelang, indem bei der Einführung der mechanische Energie der Energieerhaltungsgedanken herangezogen wurde.
- Die Arbeit sollte nicht über die „physische Anstrengung“, wie sie zum Beispiel beim Heben eines Körpers auftritt, eingeführt werden.
Dieses Ziel wurde erreicht, indem erst nach der ausführlichen Besprechung des Energiebegriffs die Arbeit eingeführt wurde. Sie gibt den Wert der Energieänderung eines Körpers bei einer rein mechanischen Zustandsänderung an.
- Auffinden einer geeigneten Verknüpfung der beiden Unterrichtseinheiten mechanische Energie und Wärmelehre.
Bei dem bisher in Bayern verwendeten Unterrichtskonzept können die Schüler/innen nur schwerlich einen Zusammenhang zwischen den beiden Unterrichtseinheiten erkennen. Dieser Missstand wurde behoben, indem ein schlüssiger Übergang von der Unterrichtseinheit mechanischen Energie zur Wärmelehre anhand der Betrachtung der Reibung in mechanischen Systemen

gefunden wurde. Die Einführung der inneren Energie ergibt sich hier zwangsläufig aus dem Energieerhaltungssatz.

- Herausheben der fundamentalen Sätze in der Wärmelehre
Der bayerische Lehrplan führt die Hauptsätze der Thermodynamik nicht als Unterrichtsinhalte auf. Der nullte, erste und zweite Hauptsatz der Thermodynamik wurden dennoch in das neue Unterrichtskonzept aufgenommen. Sie geben dem neuen Unterrichtskonzept eine in sich schlüssige Struktur und bringen den Schülern/innen Grundlagen näher, die beim bisherigen Unterrichtskonzept nicht systematisch genug besprochen wurden.
- Vermeidung von physikalischen Fehlvorstellungen.
Die Schüler kommen bereits zu Beginn des Physikunterrichts mit Fehlvorstellungen, die sich, wenn man ihnen nicht aktiv entgegentritt, nur sehr schwer ausräumen lassen. Daher wurden die in der Fachliteratur besprochenen Fehlvorstellungen zur Arbeit und Wärme an geeigneten Stellen in dem neuen Unterrichtskonzept angesprochen und somit bei einigen Schülern/Schülerinnen ausgeräumt.
- Die bisherigen Schulbücher sind meist auf die Interessen der Jungen ausgerichtet. Technische Geräte und Anwendungen stehen immer im Vordergrund. Beispiele aus der Biologie, die bei den Mädchen das Interesse wecken, sind noch sehr rar gesät. Daher wurden bei dem neuen Unterrichtskonzept vermehrt Beispiele aus der Biologie auf Kosten technische Anwendungen und Beispiele besprochen.

Das so entstandene Unterrichtskonzept habe ich erstmals im Schuljahr 1996/97 in einer Klasse getestet. Die Analyse des Lernerfolgs erfolgte anhand von Schülerinterviews. Daraus ergaben sich noch einige Verbesserungen dieses Unterrichtskonzepts.

Im Schuljahr 1997/98 fand dann eine vergleichende Untersuchung statt. Hier wurden die Lernerfolge von 92 Schüler/innen, die nach dem neu entworfenen „Münchner Unterrichtskonzept“ unterrichtet wurden, mit dem Lernerfolg von 110 Schüler/innen verglichen, die nach dem bisherigen Unterrichtskonzept unterrichtet wurden. Es zeigte sich, dass die Schüler/innen, die nach dem Münchner Unterrichtskonzept unterrichtet wurden, einen mehr als doppelt so hohen Lernerfolg aufwiesen wie die Schüler/innen mit Unterricht nach dem bisherigen Konzept.

Einen Überblick über die Arbeit verschaffen die Kapitel 4.1 bis 4.2, 5.3.3, 5.4.1 bis 5.4.2.2 und 6. Am Ende eines jeden Kapitels steht eine kurze Zusammenfassung.

2. Ansätze der allgemeinen Didaktik, der Psychologie und der Soziologie

2.1 Didaktische Aspekte

Die Ergebnisse der Unterrichtspraxis zeigen immer wieder, dass die gewünschten Unterrichtsziele und Lernerfolge häufig nicht erreicht werden. Die Didaktik hat das Ziel, hier Verbesserungen zu erarbeiten. Aus dieser Zielsetzung heraus folgt zwangsläufig, dass sich die Didaktik ein breit gestreutes Wirkungsfeld gesetzt hat. Das spiegelt sich auch in der folgenden Definition von Jank und Meyer (1991) wieder:

„Didaktik = Theorie und Praxis des Lehrens und Lernens“.

Wie die Definition zeigt, muss auf dem Weg zu einem guten Unterricht nicht nur das Lehren, sondern auch das Lernen und damit die Schüler/innen und ihre Voraussetzungen betrachtet werden. Die wesentlichen Fragen, die man sich dabei zu stellen hat, sind:

- Welcher Lerninhalt soll vermittelt werden?
- Welcher Personenkreis wird unterrichtet?
- Welche intellektuelle Reife besitzen die beschulten Personen?
- Zu welchem Zeitpunkt des Unterrichtsfortschritts wird der Inhalt gebracht?
- Welche Methoden sollen angewendet werden?
- Warum wird der Inhalt gelehrt?

Diese Fragen zeigen auf, dass die Fachdidaktik nicht nur daraus bestehen kann, die Unterrichtsinhalte logisch miteinander zu knüpfen. Um Lernprozesse verstehen zu können ist es zwingend erforderlich unter anderem die Ergebnisse der Lerntheorie, der Kognitionspsychologie und der Soziologie in die Planung des Unterrichts mit einzubeziehen.

2.2 Konstruktivistische Lerntheorie

Die „pragmatische und moderate“ konstruktivistische Lerntheorie (J. Gerstenmaier, H. Mandl 1995) hat in den vergangenen zwanzig Jahren dazu beigetragen Lernprobleme zu erkennen und ermöglichte wichtige Verbesserungen des Lehrens und Lernens in den naturwissenschaftlichen Fächern (R. Duit 1995). Sie basiert auf drei Prinzipien:

- Lernende können das Wissen nicht vorgefertigt passiv aufnehmen, sondern sie konstruieren das neu zu erlernende Wissen auf der Grundlage ihres bisherigen Wissens selbst (psychologischer Aspekt). Konstruieren bedeutet in diesem Zusammenhang aber nicht, dass das neu zu erlernende Wissen, wie ein Baustein an

das bereits vorhandene Wissen angebaut wird. Es handelt sich hierbei vielmehr um komplexe Erkenntnis- und Lernprozesse.

- Alles Wissen über die Wirklichkeit ist eine menschliche Konstruktion. Nur so kann der Mensch seine Umwelt erkennen (erkenntnistheoretischer Aspekt).
- Der Mensch ist beim Wissenserwerb in seine soziokulturelle Umgebung eingebettet.

Man kann sich dabei die vorhandene Wissensstruktur eines Menschen wie ein Netz vorstellen, bei dem jeder Begriff (Knoten) mit mehreren anderen Begriffen verbunden ist. Das Erlernen eines neuen Begriffs bewirkt dann, dass ein neuer Knoten entsteht, der mit bereits vorhandenen anderen Knoten verbunden wird. Es ist aber auch ein Lernprozess ohne die Bildung eines neuen Knotens möglich. Denn innerhalb der Netze können neue Verbindungen geknüpft und alte getrennt werden.

Komplexer als die gerade besprochenen Lernprozesse ist das Erlernen von naturwissenschaftlichen Lerninhalten. Da die vorunterrichtlichen Vorstellungen und naturwissenschaftlichen Vorstellungen häufig nicht miteinander übereinstimmen, muss bei solchen Lernvorgängen das vorhandene Netz grundlegend umgebaut und erweitert werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem Konzeptwechsel. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass ein ad-hoc Wechsel des Konzepts meist nicht möglich ist. Vielmehr ist es nötig Schritt für Schritt (zyklischer Prozeß), vom vorhanden Netz ausgehend, das Netz langsam umzugestalten und so schließlich immer mehr zu einem tieferen Verständnis zu gelangen.

An den Konzeptwechselansätzen wurde kritisiert, dass sie sich auf das rein Rationale beschränken. Diese Kritik zeigt auf, dass bei Unterrichtskonzepten, die nach den Konzeptwechselansätzen entworfen werden, Faktoren wie Motivation, Interesse und Klassenklima mit berücksichtigt werden müssen. Denn diese Faktoren können zu einer Unterstützung des Konzeptwechsels beitragen oder ihn im ungünstigen Fall behindern.

Mit Hilfe der konstruktivistischen Lerntheorie können für die Unterrichtspraxis Regeln aufgestellt werden, die zu einem effektiven Unterricht und damit zu einem tieferen Verständnis der naturwissenschaftlichen Begriffe führen:

- Naturwissenschaftliche Lerninhalte müssen Schritt für Schritt in einem zyklischen Prozeß erarbeitet werden.
- Die Interessen, Bedürfnisse und Lernmöglichkeiten der Schüler/innen müssen berücksichtigt werden.
- Die bei Schülern/Schülerinnen vorhanden Präkonzepte, müssen in die Unterrichtsplanung mit einbezogen werden.
- Die Schüler/innen sind anzuhalten, sich aktiv mit dem Thema auseinanderzusetzen.
- Das eigene Wissen muß immer wieder reflektiert werden.

Folgerungen für das Münchner Unterrichtskonzept:

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Entwicklung des Münchner Unterrichtskonzepts war es, bestehende Präkonzepte der Schüler/innen aufzugreifen und zu thematisieren. So wurde zum Beispiel auf die Fehlvorstellung „Metall ist kälter als ein Nichtmetall“ an mehreren Stellen des Unterrichtsskriptums eingegangen (beim Kapitel 1.2.2 Verschiedene Thermometer und beim Kapitel 2.2 Änderung der inneren Energie durch Wärmeaustausch).

2.3 Kognitionspsychologische Aspekte

Ob ein Unterrichtskonzept didaktisch sinnvoll ist, hängt sehr stark davon ab, ob es berücksichtigt, in welcher Entwicklungsstufe sich die Schüler/innen befinden. Während ein achtjähriges Kind die Invarianz einer Stoffmenge sicherlich versteht, stellt das recht abstrakte Konzept der Energieerhaltung für dieses Kind noch eine Überforderung dar. Der Psychologe Piaget (Anderson 1996) unterteilte aufgrund seiner Untersuchung die kognitive Entwicklung von Kindern in verschiedene Stufen. Die vier wichtigsten davon sind:

1. Sensusmotorische Stufe:

Sie umfasst die ersten beiden Lebensjahre. Die Kinder erfahren die Umwelt durch Tasten, Schmecken, Fühlen und ihre eigene Bewegung.

2. Präoperatorische Stufe:

Sie ist zwischen dem zweiten und dem siebten Lebensjahr anzusiedeln. Das Denken wird von intuitiven Prozessen geleitet.

3. Konkret-operatorische Stufe:

Sie liegt zwischen dem siebten und dem elften Lebensjahr. Die Kinder können sich nun systematisch mit der physikalischen Welt auseinandersetzen. Das abstrakte Denken ist nur erheblich eingeschränkt möglich.

4. Formal-operatorische Stufe:

Sie reicht vom elften bis zum fünfzehnten Lebensjahr. Hier entwickelt sich die Fähigkeit zum abstrakten Denken. Nach dem Abschluss dieser Entwicklungsstufe sind die Jugendlichen von der kognitiven Entwicklung her Erwachsene. Sie können nun schlussfolgernd und wissenschaftlich denken.

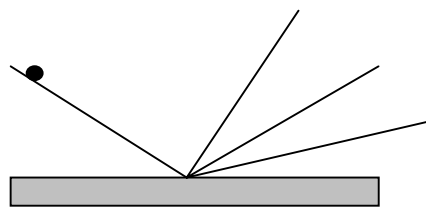
Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Die bei dieser Untersuchung betrachteten Schüler/innen waren zwischen 14 und 15 Jahre alt und befanden sich somit am Ende der formal-operatorischen Entwicklungsstufe. Es ist anzunehmen, dass die abstrakten Konzepte des Energieerhaltungssatzes und der Hauptsätze der Thermodynamik die Schüler/innen entwicklungspsychologisch betrachtet nicht überfordern dürften.

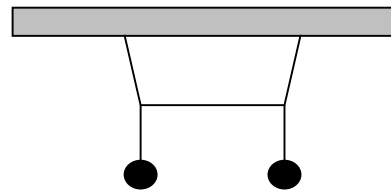
2.3.1 Untersuchungen zur Invarianz

Piaget und Inhelder (1969) untersuchten, wie sich bei Kindern der Invarianzbegriff bei der Stoffmenge, dem Gewicht und dem Volumen entwickelt. Sie stellten fest, dass ein Verstehen der Invarianz eines Stoffes zwischen 6,5 und 10,5 Jahren, der Invarianz eines Gewichts zwischen 8 und 12 Jahren und der Invarianz des Volumens zwischen 9,5 und 12 Jahren erfolgt.

Piaget (1973) untersuchte auch, inwieweit bei Kindern die Energieerhaltungsvorstellung ausgeprägt ist. Er benutzte dabei die beiden folgenden Aufbauten:



Bahn zum Abrollen der Kugel



gekoppelte Pendel

Piaget ließ zuerst einmal das Ergebnis von den Schülern/Schülerinnen vorhersagen. Anschließend wurde der Versuch durchgeführt und von den Schülern/Schülerinnen eine Erklärung des Ausgangs verlangt. Die sich daraus ergebenden Versuchsergebnisse ließen den Schluss zu, dass die Schüler/innen bei der Lösung der Aufgaben keine Energievorstellung heranzogen.

Nach den Untersuchungen von Piaget baut sich bei den Kindern also von selbst kein Energieerhaltungskonzept auf. Sie sind aber in der formal-operatorischen Stufe in der Lage diese Invarianz zu verstehen und in ihr bisheriges Erhaltungskonzept mit einzugliedern. Der Entwicklungspsychologe Anderson (1996) bemerkt dazu: „Wenn Kinder in das formal-operatorische Stadium gelangen, dann erreicht ihre Einsicht des Invarianzbegriffs neue Ebenen der Abstraktion. Sie sind nun in der Lage, die idealisierten Invarianzen zu verstehen, die Bestandteile der modernen Wissenschaften sind. Dies schließt Konzepte wie die Invarianz von Energie (Energieerhaltung) und die Invarianz der Bewegung mit ein. ... Das ist etwas, was ein Kind niemals beobachtet, es wird jedoch diese Abstraktion sowie den Zusammenhang zwischen einer Abstraktion und einer Erfahrung der realen Welt verstehen lernen.“

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Die 14- bis 15-jährigen Schüler/innen sollten von ihrer kognitiven Entwicklung her also gut in der Lage sein, die Energieerhaltung als einen weiteren Erhaltungssatz anzunehmen. Um die Akzeptanz des Energieerhaltungssatzes zu erhöhen, wird beim Münchner Unterrichtskonzept der Energieerhaltungssatz mit dem aus Kinderzeit bekannten „Teilchenzahlerhaltungssatz von Bauklötzen“ verglichen, bei dem die

Bauwerke, die man aus Bauklötzen bauen kann, völlig unterschiedlich sein können, die Gesamtzahl der Bauklötze aber immer konstant bleibt.

2.3.2 Untersuchungen zur Wärme, Wärmeausbreitung und zur Temperatur

Shayer und Wylam (1981) untersuchten die kognitive Entwicklung von 9 bis 13-jährigen Kindern einer Mittelschule in England. Nach ihrer Aussage ist es möglich, die Entwicklung der Wärme- und der Temperaturvorstellung in das Entwicklungsstufen-Modell von Piaget einzuordnen. Die kognitive Struktur der Wärme – und Temperaturvorstellung entwickelt sich demzufolge in drei Stufen:

Frühe bis mittlere konkret-operatorische Stufe (7-9 Jahre):

Das Verständnis der Wärme ist rein phänomenologisch. Die Wärme ist mit ihrer Wirkung, wie z. B. Erwärmen, Schmelzen verbunden. Die Kinder erkennen, dass ein warmer Körper durch Wärmeabgabe abgekühlt, und ein kalter Körper erwärmt wird. Die Schüler/innen sind in der Lage einen halb qualitativen Zusammenhang zwischen der Temperaturskala eines Thermometers und der Temperatur zu erkennen. Folgende Aussagen sind dafür charakteristisch: „Je höher die Thermometerflüssigkeit ist, desto wärmer ist es“. Noch nicht alle Schüler/innen erkennen, dass die Temperatur eine intensive Größe ist. Die meisten Kinder geben an, dass sich beim Zusammenschütten zweier Flüssigkeiten, die jeweils eine Temperatur von 25° haben, eine Flüssigkeit ergibt, die ebenfalls die Temperatur von 25° besitzt. Es gibt aber immer noch einige Kinder, die die Temperaturen addieren.

Späte konkret-operatorische Stufe (9-10 Jahre):

Der Zusammenhang zwischen der Wärme und ihrer Wirkung ist nun halb qualitativ ausgebildet. Die Kinder treffen Aussagen wie „Je mehr Wärme, desto mehr Wirkung“ oder „Je größer die Stoffmenge, desto mehr Wärme wird für die gleiche Wirkung benötigt“. Die Wärme wird aber noch nicht als extensive Größe aufgefaßt, da die Schüler/innen noch nicht erfasst haben, dass zwischen der Masse und der Wärmemenge ein qualitativer Zusammenhang besteht. Der Temperaturbegriff wird nun gut verstanden. Die Kinder erkennen den quantitativen Zusammenhang zwischen der Höhe einer Thermometerflüssigkeit und der Temperatur. Shayer und Wylam haben beobachtet, dass etliche Schüler/innen die Begriffe Wärme und Temperatur unter dem Temperaturbegriff zusammenzufassen.

Frühe operatorische Stufe: (11-13 Jahre)

Die Wärme wird nun als extensive Größe aufgefaßt. Die Schüler/innen stellen sich unter der Wärme häufig einen Stoff vor, der von einem Körper auf einen anderen Körper übergehen kann. Sie vergleichen die Wärme zum Beispiel mit Rauch, Dampf oder Luft (siehe auch Erickson 1980).

Folgerungen für den Aufbau des „Münchner Unterrichtskonzepts“:

Die Schüler/innen der 9. Jahrgangsstufe haben die frühe operatorische Stufe bereits hinter sich gelassen. Sie beherrschen somit die im Alltag üblichen Temperaturmessverfahren. Probleme können, wie bereits oben beschrieben, beim Wärmebegriff auftreten. Um der Fehlvorstellung, dass Wärme eine Art Stoff sei, zu begegnen, wurde daher beim Münchner Unterrichtskonzept die Analogie zwischen Arbeit und Wärme deutlich hervorgehoben.

2.4 Mädchen und Jungen im Physikunterricht

Das Fach Physik ist bei Mädchen deutlich unbeliebter als bei Jungen. Im Laufe der Schulzeit wird die Diskrepanz immer größer. Dengler (1995) untersuchte den Wandel der Beliebtheit des Faches Physik von der Mittelstufe zur Oberstufe hin. Die beiden folgenden Tabellen zeigen einige seiner Ergebnisse.

Mittelstufe				
Ich mag Physik	sehr	etwas	weniger	gar nicht
Mädchen	16 %	44 %	32 %	9 %
Jungen	23 %	42 %	23 %	13 %

Oberstufe (neusprachlicher Zweig)				
Ich mag Physik	sehr	etwas	weniger	gar nicht
Mädchen	4 %	27 %	26 %	44 %
Jungen	31 %	31 %	16 %	21 %

Das Interesse an dem Fach Physik (Fachinteresse) darf aber nicht mit dem Interesse an der Naturwissenschaft Physik (Sachinteresse) verwechselt werden. So kann sich zum Beispiel ein Schüler/eine Schülerin für die „Physik des Fliegens“ begeistern. Da dieser Lerninhalt aber im Physikunterricht nicht auftaucht, wirkt sich dieses Sachinteresse nicht auf das Interesse am Fach Physik aus.

Häußler und Hoffmann (1995) untersuchten, von welchen Faktoren das Sach- und das Fachinteresse der Schüler/innen abhängt. Für das Sachinteresse wurden unter anderem die Faktoren Geschlecht, Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit, Fasziniert sein von natürlichen Phänomenen, Fasziniert sein von technischen Phänomenen und die Bedeutung für die eigene Person herangezogen. Für das Sachinteresse wurden neben den oben genannten Faktoren zusätzlich das Sachinteresse an der Naturwissenschaft Physik und Unterrichtsvariablen wie Sach- und Sozialkompetenz der Lehrer/innen und Aufbau des Unterrichts betrachtet.

Häußler und Hoffman (1995) fanden heraus, dass die folgenden Faktoren das Sachinteresse am besten beschreiben: Fasziniert sein von natürlichen Phänomenen, Fasziniert sein von technischen Phänomenen, Bedeutung für die eigene Person und das Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit. Erstaunlich ist in diesem

Zusammenhang, dass das Sachinteresse nicht vom Geschlecht abhängt. Häußler et alii (1998) bemerken dazu: „Offenbar ist dieser Interessenunterschied durch die geschlechtstypische Ausprägung anderer Merkmale (etwa dem Fasziniert sein durch die Technik) bereits ausreichend berücksichtigt.“

Erstaunlich ist, dass der Faktor Sachinteresse fast keinen Einfluss auf das Fachinteresse hat. Das kann nur bedeuten, dass die Inhalte im Physikunterricht nicht mit den Sachinteressen der Schüler/innen übereinstimmen. Dass es auch anders gehen kann zeigt ein Modellversuch von Hoffmann et alii (1997), bei dem die Mädchen im Anfangsunterricht Physik gezielt gefördert werden sollten. Es zeigte sich, dass bei diesem Unterrichtsversuch die Mädchen ein sehr viel stärkeren Zusammenhang zwischen dem Sachinteresse und dem Fachinteresse entwickelten. Der wesentlichste Faktor beim Fachinteresse ist das Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit. Das bedeutet, dass ein Schüler, der von eigenen Fähigkeiten überzeugt ist, auch Gefallen an dem Fach findet. Hier ist die Didaktik gefragt, denn um das Selbstvertrauen stärken zu können, sind unterrichtliche Lernerfolge notwendig.

Da ein Ziel des Münchner Unterrichtskonzepts war, den Mädchen eine besondere Förderung Teil werden zu lassen, werden nun die wesentlichsten Gründe für das geringere Fachinteresse der Mädchen genauer betrachtet:

- Selbstvertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit

Den Mädchen werden von beiden Geschlechtern geringere physikalische Fähigkeiten zugeschrieben als den Jungen (Hell 1984). Das zeigt sich auch darin, dass Mädchen im Gegensatz zu Jungen dazu neigen, ihre guten Leistungen nicht auf ihre Kompetenz zurückzuführen. Sie erklären diese häufiger mit ihrem Fleiß oder mit dem Wohlwollen der Beurteiler (Horstkemper 1989). Daher ist das Selbstvertrauen der Mädchen geringer ausgeprägt als das ihrer Mitschüler.

- Unterschiedliche technische Erfahrung

Die Jungen sind den Umgang mit Bastelmaterial eher gewohnt und werden häufiger dazu angehalten sich mit technischen und naturwissenschaftlichen Tätigkeiten zu beschäftigen als Mädchen. Die Mädchen dagegen sind im Umgang mit Pflanzen, Tieren und Haushaltsgegenständen versierter und werden auch eher dazu angehalten mit Puppen zu spielen (Lie, Bryhni 1983, Hell 1984).

- Soziokulturelle Aspekte

Aus meiner eigenen Unterrichtserfahrung heraus weiß ich, dass nicht nur die Mädchen und Jungen, sondern sogar ihre Eltern und Lehrer häufig der Meinung sind, dass die Mädchen eine geringere technische Begabung als die Jungen mitbringen. Hier muss in der breiten Öffentlichkeit noch sehr viel Aufklärungsarbeit geleistet werden.

- Koedukation

Der koedukative Unterricht verstärkt die Tendenz, dass die Mädchen zu biologischen Fächern und die Jungen zu physikalischen Fächern neigen (Ormerod, Duckworth 1975). Hoffmann et al. (1997) wiesen nach, dass die Aufhebung der Koedukation im Physikunterricht bei den Mädchen zu einem Ansteigen des Selbstvertrauens in die eigene Leistungsfähigkeit führte. Dadurch stieg das Fachinteresse und die Leistungen der Schülerinnen nahmen zu.

- Unterschiedliche Sachinteressen

Hoffmann (1990) hebt hervor, dass für Mädchen der Kontext, in den eine Unterrichtseinheit eingebettet ist, bedeutend ist. „Der Bezug zum Menschen, soziale Implikationen und die praktische Anwendbarkeit haben für sie eine hohe Bedeutung. Beispielsweise würden Humanbiologie, medizinische Anwendungen oder Naturphänomene als Kontext für die Erarbeitung physikalischer Inhalte den Interessen der Mädchen entgegenkommen“.

Häußler et alii (1998) haben Kriterien für die Unterrichtsplanung erarbeitet, die dazu beitragen können, den naturwissenschaftlichen Unterricht für alle Schüler/innen, aber besonders für Mädchen, attraktiver zu machen:

- Die Schüler/innen zum Staunen bringen und sie damit neugierig machen.
- Anknüpfen an außerschulische Erfahrungen, die Mädchen und Jungen gleich bekannt sind
- Aktives und eigenständiges Lernen
- Bezug zum Alltag
- Relevanz der Naturwissenschaft für die Gesellschaft
- Lebenspraktischer Nutzen der Naturwissenschaft
- Bezug zur Humanbiologie
- Verdeutlichung der eingeführten quantitativen Größen
- Den Formeln sollte ein qualitatives Verständnis der dabei benötigten Begriffe vorausgehen
- Vermeidung einer frühzeitigen Abstraktion

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Ein Ziel, das mit dem Münchner Unterrichtskonzept erreicht werden sollte war, durch geeignete Anwendungsbeispiele den Interessen der Mädchen entgegen zu kommen und sie damit zu besseren Lernerfolgen zu führen. Daher wurden bei den einzelnen Unterrichtseinheiten möglichst häufig Querverbindungen zur Biologie hergestellt. Dies war besonders bei der Unterrichtseinheit „Wärmelehre“ sehr gut möglich. Die technischen Anwendungen wurden dagegen gekürzt. Interessanter Weise unterrichtete ich einige Schüler/innen, die bei dem Unterrichtsversuch mitgewirkt hatten, zwei Jahre später in der 11. Klasse im Fach Physik nochmals. Es stellte sich heraus, dass sich einige Schülerinnen in der 11. Klasse immer noch an Aufgaben erinnerten, bei denen Tiere eine wichtige Rolle spielten.

3. Ansätze in der Physikdidaktik zu den Themengebieten „Mechanische Energie“ und „Wärmelehre“

Seit vielen Jahren werden Vorstellungen der Schüler/innen zu den Themengebieten „mechanische Energie“ und „Wärmelehre“ untersucht. Diese Untersuchungen motivierten zahlreiche Unterrichtsansätze, die zum Teil Niederschlag in der Schulbuchliteratur fanden. Man darf in diesem Zusammenhang nicht vergessen, dass die Entstehung mancher Unterrichtskonzepte in einem gesellschaftshistorischen Kontext zu sehen ist. So erweckte die Energiekrise zu Beginn der siebziger Jahre das Interesse der Physikdidaktiker an der Energieentwertung. Im Folgenden werden die für die vorliegende Arbeit relevanten didaktischen Ansätze und Untersuchungen vorgestellt. Sofern diese Ansätze oder die zugehörigen Untersuchungen einen starken Einfluss auf den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzeptes hatten, werden die Folgerungen aus dem entsprechenden Unterrichtskonzept kurz angesprochen.

3.1 Unterrichtskonzepte und Untersuchungen zur Einführung der Begriffe Arbeit und Energie

Je mehr man sich mit dem Energiebegriff beschäftigt, um so deutlicher wird wie vielschichtig er ist. So setzt zum Beispiel R. Duit (Duit 1991) den Energiebegriff aus vier Grundideen zusammen: Energieumwandlung, Energietransport, Energieerhaltung und Energieentwertung. Je nachdem, in welchem historischen Kontext das Unterrichtskonzept entstand, welchen Aspekt die Autoren herausheben wollten und nicht zuletzt welche Lerninhalte durch die Kultusministerien vorgegeben wurden, entstanden im Lauf der Zeit völlig unterschiedliche Ansätze zur Einführung der Energie.

3.1.1 Das Kraft - Arbeit – Energie – Konzept

Das Kraft – Arbeit –Energie – Konzept (kurz KAE- Konzept) stellt den traditionellen Weg zur Einführung der Energie dar. Es wurde in Frankreich bis in die neunziger Jahre hinein unterrichtet (Bécu-Robinault, Tiberghien, 1998), in Deutschland / bayerischer Lehrplan ist es bis zum heutigen Tag aktuell (z.B. Schulbuch von Hammer, Knauth, Kühnel 1993) .

Vorstellung des Unterrichtskonzepts:

Ausgehend vom Newtonschen Kraftbegriff wird gezeigt, dass bei reibungsfreien mechanischen Kraftwandlern das Produkt aus der benötigten Kraft und dem zurückgelegten Weg konstant ist. Dieses Produkt nennt man Arbeit. Die anschließende Betrachtung von Beispielen, bei denen Körper Arbeit leisten, führt dazu, dass man die Energie als „Arbeitsvermögen“ definiert (Hammer, Knauth,

Kühnel 1993). Nach der Besprechung der unterschiedlichen Energiearten werden Energieumwandlungen untersucht. Am Ende des Unterrichtskonzepts steht der Energieerhaltungssatz.

Ziel des KAE – Konzepts ist es, den Schülern/Schülerinnen durch die Verbindung der Arbeit mit dem umgangssprachlichen Arbeitsbegriff, den Einstieg in den Energiebegriff zu erleichtern. Jung, Weber und Wiesner stellen dazu folgendes fest: „Die Hoffnung, durch Anknüpfen und Benutzen der Umgangssprache dem Schüler/der Schülerin das Lernen des physikalischen Arbeitsbegriffs zu erleichtern, darf mit Recht als sehr skeptisch beurteilt werden. Diese Überlegungen können nur plausibel sein, wenn physiologische Anstrengung und Ermüdung proportional zu F_G und Weg wäre.“ (Jung, Weber, Wiesner 1977). Zudem birgt die Formulierung „Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten“ aus didaktischer Sicht einen Konflikt in sich. Zum einen lernen die Schüler/innen, dass die Fähigkeit, Arbeit zu verrichten erhalten bleibt (Energieerhaltungssatz der Mechanik), zum ändern müssen sie erkennen, dass die Fähigkeit der Energie mechanische Arbeit zu verrichten bei realen Prozessen immer mehr abnimmt (2. Hauptsatz) (Duit 1991).

Untersuchungen zu diesem Konzept zeigen folgendes:

Assoziationstests von P. Engelhardt, W. Jung und H. Wiesner legen die Vermutung nahe, dass der Zugang zum physikalischen Arbeitsbegriff aufgrund der, an die Arbeit gekoppelten physischen Anstrengung nur sehr schwer gelingen kann. (P. Engelhardt, W. Jung und H. Wiesner 1977). Sie untersuchten 66 Schüler/innen der Sekundarstufe I.

Antworten zum Reizwort „Arbeit“:

50 %: Mühe, Anstrengung, tägliche Arbeit, Geld

10 %: Kraft mal Weg

3 %: Energieverbrauch

11 %: Kraft

9 %: Energie

0 %: Energieumwandlung oder ähnliches

Antworten zum Reizwort „Energie“:

10 %: Energieerhaltung

15 %: Kraft

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass in einigen Schulbüchern bei der Einführung der Arbeit zu leichtfertig mit den verschiedenen dabei auftretenden Kräften umgegangen wird. So wird in dem in Bayern zugelassenen Schulbuch „Physik 2“ von R. Feuerlein, H. Näpfle und H. Schäferlein (1993) die Hubarbeit wie folgt eingeführt:

„In unseren bisherigen Beispielen haben wir das Heben von Körpern betrachtet. Bei diesem Vorgang wird ein Körper der Masse m mit gleichbleibender Geschwindigkeit gehoben. Längs der Strecke $s = h$, der Hubhöhe, ist die Kraft \vec{F} gegengleich der Gewichtskraft \vec{G} des Körpers. Am Körper wird die Hubarbeit W_h verrichtet:

$W_h = F \cdot s = G \cdot h = mgh$ “ (Neben dem Text ist ein Gewichtheber abgebildet, der gerade im Begriff ist eine Hantel hochzuheben.). Zuerst einmal gilt in diesem Fall sicherlich nicht wie oben angeführt, dass die Kraft \vec{F} gegengleich der Gewichtskraft \vec{G} ist. Schließlich wird die Hantel von dem Gewichtheber nicht mit konstanter Geschwindigkeit nach oben gehoben. Zudem können die Schüler/innen nicht erkennen, welche der beiden Kräfte, \vec{F} oder \vec{G} die Hubarbeit verrichten. Je nachdem, ob \vec{F} oder \vec{G} zur Berechnung der Arbeit herangezogen wird, ist die verrichtete Hubarbeit größer oder kleiner als 0 J.

Folgerungen für den Aufbau des „Münchener Unterrichtskonzepts“:

Beim Münchener Unterrichtskonzept wird die Diskrepanz zwischen dem im Alltag benutzten Arbeitsbegriff und dem physikalischen Arbeitsbegriff aufgegriffen und problematisiert.

Eine grundlegende Untersuchung inwieweit Schüler/innen, die nach dem KAE - Konzept unterrichtet wurden, die Ideen des Energiebegriffs verstanden haben, stammt von R. Duit (Duit 1984). Die von ihm untersuchten Schülergruppen bestanden aus deutschen Gymnasiasten (Kiel) und aus Schülern/Schülerinnen einer philippinischen high school in Manila. Beide Schülergruppen befanden sich in der 10. Jahrgangsstufe und wurden nach dem KAE - Konzept unterrichtet. Er legte den Schülern/Schülerinnen unter anderem folgende Aufgabe vor:

Definiere den Begriff „Energie“.

Ergebnis:

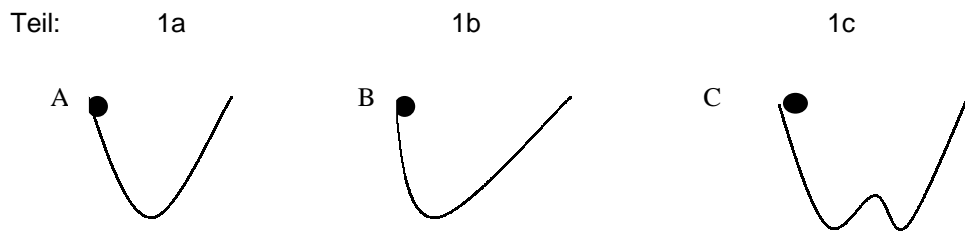
	philippinische Schüler/innen	deutsche Schüler/innen
benutzte Begriffe		
Arbeit	60 %	42 %
Energie zum Arbeiten nötig	5 %	21 %
Energie ist Arbeitsfähigkeit	55 %	9 %
Energie ist gespeicherte Arbeit	-	7 %
Kraft	6 %	14 %
Leistung	11 %	7 %
elektrischer Strom	1 %	12 %
Stärke	9 %	11 %
Energieumwandlung und Energietransport		
Energieformen genannt	3 %	12 %
Energieumwandlung	1 %	10 %
Energietransport	-	1 %
Energieerhaltung	-	11 %

Duit zieht aus diesen und den Antworten zu anderen Aufgaben folgende Schlüsse:

1. Sowohl die philippinischen, als auch die deutschen Schüler/innen geben die Definition ihrer Schulbücher meist unreflektiert wieder. Er schreibt dazu: „The definition ‚energy is the ability to do work‘ or ‚energy is stored work‘ often seems to be no more than a notion retrieved from memory and not based on understanding (Duit 1984).“
2. Viele Schüler/innen können nicht zwischen Energie, Kraft, Leistung und Stärke unterscheiden.
3. Die Grundideen des Energiebegriffs wie Energieumwandlung, Energietransport und Energieerhaltung werden nur von wenigen Schülern/Schülerinnen genannt. Die Energieerhaltung taucht bei den Antworten gar nicht auf.

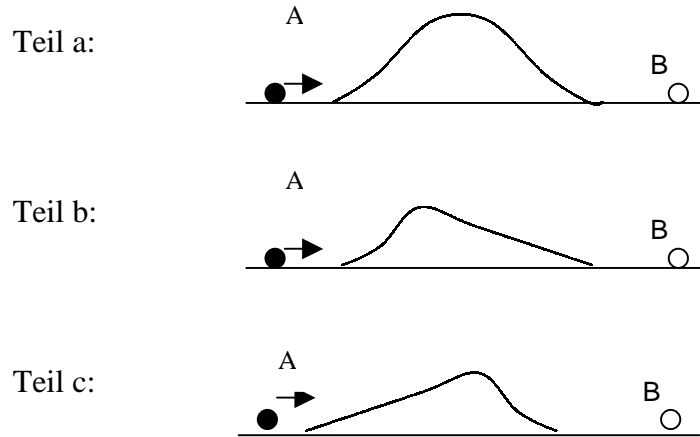
Zwei weitere Items aus den Untersuchungen von Duit sind:

Wie hoch kommt der reibungsfrei rollende Ball auf der anderen Seite, wenn er am Punkt A, B und C losgelassen wird?



	Aufgabe	philippinische Schüler/innen	deutsche Schüler/innen
Vorhersage der richtigen Höhe	a	-	47 %
	b	-	26 %
	c	3 %	33 %
Benutzung des Energiebegriffs bei der Erklärung	a	16 %	35 %
	b	13 %	26 %
	c	7 %	22 %
Benutzung der Energieerhaltung bei der Erklärung	a	-	26 %
	b	-	18 %
	c	-	15 %

Mit welcher Geschwindigkeit kommt der reibungsfrei rollende Ball bei B an?



	Aufgabe	philippinische Schüler/innen	deutsche Schüler/innen
Vorhersage der richtigen Geschwindigkeit	a	42 %	75 %
	b	4 %	35 %
	c	7 %	31 %
Benutzung des Energiebegriffs bei der Erklärung	a	4 %	22 %
	b	2 %	18 %
	c	7 %	17 %
Benutzung der Energieerhaltung bei der Erklärung	a	-	16 %
	b	-	9 %
	c	-	9 %

Bei den Untersuchungsergebnissen zu den beiden letztgenannten Items fällt auf, dass die Schüler/innen dann am besten Abschneiden, wenn die Bahn, die die Kugel zurückzulegen hat, eine Symmetrie aufweist. Vermutlich nehmen die Schüler/innen an, dass sich die Wirkungen der angreifenden Kräfte auf der linken und der rechten dann genau kompensieren.

Duit merkt zu seinen Versuchsergebnissen an: „ .. , it is discouraging that only a small number of students make use of the word energy and the principle of conservation of energy when explaining their predictions.“ (Duit 1984).

Folgerungen für den Aufbau des „Münchener Unterrichtskonzepts“:

Beim KAE-Konzept steht der Arbeitsbegriff im Vordergrund. Daher ist es nicht verwunderlich, dass der Energieerhaltungssatz bei den Begründungen zu den einzelnen Items nur selten genannt wird. Aus diesem Grund wurde beim „Münchener

Unterrichtskonzept“ bereits zu Beginn des Kapitels „mechanische Energie“ der Energieerhaltungssatz eingeführt. Er steht auch im gesamten restlichen Kapitel immer im Mittelpunkt der Betrachtung.

3.1.2 Energie als Bootstrap – Idee

Ogborn sieht die Energie als eine „Bootstrap – Idee“ (Ogborn 1983). Er bringt damit zum Ausdruck, dass die Energie nicht durch eine einzige Grundidee zu verstehen ist. Genauso wie ein bootstrap (engl.: Schnürsenkel) durch mehrere Ösen gezogen werden muß, und das Ziehen an dem Schürsenkel nicht nur an einer Öse zerrt, so kann die Energie nur durch die Summe aller Grundideen verstanden werden.

Ogborn nennt auch Beispiele für Unterrichtsstunden, bei denen die „Bootstrap – Idee“ verwirklicht wird.

„Einige Träume von Unterrichtsstunden:

Man stelle sich eine Stunde über Energiewörter vor. ... Man stelle sich eine Stunde über Schlankheits - Diät vor. Man findet, dass die Verbrennung von einem Kilogramm Fett sehr viel Energie liefert zu dem, was man an einem Tag braucht, um die Körpertemperatur zu halten, zu arbeiten und sich anzustrengen. ... Man stelle sich eine Stunde vor, in der ein Text von, sagen wir, Carnot sorgfältig studiert wird, Können die Schüler verstehen, warum es da ein Problem mit dem Wärmestoff gab, wenn sie Rumford lesen?“ (Ogborn 1983)

Leider arbeitet Ogborn selbst kein komplettes Unterrichtskonzept aus, das auf dieser Grundidee basiert. Diese Aufgabe übernimmt Duit (Duit 1991). Er nennt die Ösen, durch die der Schnürsenkel gezogen werden muss, die „Energiequadrige“. Sie besteht aus den Grundideen Energieumwandlung, Energietransport, Energieerhaltung und Energieentwertung.

Vorstellung des Unterrichtskonzepts nach Duit (Duit 1991):

In den ersten Schulstunden wird gesammelt und ausgewertet, was die Schüler/innen über die Energie wissen. Die sich anschließenden Experimente zeigen, wie sich Energie ineinander umwandeln kann (z.B. elektrische Energie in innere Energie, Licht in Bewegung, elektrische Energie in mechanische Energie). Die Schüler/innen erkennen schließlich, dass bei diesen Umwandlungen eine Größe erhalten bleibt. Sie wird Energie genannt. Um die Experimente in der Energiesprache zu beschreiben, werden nun die verschiedenen Energieformen eingeführt. Die darauf folgende Betrachtung längerer Umwandlungsketten verfestigt die gerade eingeführte Erhaltungsidee ebenso wie auch die Ideen der Umwandlung und des Transports von Energie. Die Beobachtung, dass die Energie im Verlauf der Umwandlungsketten scheinbar immer weniger wird, führt schließlich zur Entwertungsidee. Die verschwundene Energie hat dabei einen „Seitenausgang“ gefunden, sie tritt als Erwärmung in Erscheinung. Duit unterscheidet bei der Energieentwertung zwischen „wertvoller Energie“ (z. Bsp. kinetische Energie, potentielle Energie, elektrische

Energie), die sich vollständig in andere Energieformen umwandeln lässt und „weniger wertvollen“ Energie (innere Energie). Er weist dabei darauf hin, dass mit zunehmender Temperatur der Anteil der inneren Energie steigt, der sich vollständig in andere Energieformen umwandeln lässt. Der „Gebrauchswert“ der Energie nimmt bei allen in der Realität laufenden Prozessen ab. Das bedeutet, dass die Entropie bei allen in der Realität ablaufenden Prozessen in einem abgeschlossenen System zunimmt.

Duit gibt nicht an, an welcher Stelle er die Arbeit einführt.

Folgerungen für das Münchner Unterrichtskonzept:

Dieses Unterrichtskonzept birgt die Gefahr in sich, dass die Schüler/innen durch die gleichzeitige Behandlung der Grundideen Energieumwandlung, Energietransport, Energieerhaltung und Energieentwertung schlichtweg überfordert sind. Zudem ist anzunehmen, dass die Schüler/innen bei der Einführung des Energieerhaltungssatzes, wie sie von Duit vorgeschlagen wird, nicht von selbst auf den Erhaltungsgedanken kommen. Dennoch wurde die Idee der „Energiequadriga“ in das Münchner Unterrichtskonzept aufgenommen. Nur werden die einzelnen Grundideen nicht gleichzeitig, sondern an geeigneten, zeitlich weiter auseinander liegenden Stellen des Unterrichtskonzepts besprochen.

3.1.3 Vom Treibstoff zur Energie

Mehrere empirische Untersuchungen (Berge, Hauke 1983, Duit 1986/1) zeigen, dass Schüler/innen mit dem Energiebegriff häufig eine „Treibstoffvorstellung“ verbinden. Der Treibstoff ist dabei z.B. Öl, Kohle oder Strom. Auf dieser Erkenntnis aufbauend gibt es mehrere Unterrichtskonzepte.

Vorstellung des Unterrichtskonzepts „Vom Treibstoff zur Energie“:

Im angelsächsischen Raum gibt es mehrere Unterrichtsbücher, die nach diesem Konzept aufgebaut sind (z. B. von Rogers 1960). Zu Beginn werden Vorgänge betrachtet, bei denen mit Hilfe des Treibstoffs Öl verschiedene Jobs erledigt werden. Dabei steckt in dem Treibstoff etwas, das es überhaupt erst möglich macht, dass mit ihm ein Job erledigt werden kann. Dieses Etwas nennt man Energie. Bei der Betrachtung von Hebe-Jobs wird eine „Einheitsmenge“ Öl eingeführt, die ein Einheitsgewicht jeweils um die Einheitshöhe hebt (ein Einheits-Job). Durch die Zerlegung beliebiger Hebe-Jobs in Einheits-Jobs stellt man anschließend fest, dass der Öl-Verbrauch zur Anzahl der verwendeten Einheits-Jobs direkt proportional ist. Aus dieser Betrachtungsweise ergibt sich, dass der Öl-Verbrauch zum Produkt aus Kraft und Weg direkt proportional ist. Die Energie wird anschließend als Größe eingeführt, die im Öl gespeichert ist. Sie ist dafür verantwortlich, dass das Öl einen

Job verrichten kann. Der Wert der Arbeit gibt dabei an, wieviel Energie beim Job übertragen oder transportiert wurde.

Vorstellung des Unterrichtskonzepts „Vom elektrischen Strom zur Energie“:

Schlichting und Backhaus haben dazu einen Unterrichtsverlauf vorgestellt (1979): Mit Hilfe eines Wechselstromzählers wird in mehreren Versuchen gezeigt, dass die abgegebene elektrische Energie zur Umdrehungszahl des Zählers direkt proportional ist. So wird zum Beispiel Wasser mit Hilfe eines Tauchsieders erwärmt. Es zeigt sich, dass die Umdrehungszahl des Wechselstromzählers zur Temperaturerhöhung des Wassers direkt proportional ist. Somit ist die Umdrehungszahl des Wechselstromzählers ein Maß für die Menge der elektrischen Energie. Um das Verständnis für den Energiebegriff zu vertiefen, werden anschließend Beispiele für den Energiebedarf elektrischer Geräte untersucht.

Nachdem die elektrische Energie ausführlich betrachtet wurde, geht man nun zur thermischen Energie über. Bei dem einführenden Versuch erwärmt man Wasser mit Hilfe eines Tauchsieders. Es ergibt sich, dass die umgewandelte elektrische Energie sowohl zur Masse des Wassers als auch zur Temperaturerhöhung direkt proportional ist. Mit der bereits phänomenologisch erworbenen Erkenntnis, dass die Energie erhalten bleibt, gilt dann: $\Delta E_{th} := \Delta E_{el} = cm\Delta\vartheta$. Schlichting und Backhaus führen aus, dass an dieser Stelle, sofern gewünscht, die gesamte Wärmelehre behandelt werden kann.

Die mechanische Energie wird eingeführt, indem man das Heben eines Körpers mit Hilfe eines Elektromotors betrachtet. Dass die zur Verfügung gestellte elektrische Energie aufgrund des begrenzten Wirkungsgrads des Elektromotors nicht gleich der Änderung der Höhenenergie des Körpers ist, wird dabei mit den Schülern/Schülerinnen problematisiert.

Folgerungen für das Münchner Unterrichtskonzept:

Gerade das „Treibstoffkonzept“ geht von einer schönen bildlichen Vorstellung der Energie aus. Es besteht aber die Gefahr dabei, dass die Energie als eine Art Stoff betrachtet wird, die in der Flüssigkeit vorhanden ist.

3.1.4 Der Karlsruher Ansatz

Herrmann und Falk (1979) bieten einen völlig neuen Zugang zur Physik an. Sie betrachten dazu die Energieänderung, die sich ergibt, wenn man bei einem System mengenartige Größen infinitesimal gering ändert. Mengenartige Größen werden von ihnen dabei folgendermaßen definiert: „Eine mengenartige Größe ist eine Art ‚Substanz‘, die in einem physikalischen System oder einem Objekt enthalten ist und die von diesem Objekt auf andere Objekte überströmen oder umgekehrt von anderen Objekten als Strom geliefert werden kann.“ (Herrmann, Falk 1979).

Bei einer infinitesimalen Änderung des Systems ergibt sich:

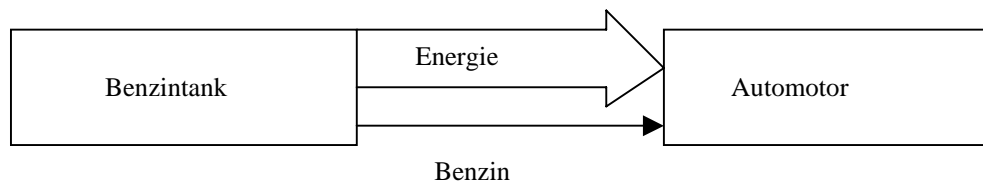
$$dE = vdp + \omega dL + \varphi dQ + \Phi dm + \dots$$

Dividiert man diese Gleichung durch dt, so erhält man:

$$\frac{dE}{dt} = v \frac{dp}{dt} + \omega \frac{dL}{dt} + \varphi \frac{dQ}{dt} + \Phi \frac{dm}{dt}$$

Die Änderung der Energie wird also durch den Impulsstrom $\frac{dp}{dt}$, den Drehimpulsstrom $\frac{dL}{dt}$, den Ladungsstrom $\frac{dQ}{dt}$ und den Massenstrom $\frac{dm}{dt}$ etc. bewirkt. Die intensiven Größen Geschwindigkeit v, Winkelgeschwindigkeit ω , elektrisches Potenzial φ , Gravitationspotenzial Φ etc. sind dabei das Beladungsmaß für die Ströme. Ursache für den Strom der zugehörigen mengenartigen Größe ist die Differenz der Beträge einer intensiven Größe an zwei Orten.

Die obige Gleichung zeigt, dass bei physikalischen Vorgängen mindestens zwei Ströme mengenartiger Größen auftreten. So fließt zwischen dem Benzintank eines Autos und dem Motor sowohl ein Energiestrom als auch ein Benzinstrom (siehe untenstehende Abbildung).



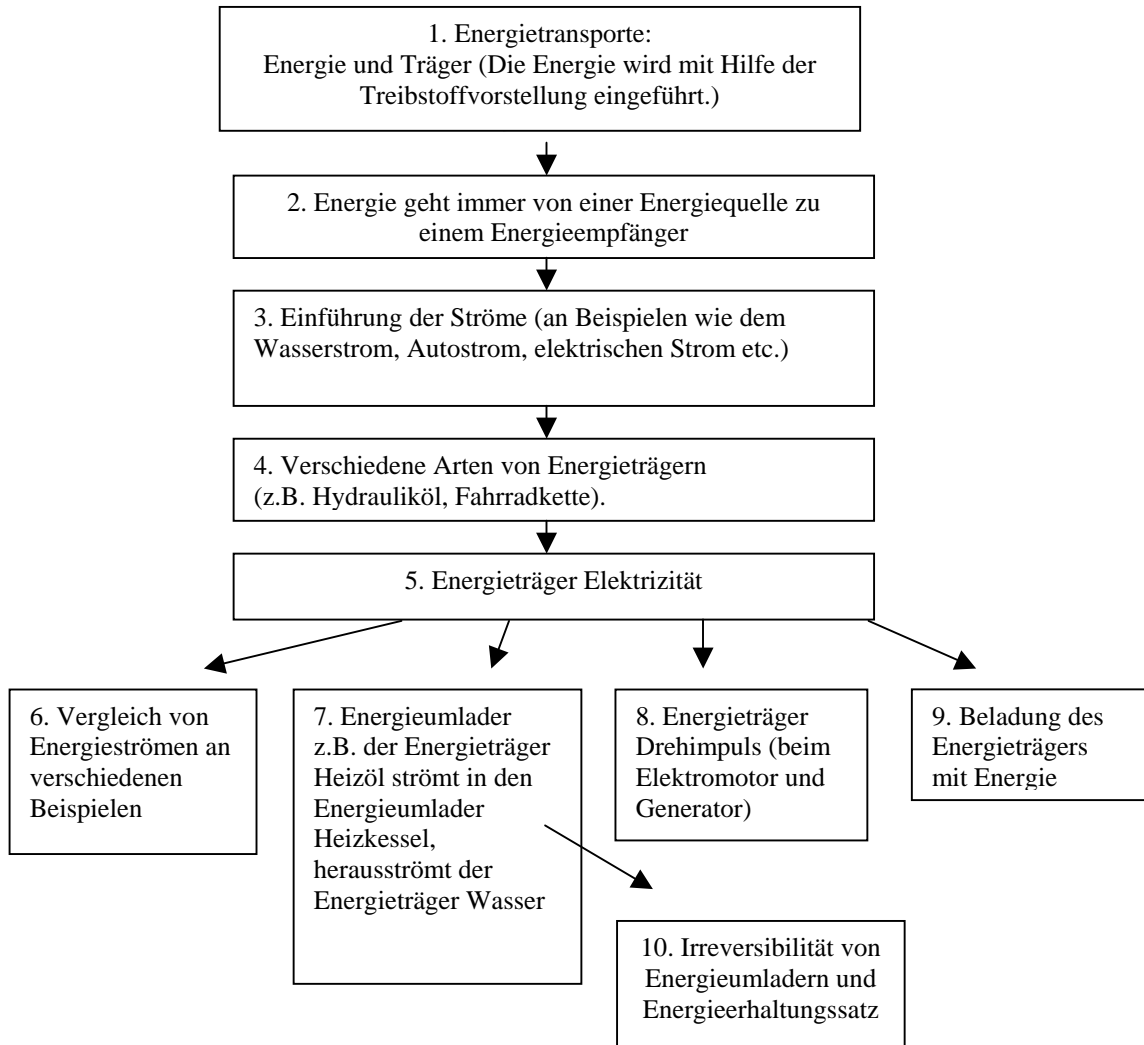
Die strömende Energie wird also von mindestens einer weiteren mengenartigen Größe, dem Träger begleitet. Die Energieform ist dann die strömende Energie zusammen mit dem Energieträger.

Beispiele:

Energieform	Ströme mengenartiger Größen	
	übertragen wird:	Energieträger:
elektrische Energie:	Energie	Ladung
kinetische Energie:	Energie	Impuls
Gravitationsenergie:	Energie	Masse
Wärme:	Energie	Entropie

Wie leicht zu erkennen ist, kann das von Hermann und Falk entwickelte Konzept von Strömen und Beladungsmaßen auf die unterschiedlichsten Bereiche der Physik angewendet werden.

Herrmann und Falk entschlossen sich, den Schüler/innen ihr Konzept als erstes mit Hilfe der Elektrik nahezubringen. Die folgende Skizze zeigt etwas gekürzt den Aufbau der Unterrichtseinheit „Elektrizität“ (nach Herrmann und Falk 1979).



Wichtig bei diesem Unterrichtskonzept ist, dass die Energie als ein fließender Stoff konzeptualisiert wird. Die Erweiterung des oben vorgestellten Unterrichtskonzepts aus der Elektrizitätslehre auf die Mechanik und die Wärmelehre ist denkbar einfach. Bei der Mechanik wird, nachdem man den Impuls eingeführt hat, der Impulsstrom behandelt. So fließt zum Beispiel bei Stoßprozessen sowohl der Energieträger Impuls als auch Energie vom einen Körper zum anderen Körper. Bei der Wärmelehre gehen Herrmann und Falk wie folgt vor: Wenn sich die Entropie S eines Systems ändert, so ändert sich auch die Energie E des Systems. Dabei gilt:

$$dE = T dS$$

Dividiert man die Gleichung durch dt , so erhält man bei konstanter Temperatur T :

$$\frac{dE}{dt} = T \frac{dS}{dt}$$

Betrachtet man Systeme, in denen keine Entropie erzeugt wird, so ist $I_S = dS/dt$ der Entropiestrom und $I_E = dE/dt$ gleich dem Energiestrom des Systems. Damit ergibt sich:

$$I_E = T I_S$$

Diese Gleichung besagt, dass beim Wärmeaustausch die Entropie der Energieträger und die Temperatur das Beladungsmaß des Energieträgers ist. Der Temperaturunterschied ist dabei der Antrieb für den Entropiestrom. Die Entropie strömt so lange, bis sich die Temperaturen angeglichen haben. Herrmann und Falk weisen darauf hin, dass sich bei dieser Art der Darstellung der absolute Temperaturnullpunkt von selbst ergibt. An diesem Punkt ist das Beladungsmaß 0 K.

Folgerungen für das Münchner Unterrichtskonzept:

Herrmann und Falk wagen hier einen völlig neuen, von der Thermodynamik geprägten Zugang zur Physik. Es ist fraglich, ob die Anwendung der thermodynamischen Denkweise außerhalb dieses Spezialgebiets den Schülern das Lernen erleichtert. Der Ansatz von Herrmann und Falk birgt zudem die Gefahr in sich, dass die Schüler/innen den Impuls, den Drehimpuls und die Entropie aufgrund ihrer Eigenschaft strömen zu können, als materiellen Stoff verstehen. Deshalb wurde auf diesen Ansatz beim Münchner Unterrichtskonzept verzichtet.

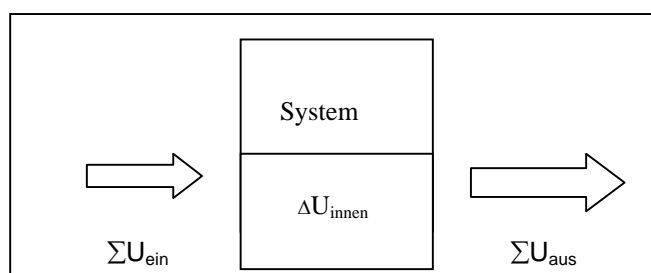
3.1.5 Vom Systembegriff zur Energie

Will man eine Energiebilanz aufstellen, so ist die vorhergehende Betrachtung von Systemen und ihren Grenzen unumgänglich. Ausgehend von diesem Grundgedanken entwickelten Licht (1990) et alii in Dänemark ein Schulbuch.

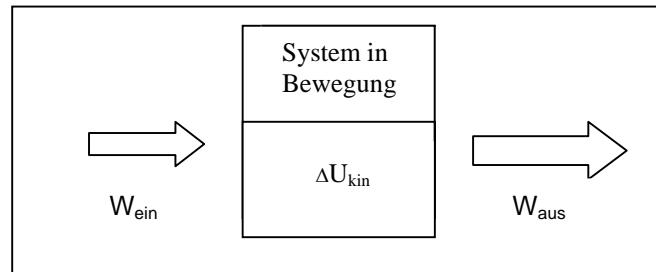
Vorstellung des Unterrichtskonzepts nach Licht:

Zuerst einmal werden Systeme und ihre Systemgrenzen betrachtet. Die anschließende Betrachtung des 1. Hauptsatzes der Thermodynamik führt zur folgenden Bilanzgleichung: Die Differenz zwischen der in das System eintretenden Energie und der aus dem System austretenden Energie ist gleich der Änderung der Gesamtenergie in dem System (siehe unten stehende Abbildung).

$$\sum U_{\text{ein}} - \sum U_{\text{aus}} = \Delta U_i$$



Auf Grund der vorangegangenen Überlegungen wird nun die Arbeit als die Größe eingeführt, die in das System hineingesteckt werden muß, um die kinetische Energie des Systems zu vergrößern (siehe darunter stehende Abbildung).



Bei der Bilanzbildung wird zwischen folgenden Energien unterschieden:

Eintretende und austretende Energien:

Wärme, Arbeit, Strahlungsenergie, elektrische Energie und bei offenen Systemen auch noch die Teilchenenergie

Innere Energie:

thermische Energie, chemische Energie, kinetische Energie, Höhenenergie (System Körper-Erde), Spannenergie

Das Aufstellung von Systemen und die Erstellung zugehöriger Energiebilanzen wird anschließen anhand von vielen, der Erfahrungswelt der Schüler/innen entstammenden Beispielen geübt.

Zwei Teile sind bei diesem Ansatz problematisch. Zum einen, dass die Wärme und die Arbeit als Energieformen angesehen werden und zum andern, dass die kinetische Energie des Scherpunktes und die Höhenenergie zur inneren Energie gezählt werden. Dies widerspricht den gebräuchlichen Definitionen.

Untersuchungen:

Huis und Berg (1993) untersuchten, inwieweit Schüler/innen das oben besprochene Konzept verstanden haben an. Sie fanden Folgendes heraus:

Das Aufstellen von Systemen und der Energiebilanz führt bei den Schülern/Schülerinnen häufig zu fundamentalen physikalischen Fragestellungen. Huis und Berg geben dazu folgendes Beispiel an: „Example: ‚the sun‘: Three students agreed on the following identifications for input, output and internal energies: $U_{in} = 0$, $U_{out} = Q$ and $\Delta U_i = \Delta U_{nucl}$. Their conclusion that in this case the sun would run out of fuel was a shock for them.“ (Huis, Berg 1993).

Die Schüler/innen haben häufig Probleme zwischen eintretender, austretender und innerer Energie zu unterscheiden. Huis und Berg führen dies auf das unklare Bild zurück, das die Schüler/innen von den Vorgängen haben.

Aufgrund der bestehenden Notation können die Schüler/innen zwischen der Energie und der Arbeit meist nicht unterscheiden.

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Wie Huis und Berg aufzeigen ist bei der Aufstellung der Energiebilanz der Systembegriff äußerst wichtig. Daher wird beim Münchner Unterrichtskonzept der Systembegriff bei der Besprechung des Energieerhaltungssatzes betont. Auch bei der Einführung des Arbeitsbegriffs spielt der Systembegriff eine wichtige Rolle. Bei dessen Einführung werden Systeme betrachtet, bei denen von außen Energie zugeführt oder nach außen Energie abgegeben wird.

3.1.6 Von der Invarianz zur Energie

Vorstellung des Konzepts nach Feynman (1974):

Das folgende Unterrichtskonzept wurde von Feynman für die Universität erarbeitet. Da es in modifizierter Form für den Schulunterricht geeignet ist, soll es hier berücksichtigt werden.

Feynman stellt den Energieerhaltungssatz ganz an den Anfang seiner „Feynman Lectures“. Die abstrakte Idee der Energieerhaltung versucht er mit folgender Analogie zu erklären: „Imagine the child, perhaps „Dennis the Menace“ who has blocks which are absolutely indestructible, and cannot be divided into pieces. Each is the same as the other. Let us suppose that he has 28 blocks. His mother puts him with his 28 blocks into a room at the beginning of the day. At the end of the day, being curious, she counts the blocks very carefully, and discovers a phenomenal law – no matter what he does with the blocks, there are always 28 remaining! This continues for a number of days, until one under the rug – she must look everywhere to be sure that the number of blocks has not changed. One day, however, the number appears to change – there are only 26 blocks. Careful investigation indicates that the window was open, and upon looking outside, the other two blocks are found.“ (Feynman 1974).

Feynman hebt mit dieser Analogie zwei wesentliche Punkte der Energievorstellung hervor: Zum einen kann die Gesamtenergie eines Systems auf verschiedene Energiearten aufgeteilt sein. Zum andern muss für die Verifizierung des Energieerhaltungssatzes bei der Betrachtung des Systems genau Bilanz geführt werden, damit nichts aus Versehen verloren geht oder dazu gefügt wird. Feynman

hofft durch diese Analogie dem Leser die Idee des Energieerhaltungssatzes nahegebracht zu haben.

Dieser grundlegenden Betrachtung des Energieerhaltungssatzes schließt Feynman eine Erarbeitung der Formeln für die Höhenenergie und kinetische Energie an. Er versäumt in diesem Zusammenhang nicht einen Ausblick über weitere Energiearten und Erhaltungssätze zu geben. Erst etliche Kapitel später, nach der Behandlung des Kraftbegriffs, führt Feynman die Arbeit ein, die von einer Kraft verrichtet wird.

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Dieses Konzept hat den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts maßgeblich beeinflusst. Wie bei Feynman wird auch beim Münchner Unterrichtskonzept der Energieerhaltungssatz an den Anfang des Kapitels „Mechanische Energie“ gesetzt. Das von Feynman vorgeschlagene Bild mit den Bauklötzen taucht auch im Münchner Unterrichtskonzept auf. Mit ihm wird die Brücke zwischen dem neu gelernten Energieerhaltungssatz und den Invarianzen geschlagen, die die Schülern/Schülerinnen bereits kennen.

Vorstellung des Unterrichtskonzepts nach Hilscher (1994):

Hilscher verbindet mit dem Leitgedanken der Energieerhaltung die Kapitel Mechanik und Wärmelehre. Am Anfang seines Unterrichtskonzepts steht der Energieerhaltungssatz. Bei der Betrachtung von Versuchen mit dem Fadenpendel, gekoppelten Pendeln, Luftkissen mit Federbügel usw. erkennen die Schüler/innen, dass es eine Größe gibt, die bei diesen Bewegungen erhalten bleibt. Diese Größe nennt man Energie. Daran schließt sich eine Betrachtung der einzelnen Energiearten an. Die darauf folgende Betrachtung von Maschinen führt induktiv zu dem Ergebnis, dass das Produkt $F \cdot s$ beim Heben seines Körpers um die gleiche Höhe immer gleich groß ist. Diese Form der übertragenen Energie nennt man Arbeit. Anschließend werden die Reibung und unelastische Stöße mikroskopisch betrachtet. Die Temperatur wird als ein Maß für mittlere kinetische Energie der Atome bzw. Moleküle definiert. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre ist dabei eine Folge des Energieerhaltungssatzes für offene Systeme.

3.2 Unterrichtskonzepte und Untersuchungen zur Einführung der Begriffe Wärme und innere Energie

Die didaktischen Probleme bestehen nicht so sehr bei der Behandlung der inneren Energie, sondern eher bei der Einführung und der Beschreibung des Wärmebegriffs. Grund dafür ist, dass der Wärmebegriff in der Umgangssprache und der Fachsprache nicht übereinstimmen. So findet man heute bei den Schülern/Schülerinnen folgende unterschiedliche Vorstellung des Wärmebegriffs (Manthey 1980; Punkt 1 bis 4):

1. Wärme als Empfindung (physiologischer Wärmebegriff)
2. Wärme als Temperatur höher als 0°C (meteorologischer Wärmebegriff)
3. Wärme als Teil der inneren Energie eines Systems (veralteter physikalischer Wärmebegriff im Sinne von Wärmeinhalt)
4. Wärme als besondere Form des Energieaustausches zwischen zwei Systemen (moderner physikalischer Wärmebegriff).
5. Wärme ist eine unzerstörbare Substanz, die sich in jedem Körper befindet. Diese Fehlvorstellung wurde bei etlichen Schülern/Schülerinnen gefunden (Wiesner, Stengel, 1984) und wurde erstmals von dem Arzt G. E. Stahl um 1700 beschrieben.

Da diese Fehlvorstellungen erst zu Beginn der achtziger Jahre systematisch untersucht wurden, gehen die etwas älteren Unterrichtskonzepte, wie zum Beispiel das gleich vorgestellte konventionelle Unterrichtskonzept auf diese Problematik nicht ein.

3.2.1 Konventionelles Unterrichtskonzept

Die Konzepte der in Deutschland eingeführten Schulbücher unterscheiden sich bei der Einführung der inneren Energie und des Wärmebegriffs nur unwesentlich voneinander. Nach der Vorstellung der inneren Energie wird die Wärme besprochen. Je nach Schulbuch wird dabei auf unterschiedliche Eigenschaften der Wärme mehr oder weniger Wert gelegt. Die folgenden beiden Definitionen der Wärme werden in bayerischen Schulbüchern verwendet. „Die innere Energie eines Körpers kann nicht nur durch mechanische Arbeit, z. B. Reibungsarbeit, sondern auch durch Wärmearbeit geändert werden.“ (Hammer, Knauth und Kühnel 1993) und „Die bei einem Temperaturunterschied durch Teilchenstöße übertragene Energie heißt Wärme.“ (Feuerlin, Näpfel, Schäflein 1993)

Untersuchungen:

Fleischer (1991) befragte 193 Berliner Schüler/innen, bei denen die Wärmelehre bereits behandelt wurde, was sie unter dem Begriff „Wärme“ verstehen:

- 42 % Die Definition wird wörtlich oder sinngemäß wiedergegeben. (Die Wärme gibt an, wieviel thermische Energie von einem Körper auf einen anderen übertragen wird.)
- 23,8 % Wärme ist eine Energie
- 23,8% Wärme und Temperatur ist das gleiche
- 1,6 % Wärme ist sowohl Temperatur als auch thermische Energie
- 8,8 % Anderweitige Definition

Diese Untersuchung bestätigt die Ergebnisse der Untersuchung von Manthei (1980). Dort gaben 19,4 % der Schüler/innen an, dass Wärme und Temperatur Synonyme sind und 20,4 % der Schüler/innen sahen in der Wärme eine besondere Form der Energie.

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Um den Wärmebegriff klar von den Begriffen Energie und Temperatur abzugrenzen, wird beim Münchner Unterrichtskonzept die Analogie zwischen der mechanischen Arbeit und der Wärme ausführlich dargestellt. Sowohl die mechanische Arbeit, als auch die Wärme sind keine Energieformen, sondern sie beschreiben zwei unterschiedliche Möglichkeiten (Prozesstypen) um die innere Energie U zu ändern (erster Hauptsatz der Thermodynamik).

3.2.2 Innere Energie als Zustandsgröße und Wärme als Prozessgröße

Wie in dem vorhergehenden Kapitel gezeigt, begreifen Schüler/innen die Wärme und die innere Energie häufig als Synonyme. Um diese Fehlvorstellung überhaupt erst gar nicht aufkommen zu lassen, schlugen Manthei (1981) bzw. Mak und Young (1987) vor, bereits in der Schule zwischen Zustandsgrößen und Prozeßgrößen zu unterscheiden. Die innere Energie ist dabei eine Zustandsgröße, Wärme und Arbeit sind Prozessgrößen.

Manthei definiert die Wärme dabei wie folgt: „Wärme W_W ist die Energiezufuhr über die Systemgrenze, die ihre Ursache in einem Temperaturgefälle an der Systemgrenze hat.“ (Manthei 1981).

Mark und Young (1987) geben dagegen bei der Definition der Wärme explizit an, dass sie nur bei einem Prozess auftreten kann. „Heat flow is the process by which energy transfers occurs as the result of a temperature difference. Heat is the energy transferred in the process.“

Folgerung für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Im Münchner Unterrichtskonzept wird nicht explizit von Prozessgrößen und Zustandsgrößen gesprochen. Durch eine klare Trennung zwischen der inneren Energie und der Wärme, die eine der Möglichkeiten darstellt, den Wert der inneren Energie zu ändern, wird diesem Punkt aber Rechnung getragen.

3.2.3 Das thermische Gleichgewicht als Grundlage für die innere Energie und die Wärme

Viele Schüler/innen lassen sich von ihrem subjektiven Temperaturempfinden leiten. Die Temperatur eines Körpers ist für sie davon abhängig, aus welchem Material der Körper besteht. Typische Schüleraussagen sind: „Metall ist kalt“, oder „Wolle ist

warm“. Diese Schüler/innen haben das thermische Gleichgewicht noch nicht konzeptionalisiert. Thomaz, Malaquias, Valente und Antunes (1995) sehen darin den Grund, warum Schüler/innen die Wärme (d.h. den Energiefluss aufgrund einer Temperaturdifferenz) nicht verstehen können.

Vorstellung des Unterrichtskonzepts nach Thomaz:

Thomaz et alii entwickelten ein Unterrichtskonzept, welches das „thermische Gleichgewicht“ an den Anfang der Wärmelehre stellt. Die Autoren gehen dabei wie folgt vor:

Die Schüler/innen erkennen mit Hilfe mehrerer Experimente, dass die Temperatur keine materialabhängige Größe ist.

- Mikroskopische Erklärung der Temperatur
- Einführung der Wärme als übertragene Energie
- Interpretation des thermischen Gleichgewichts
- Wärmeleitung zur Erklärung des physiologischen Temperaturempfindens
- Unterscheidung von Temperatur und Wärme anhand der Betrachtung von Phasenübergängen
- Zusammenhang von Wärme und Temperaturänderung

Untersuchungen:

Thomaz, Malaquias, Valente und Antunes (1995) führten ihre Untersuchung an mehreren portugiesischen Schulen durch. In Portugal wird die Wärmelehre in der 9. Klasse unterrichtet. Die Schüler/innen sind dabei zwischen 14 und 15 Jahren alt. Verglichen wurde in dieser Studie der Lernerfolg von 48 Schülern/Schülerinnen, die nach ihrem Unterrichtskonzept unterrichtet wurden, mit dem Lernerfolg einer Kontrollgruppe, die aus 30 Schüler/innen bestand.

	Versuchsgruppe (N = 48)	Kontrollgruppe (N = 30)
Wärme und Kälte als Substanz.	6,3 %	56,7 %
Temperatur als materialabhängige Größe.	18,7 %	72,7 %
Temperatur kann übertragen werden.	6,3 %	30,0 %
Körper, die sehr lange in der selben Umgebung waren, haben unterschiedliche Temperatur, wenn sie aus unterschiedlichen Materialien sind.	20,8 %	76,6 %
Der Zustand der Wärme und Kälte hängt davon ab, aus welchem Material der Körper ist.	6,3 %	53,3 %
Die Temperatur ist ein Maß für die Wärme des Körpers.	8,3 %	36,6 %
Wärme ist ein Sinneseindruck.	14,6 %	66,7 %

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Das thermische Gleichgewicht stellt beim Münchner Unterrichtskonzept eine der wesentlichen Grundlagen der Wärmelehre dar. Darüber hinaus zeigt das Unterrichtskonzept mit Hilfe des nullten Hauptsatzes der Thermodynamik den Schülern/Schülerinnen, warum die Temperaturmessung grundsätzlich möglich ist.

3.2.4 Der Karlsruher Ansatz

Wie in Kapitel 3.1.4 (Seite 22) hergeleitet, beschreiben Hermann und Falk (1979) die Energieänderung mit Hilfe des Entropiestroms dS/dt . Für ihn gilt:

$$\frac{dE}{dt} = T \frac{dS}{dt}$$

Der Entropiestrom dS/dt fließt dabei von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur. Im Karlsruher Ansatz ist also die Entropie die Größe, die im Alltag mit Wärme bezeichnet wird.

Untersuchungen:

Kesidou und Duit (1991) befragten 10 Schüler/innen, die nach dem Karlsruher Ansatz unterrichtet wurden, nach ihren Vorstellungen zur Thermodynamik. Auf die Frage, was Entropie ist, gaben 6 von 8 befragten Schüler/innen die Antwort Wärme, bzw. die Wärme, die in einem Körper drin ist. Nach dem Begriff Wärme gefragt, gaben von den 10 befragten Schülern/Schülerinnen zwei die Antwort Energie und zwei die Antwort Entropie. Den Zusammenhang zwischen der Wärme und der Energie sehen von den 10 Schülern/Schülerinnen 5 Schüler/innen darin, dass Wärme eine Art Energie sei. Drei Schüler/innen sagten, dass Wärme Energie hat bzw. eine Energiequelle sei. Kesidou und Duit geben folgende Begründung dafür, dass die Hälfte der Schüler/innen die Energie und Entropie als Synonyme gebrauchen: „Denn wenn Schüler einerseits Wärme in Zusammenhang mit Energie bringen, der Unterricht aber den Zusammenhang mit der Entropie lehrt, so liegt es für die Schüler nahe, auch Energie und Entropie gewissermaßen gleichzusetzen“ (Kesidou und Duit 1991).

Folgerungen für das Münchner Unterrichtskonzept:

Meines Erachtens haben sich Hermann und Falk zu weit von den gängigen Wegen der Physikdidaktik entfernt. Das von ihnen entworfene Unterrichtskonzept schafft neue Fehlvorstellungen, so zum Beispiel die Gleichstellung von Wärme und Entropie. Es ergeben sich bei diesem Unterrichtskonzept keine verwertbaren Aspekte für das Münchner Unterrichtskonzept.

3.2.5 Zugang zur Wärme durch Messung des Wärmestroms

Bei konventionellen Versuchen zur Wärmelehre werden die ausgetauschten Energien immer nur zu Beginn und am Ende des Prozesses betrachtet. Der Transportcharakter der Wärme kommt bei dieser Betrachtungsweise zu kurz. Dittmann und Schneider (1992) zeigen auf, dass mit Hilfe eines Peltiermoduls die Austauschvorgänge auf einfache Art und Weise betrachtet werden können.

Nutzt man den Seebeck-Effekt aus, kann man das Peltiermodul als eine Art Wärmestrommesser einsetzen. Die aus der Temperaturdifferenz resultierende Spannung ist ein Maß für die übertragene Wärme zwischen zwei Körpern. Mit Hilfe des Peltiermoduls ist es also möglich, den Schülern/Schülerinnen anschaulich zu machen, dass die Wärme eine Prozessgröße und keine Zustandsgröße ist. Ein durchgängiges Unterrichtskonzept, das auf dieser Idee aufbaut, wurde noch nicht entwickelt.

3.3 Der Temperaturbegriff

Der Temperaturbegriff ist gleich mit mehreren Fehlvorstellungen verbunden:

- Temperatur ist eine materialabhängige Größe (Thomaz, Malaquias, Valente und Antunes 1995). Grund dafür ist, dass sich zwei Körper wie zum Beispiel Metall und Holz bei gleicher Temperatur unterschiedlich warm anfühlen.
- Temperatur ist gleich Wärme oder Kälte (Manthei 1980, Fleischer 1991).

Trotz dieser weit verbreiteten Präkonzepte wird der Einführung der Temperatur im Vergleich zur Einführung der Wärme zu wenig Beachtung geschenkt. Eines der wenigen Unterrichtskonzepte, das der Temperatur einen breiten Raum gibt, ist der Karlsruher Ansatz. Er wurde bereits im Kapitel 3.1.4 (Seite 22) vorgestellt.

Untersuchungen:

Manthei (1980) befragte 100 Schüler/innen, bei denen die Wärmelehre bereits behandelt wurde, was sie unter dem Begriff „Temperatur“ verstehen:

- 11 % Temperatur und Wärme sind Synonyme
- 17 % Angabe eines Messverfahrens für die Temperatur
- 24 % Temperatur als Zustandsgröße
- 40 % Temperatur als mittlere kinetische Energie der Teilchen
- 8 % Fehlende oder nicht deutbare Antwort

Fleischer (1991) wies nach, dass sich viele Schüler/innen auch nach der Behandlung der Thermodynamik von ihrem subjektiven Temperaturempfinden leiten lassen. So hielten 37,8 % der Schüler/innen, die von ihm untersucht wurden, die Aussage „blankes Metall hat im Zimmer eine niedrigere Temperatur als Holz“ für richtig.

Untersuchungen von Engel, Clough und Driver (1984) haben gezeigt, dass Schüler/innen ihr subjektives Temperaturempfinden nur selten auf die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Materialien zurückführen.

	Erklärung des Phänomens durch Wärmeleitung (Prozentsatz der 16-jährigen befragten Schüler/innen)
„Löffel aus verschiedenen Materialien (z.B. Metall, Plastik) stehen in einem Glas, das mit heißem Wasser gefüllt ist. Schüler fühlen, welcher Löffel sich am wärmsten anfühlt. Warum fühlt sich der Metalllöffel wärmer an als der Plastiklöffel?“	83 %
„An einem kalten Tag bemerkt Sally, dass sich die Metallteile ihres Fahrradlenkers kälter anfühlen als die Plastikgriffe. Warum fühlt sich das Metall kälter an als das Plastik?“	21 %

Tabelle nach Engel, Clough und Driver (1984)

Einen aus didaktischer Sicht interessanten Temperaturbegriff entwickelte Ernst Mach (Bradley 1974). Er ließ sich dabei von Joseph Black inspirieren, der die Wärme als eine unzerstörbare Flüssigkeit ansah. Black nahm an, dass alle Gegenstände eine Art verbundene Gefäße sind, die untereinander Wärme flüssigkeit austauschen können. Zwei Körper haben dann die gleiche Temperatur, wenn ihre Wärme flüssigkeiten das gleiche Niveau besitzen. Der Pegelstand ist für Black gleich der Temperatur. Für Mach war die Temperatur ein Potential ähnlich dem Flüssigkeitsdruck oder elektrischen Druck. Genau so wie bei kommunizierenden Röhren, bei denen das Flüssigkeitsniveau innerhalb jeder beliebig geformten Röhre gleich ist, weisen nach Mach Körper dann das gleiche Wärme flüssigkeitsniveau auf, wenn sie thermisch miteinander verbunden sind und im thermischen Gleichgewicht stehen. Damit besitzen diese Körper die gleiche Temperatur.

Eine sehr schöne Einführung des Temperaturbegriffs bringt Baierlein (1999). Er beschreibt, dass ein „wärmer“ Körper beim thermischen Kontakt mit einem „kälteren“ Körper an diesen Energie abgibt. Die Temperatur gibt dann mit Hilfe eines Zahlenwertes an, wie warm ein Körper ist.

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Beim Münchner Unterrichtskonzept wird dem Präkonzept „Temperatur ist eine materialabhängige Größe“ aktiv entgegen getreten, indem die physikalischen und physiologischen Gründe, die zu dieser Fehlvorstellung führen, besprochen werden. Der Temperaturbegriff von Mach ist zwar sehr anschaulich, birgt aber die Gefahr in sich, dass die Schüler/innen die Fehlvorstellung „Wärme ist ein Stoff“ verinnerlichen. Daher wird auf diese Sichtweise beim Münchner Unterrichtskonzept verzichtet.

3.4 Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik

Zu Beginn der siebziger Jahre, als sich das Rohöl sprunghaft verteuerte, fanden Schlagworte wie „Energiekrise“ oder „Energieverbrauch“ in unseren alltäglichen Sprachgebrauch Einzug. Wie konnte man da in der Schule noch den Energieerhaltungssatz besprechen, wenn die oben genannten Schlagworte ihn geradezu ad absurdum führten?

Der Schlüssel zur Neuinterpretation der Energie war der zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Er sagt nicht nur aus, dass alle Naturvorgänge irreversibel sind, sondern hilft auch bei der Interpretation, dass die Energie bei solchen Vorgängen nicht verloren geht, sondern entwertet wird.

Man scheute sich jedoch noch längere Zeit davor den zweiten Hauptsatz in der Sekundarstufe I einzuführen, da er bei den Physikern untrennbar mit der Entropie verbunden ist. Einen Ausweg sah man schließlich darin, nicht die Formulierung „die Entropieänderung ist nie negativ“, sondern eine der im Folgenden aufgezählten Formulierungen des 2. Hauptsatzes zu benutzen:

- Wärme fließt von selbst nur von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper niedrigerer Temperatur.
- Die Wärmeerzeugung durch Reibung ist irreversibel (Planck, 1921).
- Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die allein die Erzeugung von mechanischer Energie und die Abkühlung eines Wärmereservoirs bewirkt. (Besonders bei der Betrachtung von Wärmekraftmaschinen geeignet.)

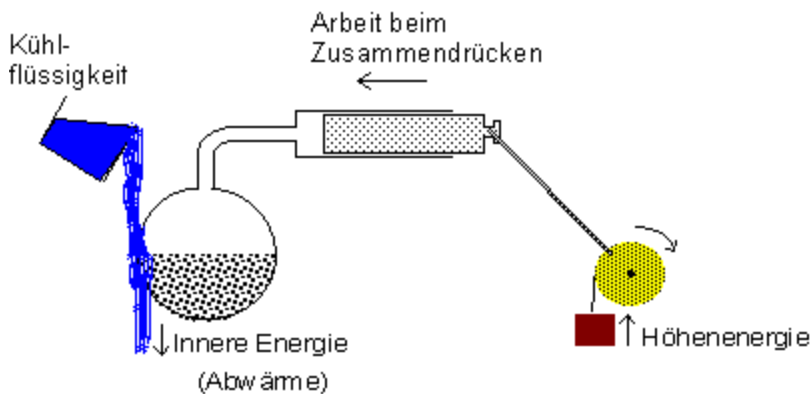
Aus diesen Beschreibungen des 2. Hauptsatzes heraus entstanden verschiedene Unterrichtskonzepte, die den 1. und den 2. Hauptsatz in enge Beziehung zueinander brachten. Hier sollen die wichtigsten vorgestellt werden.

Vorstellung von Unterrichtskonzepten:

Ansatz von Marenke (1984):

Marenke bindet den 2. Hauptsatz in die Betrachtung von Wärmekraftmaschinen mit ein. Zu Beginn der Unterrichtseinheit erfahren die Schüler/innen anhand mehrerer Versuche, dass elektrische Energie, mechanische Energie etc. (hochwertige Energieform) vollständig in innere Energie umgewandelt werden kann. Die vollständige Umwandlung von innerer Energie in eine der genannten hochwertigen Energien ist jedoch nicht möglich.

Ein schönes Experiment ist in diesem Zusammenhang die atmosphärische Dampfmaschine, die mit den Mitteln jeder Physiksammlung gebaut werden kann. Der Versuch zeigt, dass zum Zurückziehen des Kolbens das Gas in dem Kolben abgekühlt werden muss. Mit diesem Versuch wird den Schülern/Schülerinnen vor Augen geführt, dass bei einer periodisch arbeitenden Maschine immer Energie z.B. in Form von Erwärmung des Kühlwassers „verloren“ geht.



Modell einer Atmosphärischen Dampfmaschine

Die von Mahrenke besprochenen Versuche führen schließlich zu der oben für Wärmekraftmaschinen vorgestellten Formulierung des 2. Hauptsatzes. Durch diese Art der Einführung kann den Schülern/Schülerinnen auch sehr anschaulich die Energieentwertung vor Augen geführt werden. Die Energie, die im Kühlwasser steckt, kann zum Antreiben der Wärmekraftmaschine so nicht herangezogen werden.

Der Karlsruher Ansatz nach Hermann und Falk (1979):

Beim Karlsruher Ansatz (siehe Kapitel 3.1.4) werden die Energieerhaltung und die Irreversibilität in einem Atemzug genannt. Dabei findet die Betrachtung irreversibler Prozesse nicht erst bei der Wärmelehre, sondern bereits in der Mechanik statt.

Untersuchungen:

S. Kesidou und R. Duit (S. Kesidou, R. Duit 1991) untersuchten zwei Gruppen von Gymnasiasten/innen. Die eine Gruppe von 34 Schülern/Schülerinnen aus Schleswig-Holstein wurde nach dem herkömmlichen Unterrichtskonzept unterrichtet. Die andere Gruppe, die aus 10 baden-württembergischen Schüler/innen bestand (zweite Gruppe), wurde nach dem Karlsruher Ansatz unterrichtet. Anzumerken ist, dass bei der ersten Gruppe im Gegensatz zur zweiten Gruppe irreversible Prozesse und damit der 2. Hauptsatz nicht besprochen wurden.

Item: Irreversibilität bei Temperatenausgleichsvorgängen

Gruppe 1: Die Schüler/innen sind der Meinung, dass Vorgänge nur in eine Richtung ablaufen können. Sie sagen zunächst auch gleiche Endtemperaturen voraus. Aber: „Über die Hälfte der schleswig-holsteinischen Schüler ist bei genauerem Nachfragen der Meinung, dass unter bestimmten Bedingungen entweder die Temperaturdifferenz am Ende des Vorgangs bestehen bleibt oder aber aus dem Ausgleichszustand neu entstehen kann.“ (S. Kesidou, R. Duit 1991)

Gruppe 2: „Sie gehen alle vom Temperatenausgleich als etwas Selbstverständlichem aus. ... , sie verweisen nämlich darauf, daß Energie oder Entropie vom warmen zum kalten Körper übergeht, bis die Temperaturen gleich sind.“ (S. Kesidou, R. Duit 1991)

Item: Irreversibilität des Vorgangs „Ein Pendel kommt von allein zur Ruhe“

Gruppe 1: Die Schüler/innen begründen diesen Vorgang ebenso wie zuvor schon die Temperatenausgleichsvorgänge damit, dass die Vorgänge nur in eine Richtung ablaufen können. Eine Einbettung dieser Überzeugung in die Energievorstellung ist den Schülern/Schülerinnen nicht gelungen.

Gruppe 2: Die Deutung der Irreversibilität erfolgt nicht mit Energieumwandlungsideen. „Der Grund dafür scheint zu sein, dass ihnen (wie übrigens ebenfalls den schleswig-holsteinischen Schülern) häufig nicht bewußt ist, dass man aus Wärme Bewegung erhalten kann.“ (S. Kesidou, R. Duit 1991)

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Wie oben gezeigt, hat der zweite Hauptsatz der Thermodynamik viele Gesichter. Aus diesem Grund wird er beim Münchner Unterrichtskonzept gleich an zwei Stellen angesprochen. Zum einen direkt nach der Untersuchung der Wärmeübergänge. Hier wird die Irreversibilität von Temperatenausgleichsvorgängen hervorgehoben. Zum andern wird der zweite Hauptsatz bei der Besprechung der Wärmekraftmaschinen nochmals aufgegriffen. Anhand einer atmosphärischen Dampfmaschine kann gezeigt werden, dass bei einer periodisch arbeitenden Maschine immer Energie z.B. in Form von Erwärmung des Kühlwassers verloren geht.

3.5 Betrachtung einiger physikalischer Größen

Nach den ausführlichen fachdidaktischen Betrachtungen des Energieerhaltungssatzes, der Arbeit, der Temperatur, der innere Energie und der Wärme ist es an der Zeit diese Größen aus der Sicht der Fach-Physik her zu betrachten.

3.5.1 Die Energieerhaltungssatz der Mechanik

Der Energieerhaltungssatz der Mechanik folgt aus der Homogenität der Zeit. Diese Homogenität hat zur Folge, dass die Lagrange-Funktion eines abgeschlossenen Systems nicht explizit von der Zeit abhängt. Daraus folgt:

$$\frac{dL(q_i, \dot{q}_i)}{dt} = \sum_i \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial q_i} \ddot{q}_i \right)$$

Mit der Lagrange-Gleichung $\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}$ die für konservative Kräfte gilt, ergibt sich:

$$\frac{dL}{dt} = \sum_i \left(\left(\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial q_i} \ddot{q}_i \right)$$

$$\frac{dL}{dt} = \sum_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i - L \right) = 0$$

Daraus folgt der Energieerhaltungssatz der Mechanik:

Er besagt, dass die Größe $E = \sum_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i - L$ in einem abgeschlossenen konservativen System erhalten bleibt.

Wenn man in die obige Gleichung für die Energie E die Lagrange-Funktion $L = \sum_a \frac{1}{2} m_a \dot{q}_a^2 - U(q_1, q_2, \dots)$ (in kartesischen Koordinaten) eines abgeschlossenen Systems von Massenpunkten einsetzt, so erhält man:

$$\begin{aligned} E &= \sum_i \frac{\partial \sum_a \left(\frac{1}{2} m_a \dot{q}_a^2 - U(q_1, q_2, \dots) \right)}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i - \left(\sum_a \frac{1}{2} m_a \dot{q}_a^2 - U(q_1, q_2, \dots) \right) \\ &= \sum_a m_a \dot{q}_a^2 - \sum_a \frac{1}{2} m_a \dot{q}_a^2 + U(q_1, q_2, \dots) \\ &= \sum_a \frac{1}{2} m_a \dot{q}_a^2 + U(q_1, q_2, \dots) \end{aligned}$$

Das bedeutet, dass sich die Gesamtenergie eines abgeschlossenen mechanischen Systems aus der kinetischen Energie $\sum_a \frac{1}{2} m_a \dot{q}_a^2$ und der potenziellen Energie $U(q_1, q_2, \dots)$ zusammensetzt.

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Wenn man die obige Herleitung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik betrachtet, ist zu erkennen, dass an keiner Stelle der Arbeitsbegriff herangezogen wird. Daher muß es durch Betrachtung geeigneter konservativer Systeme möglich

sein, den Energieerhaltungssatz auch ohne die Verwendung der mechanischen Arbeit mit den Schülern/Schülerinnen zu erarbeiten. Beim Münchner Unterrichtskonzept wurden zwei Versuche zur Erarbeitung des Energieerhaltungssatzes gewählt: Das Hüpfen-Lassen eines vollelastischen Gummiballs und das Schwingen eines Pendels. Bei den Versuchen ist darauf zu achten, dass die periodische Bewegung nicht zu oft wiederholt wird, denn aufgrund der vorhandenen geringen Reibung sind auch diese Systeme nicht vollständig konservativ, denn für Reibungskräfte gilt nicht $\oint \vec{F} d\vec{s} = 0$.

3.5.2 Die Temperatur

Besteht ein abgeschlossenes System aus zwei Körpern, so gilt für die Gesamtenergie $E = E_1 + E_2$ wenn die Wechselwirkungsenergie zwischen den beiden Teilsystemen vernachlässigbar ist. Für die Gesamtentropie gilt $S(E_1, E_2) = S_1(E_1) + S_2(E_2) = S_1(E_1) + S_2(E - E_1)$. Da die Gesamtenergie E konstant ist, ist die Entropie eine Funktion nur einer Variablen, in diesem Fall E_1 .

Sind die beiden Körper zudem im thermischen Gleichgewicht, weist die Gesamtentropie S ein Maximum auf. Es gilt:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dE_1} &= 0 \\ \frac{dS_1}{dE_1} + \frac{dS_2}{dE_1} &= 0 \\ \frac{dS_1}{dE_1} + \frac{dS_2}{dE_2} \frac{dE_2}{dE_1} &= 0 \\ \text{da } \frac{dE_2}{dE_1} &= -1 \text{ ist, folgt:} \\ \frac{dS_1}{dE_1} &= \frac{dS_2}{dE_2} \quad (\text{I}) \end{aligned}$$

Die absolute Temperatur T wird nun durch folgende Gleichung definiert (Landau, Lifschitz 1979):

$$\frac{dS}{dE} = \frac{1}{T}$$

Die Gleichung (I) besagt zusammen mit der Definition der absoluten Temperatur, dass zwei Körper, die sich im thermischen Gleichgewicht befinden, die gleiche Temperatur besitzen.

Mit Hilfe der Formel $\frac{d \ln T}{dt} = - \frac{\left(\frac{\partial \mathcal{N}}{\partial \alpha}\right)_P}{\left(\frac{\partial \mathcal{Q}}{\partial \mathcal{P}}\right)_t}$ (Landau, Lifschitz 1979) ist es möglich

einen Zusammenhang zwischen der absoluten Temperatur T und der Temperatur τ eines Thermometers bis auf eine Konstante zu bestimmen.

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Die Einführung des absoluten Temperaturbegriffs zeigt, dass der Temperaturbegriff eng mit der Idee des thermischen Gleichgewichts verwoben ist. Daher werden beim Münchner Unterrichtskonzept das thermische Gleichgewicht und der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik ausführlich behandelt.

3.5.3 Innere Energie, Arbeit und Wärme

Unter der Energie E eines Systems versteht man gewöhnlich die Gesamtenergie eines Körpers. Diese setzt sich aus der kinetischen Energie des Schwerpunkts des Körpers, seiner potenziellen Energie und seiner inneren Energie zusammen. Unter der inneren Energie versteht man (nach Kelvin) diejenige Energie, die übrigbleibt, wenn man von der Gesamtenergie des Systems die äußere rein mechanische Energie (kinetische und potenzielle) Energie abzieht (Bergmann-Schäfer 1990).

Wesentlich ist dabei, dass man weder die Arbeit noch die Wärme als Energieformen betrachtet. Landau und Lifschitz (1979) schreiben dazu: „Deshalb kann man von der Energie E in einem gegebenen Zustand sprechen, aber z.B. nicht von der Wärmemenge, die ein Körper in einem Zustand enthält. Mit anderen Worten, die Energie eines Körpers kann man nicht in mechanische und Wärmemenge unterteilen. Eine solche Unterteilung ist nur dann möglich, wenn man von der Energieänderung spricht. Die Änderung der Energie bei einer Zustandsänderung kann man einteilen in die Wärmemenge, die von dem Körper aufgenommen (oder abgegeben) wird und die Arbeit, die an ihm geleistet wird (oder die von ihm selbst an anderen Körpern geleistet wird).“ Diese Aussage von Landau und Lifschitz gibt den Inhalt des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik wieder.

$$dE = Q + W$$

bzw. $dE = TdS - pdV$ (für rein mechanische Arbeit)

Folgerungen für den Aufbau des Münchner Unterrichtskonzepts:

Landau und Lifschitz heben hervor, dass sowohl die Wärme als auch die Arbeit keine Energieformen sind. Dieser Erkenntnis folgt das Münchner Unterrichtskonzept. Daher wird auch auf den Begriff „Wärmeenergie“, wie er auch teilweise noch in der Physikdidaktik verwendet wird (Duit 1991), verzichtet.

4. Vorstellung des Münchner Unterrichtskonzepts

Ziel dieser Arbeit war es, mit dem neuen Unterrichtskonzept die vom bayerischen Lehrplan vorgegebenen Unterrichtsinhalte nach didaktischen Gesichtspunkten neu zu ordnen und gegebenenfalls weitere, für das Verständnis benötigte Lerninhalte anzufügen. An dieser Stelle möchte ich auf das Kapitel „1. Einführung“ verweisen. Dort werden die einzelnen Ziele, die mit dem neuen Unterrichtskonzept verfolgt wurden, detailliert dargelegt.

4.1 Übersicht über das Münchner Unterrichtskonzept

An dieser Stelle wird nur ein Überblick über das Münchner Unterrichtskonzept gegeben. Am Ende vom Kapitel 4 ist das ausführliche Skriptum des Münchner Unterrichtskonzepts (für Schüler/innen und Lehrer/innen) abgedruckt.

A. Reibung:

Es werden die verschiedenen Arten der Reibung besprochen. Die Bearbeitung dieses Stoffgebietes erfolgt wie bei den bisher gebräuchlichen Unterrichtskonzepten.

B. Mechanische Energie und Arbeit

B.1 Energieerhaltungssatz:

Die Betrachtung der sich wiederholenden Bewegung eines nahezu idealen Gummiballs führt zu der Annahme, dass es in dem abgeschlossenen mechanischen System Erde-Gummiball eine Größe gibt, die während der Bewegung konstant bleibt. Diese Größe nennt man Gesamtenergie. Weitere Versuche aus der Mechanik zeigen, dass diese Annahme sinnvoll ist. So haben zum Beispiel sowohl das Fadenpendel als auch ein Massenstück, das an einer Schraubenfeder hängt, einen immer wiederkehrenden, also konstanten Bewegungsablauf.

B.2 Energiearten und Energieumwandlung:

Die unterschiedlichen Energiearten (kinetische Energie, Höhenenergie und Spannenergie) ergeben sich bei genauerer Betrachtung der oben angesprochenen Experimente ganz zwangsläufig. In diesem Zusammenhang werden bereits die vorkommenden Energieumwandlungen qualitativ besprochen. Nach der Herleitung der Formeln für die verschiedenen Energiearten wird die Anwendung des Energieerhaltungssatzes anhand unterschiedlicher Beispiele vertieft.

B.3 Arbeit:

Bei der darauffolgenden Betrachtung nicht abgeschlossener mechanischer Systeme ergibt sich die Notwendigkeit eine neue physikalische Größe zu definieren, die die Änderung der Gesamtenergie des nicht abgeschlossenen Systems beschreibt. Diese Größe nennt man Arbeit. Mehrere Übungsbeispiele zeigen, dass auch in abgeschlossenen mechanischen Systemen zwischen Teilsystemen Arbeit verrichtet wird.

B.4 Kraftwandler:

Anschließend betrachtet man die in der 8. Klasse bereits kennengelernten Kraftwandler näher. Hier werden bereits bekannte Formeln, wie zum Beispiel das Hebelgesetz, mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes hergeleitet. Aber auch die Formel beim Flaschenzug und der schiefen Ebene werden deduktiv gewonnen und anschließend experimentell bestätigt.

B.5 Wirkungsgrad und Leistung:

Die Behandlung des Wirkungsgrads und der Leistung erfolgen traditionell.

C. Wärmelehre

C.1 Innere Energie

C.1.1 Definition der inneren Energie und Erweiterung des Energieerhaltungssatzes:

Bisher wurden nur Systeme betrachtet, bei denen die Reibung vernachlässigt werden konnte. Diese Einschränkung wird nun aufgegeben. Der folgende Versuch lässt die Schüler/innen anschaulich erfahren, wie die mechanische Energie aufgrund der Reibung in innere Energie umgewandelt wird: An einer Schnur wird ein Körper der Masse 1 kg befestigt. Anschließend lässt man die Schnur so durch die Hand gleiten, dass sich der Körper mit konstanter Geschwindigkeit nach unten bewegt. Die Schüler/innen spüren, dass sich ihre Hand erwärmt hat.

Da der Energieerhaltungssatz immer gelten soll, muss die zu Beginn vorhandene Energie in die Hand und in die Schnur gegangen sein. Diese sich in der Hand und im Seil befindende Energie nennt man „innere Energie“. Der Energieerhaltungssatz, den die Schüler in der Mechanik kennengelernt haben, ist damit um die innere Energie erweitert worden.

Das oben beschriebene Experiment zeigt, dass die Temperaturerhöhung ein Maß für die Änderung der „inneren Energie“ ist. Ziel ist es nun, eine Formel für die Berechnung der Änderung der inneren Energie angeben zu können. Um dies zu erreichen, wird im Folgenden erst einmal die Temperaturmessung durchgenommen.

C.1.2 Temperaturmessung:

Zu Beginn dieses Kapitels wird der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik besprochen. Er soll bei den Schüler/innen das Verständnis wecken, warum man Temperaturen überhaupt messen kann. Erst dann erfolgt eine Betrachtung der einzelnen Thermometerarten. Daran schließt sich eine, kurz gehaltene mikroskopische Betrachtung der inneren Energie an. Sie wird aber nur dazu benötigt, die Kelvin-Temperaturskala einzuführen. 0 K wird als die Temperatur definiert, bei der den Teilchen eines Körpers keine Energie mehr entzogen werden kann. Auf die mikroskopische Betrachtung der inneren Energie wird im gesamten restlichen Unterrichtskonzept kein Bezug mehr genommen.

C.1.3 Die Formel für die Änderung der inneren Energie auf thermische Art:

Jetzt kann die Herleitung der Formel ($\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$) für die Änderung der inneren Energie auf thermische Art erfolgen. Traditionell wird die Formel für die Änderung der inneren Energie mit dem Kurbelversuchs hergeleitet. Dass die Schüler bei diesem Versuch Probleme haben, den Zusammenhang zwischen mechanischer Energie und

innerer Energie zu erkennen, ist ganz offensichtlich. So wird die Änderung der inneren Energie nicht von einer mechanischen Energie herbeigeführt, sondern durch einen biochemischen Prozess verursacht. Diese Probleme treten bei dem neu konzipierten Versuch nicht auf. Die Schüler erfahren unmittelbar, wie sich die Änderung der mechanischen Energie auf die Temperaturerhöhung auswirkt. Der Versuch wird wie folgt durchgeführt: Eine Schnur, an die ein Massenstück (1 kg) geknotet ist, wird zum Teil um ein Thermometer (Thermoelement) gewickelt. Damit die Reibung groß genug ist, wird die Schnur mit samt dem Thermometer zwischen zwei Styroporsteine eingeklemmt. Das Massenstück lässt man nun langsam nach unten gleiten. Dabei erwärmen sich sowohl das Thermometer, als auch das Seil, das um das Thermometer gewickelt ist. Gemessen wird der Weg h , den das Massenstück zurückgelegt hat, und die am Thermometer angezeigte Temperaturerhöhung. Der Versuch ergibt: $\Delta h \sim \Delta \vartheta$.

Wenn bei dem Versuch immer der gleiche Anteil von ΔE_H des Massenstücks an das Thermometer abgegeben wird, gilt für die Änderung der inneren Energie des Thermometers: $\Delta E_i \sim \Delta E_H$.

Mit $\Delta E_H \sim h$ und dem experimentell bestimmten $\Delta h \sim \Delta \vartheta$ folgt: I. $\Delta E_i \sim \Delta \vartheta$.

Die direkte Proportionalität zwischen ΔE_i und der Masse m des Thermometers wird anhand des folgenden Gedankenversuchs hergeleitet:

Bei n gleichen Anordnungen (gleiche Massen der durch Reibung erwärmten Thermometer, gleiche ΔE_H) wird bei jeder der n Anordnungen die innere Energie um $\Delta E_i^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3 \dots n$) geändert, insgesamt also um $\Delta E_i = n \cdot \Delta E_i^{(k)}$. Bei den n Thermometern mit Gesamtmasse $n \cdot m$ wurde die innere Energie also insgesamt um $n \cdot \Delta E_i^{(k)}$ geändert. Daraus folgt II. $\Delta E_i \sim m$.

Aus den funktionalen Zusammenhängen von I. und II. ergibt sich die gewünschte Formel $\Delta E_i = cm\Delta \vartheta$. c ist dabei die spezifische Wärmekapazität, eine materialabhängige Größe.

Dieser Versuch zur direkten Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie ist ein wesentlicher Bestandteil des Münchner Unterrichtskonzepts. Er stellt eine Brücke zwischen der Mechanik und der Wärmelehre dar. Zudem zeigt er, dass sich der Energieerhaltungssatz wie ein roter Faden durch die einzelnen Teilgebiete der Physik zieht.

C.2 Änderung der inneren Energie

C.2.1 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre:

Mit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik wird den Schülern/Schülerinnen anschließend gezeigt, dass der Wert der inneren Energie sowohl durch Arbeit, als auch durch Wärme geändert werden kann. Dabei wird deutlich darauf hingewiesen, dass die Wärme genauso wie die Arbeit keine Energieart ist. Die Wärme wird hier als übertragene Energiemenge zweier Körper unterschiedlicher Temperatur verstanden, die sich im thermischen Kontakt befinden. Den Schülern/innen wird damit vor Augen geführt, dass die Wärme in der Wärmelehre annähernd die gleiche Rolle spielt wie die Arbeit bei der mechanischen Energie. Die Arten des thermischen Energieaustausches, nämlich Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung, runden dieses Kapitel ab.

C.2.2 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre:

An die Besprechung des Wärmeaustausches schließt sich naheliegender die Besprechung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre an (alle in der Natur vorkommenden Vorgänge sind irreversibel). Reversible und irreversible Vorgänge werden hier ausführlich besprochen.

C.3 Änderung des Aggregatzustands:

Die Stoffbearbeitung erfolgt in üblicher Weise.

C.4 Das ideale Gas:

Die Herleitung des idealen Gasgesetzes wird mit der daran anschließenden Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie motiviert. Dazu verweist man darauf, dass nach dem 1. Hauptsatz der Wärmelehre innere Energie in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Technisch realisiert wird dies sowohl in einer Gasturbine, als auch in dem Benzinmotor, indem man die Expansion eines Gases bei einem Verbrennungsprozess ausnutzt.

C.5 Technische Nutzung der inneren Energie:

Bei den Wärmekraftmaschinen wird der 2. Hauptsatz der Thermodynamik nochmals betrachtet. (Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als die Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie und die Abkühlung eines Wärmereservoirs.) Dass dadurch der Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschinen beschränkt ist, wird ausführlich problematisiert.

Die Betrachtung der Energieentwertung schließt das Kapitel „Technische Nutzung der inneren Energie“ ab.

4.2 Vergleich des Münchner Unterrichtskonzepts mit dem konventionellen Konzept

Die untenstehende Tabelle zeigt den Unterschied zwischen dem bisherigen, konventionellen Unterrichtskonzept und dem Münchner Unterrichtskonzept auf. Die Unterrichtsinhalte wurden neu angeordnet und bei der Wärmelehre weitere Unterrichtsinhalte zugefügt.

		konventionelles Unterrichtskonzept	Münchner Unterrichtskonzept
Mechanik	Reibung	bei beiden gleich behandelt	
	Energie und Arbeit	Betrachtung mechanischer Maschinen (Fortführung aus der 8. Klasse) $\Rightarrow F \cdot s = \text{konstant}$ \Downarrow Arbeit := $F \cdot s$ \Downarrow Energie := gespeicherte Arbeit Energiearten, Energieumwandlungen, dann Energieerhaltungssatz	Energieerhaltungssatz \Rightarrow Energiearten \Downarrow Motivation mit nicht abgeschlossenen Systemen Arbeit := ΔE und Arbeit = $F \cdot s$ \Downarrow mechanische Maschinen betrachtet unter dem Blickwinkel des Energieerhaltungssatzes

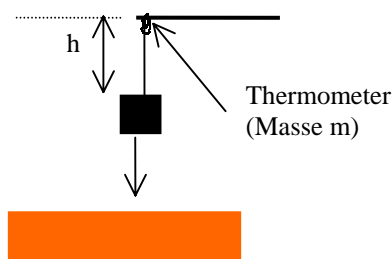
	Wirkungsgrad, Leistung	Bei beiden gleich behandelt	
Wärmelehre	Innere Energie	Zu einem späteren Zeitpunkt.	Energieerhaltungssatz erfordert neue Energieform, die innere Energie
	Temperatur	Temperaturmessung	Temperaturmessung, nullter Hauptsatz der Thermodynamik
	ideales Gas	Volumenausdehnung verschiedener Körper ↓ Gesetz des idealen Gases	Zu einem späteren Zeitpunkt.
	Innere Energie, Wärme	Reibungsarbeit bewirkt Änderung der inneren Energie $\Delta E_i = W_R = cm\Delta\theta$ Energieerhaltungssatz ↓ Wärme $Q := \Delta E_i$ (bei Temperaturänderung)	Bei der Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie ergibt sich mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes: $\Delta E_i = cm\Delta\theta$ ↓ Erster Hauptsatz der Thermodynamik
	reversible und irreversible Prozesse	Zu einem späteren Zeitpunkt.	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik
	Aggregatzustand	Bei beiden gleich behandelt	
	ideales Gas	Bereits früher behandelt.	Voruntersuchung zur technischen Nutzung der inneren Energie \Rightarrow Gesetz des idealen Gases
	Wärmekraftmaschinen mit reversiblen und irreversiblen Vorgängen	Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie \Rightarrow reversible und irreversible Prozesse; Energieentwertung	Betrachtung der technischen Nutzung der inneren Energie \Rightarrow andere Betrachtung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre; Energieentwertung

4.3 Versuche zur Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie

Wie bereits erwähnt, hat der Versuch zur Veranschaulichung der Umwandlung von mechanischer in innere Energie innerhalb des Münchner Unterrichtskonzeptes eine zentrale Bedeutung. Bei diesem Versuch wird den Schülern direkt vor Augen geführt, wie die Höhenenergie in innere Energie umgewandelt wird.

Beim Münchner Unterrichtskonzept verwendeter Versuch:

Versuchsaufbau:



Versuchsaufbau zur Bestimmung der Formel $\Delta E_i = c m \Delta \vartheta$

Typische Versuchsergebnisse:

h in cm	0	5	10	15	20
ΔE_h in J	0	0,49	0,98	1,47	1,96
$\Delta \vartheta$ in °C	0	0,6	1,2	1,8	2,3

Unter der Annahme, dass die Änderung der Höhenenergie zur Änderung der inneren Energie des Thermometers direkt proportional ist, folgt aus der Tabelle:

$$\frac{\Delta E_i}{\Delta \vartheta} = \text{constant} \quad \text{bzw.} \quad \Delta E_i \sim \Delta \vartheta$$

Mit der, aus einem Gedankenversuch gewonnen Proportionalität $\Delta E_i \sim m$ ergibt sich:

$$\Delta E_i \sim \Delta \vartheta m$$

Jetzt ist nur noch die spezifische Wärmekapazität als Proportionalitätskonstante einzuführen. Dann erhält man die Formel für die Änderung der inneren Energie

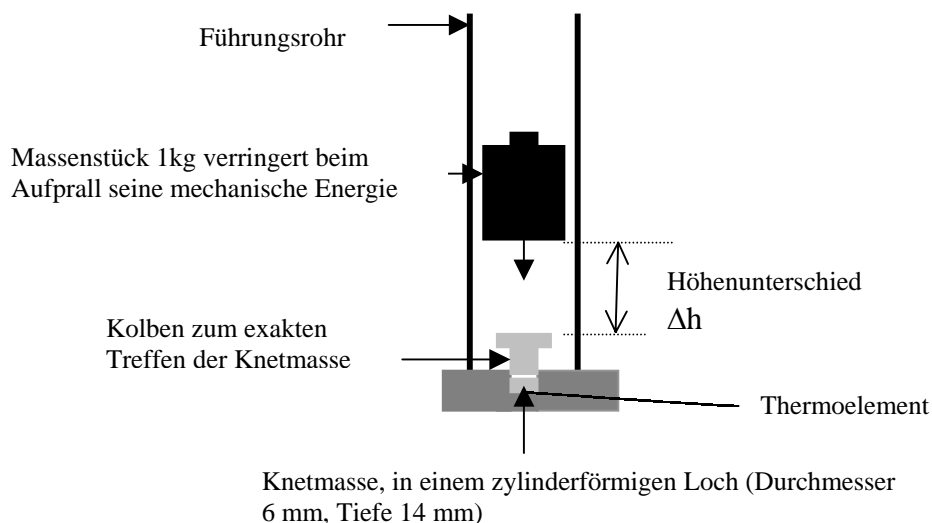
$$\Delta E_i = c m \Delta \vartheta$$

Das Umwandlungsrohr:

Zu Beginn war eine andere Versuchsdurchführung geplant. Da hier, wie weiter unten noch genauer beschrieben wird, mechanische Probleme auftraten, wurde dieser Versuchsaufbau letztlich verworfen.

Bei dem Versuch lässt man ein Massenstück aus einer bekannten Höhe fallen. Das Massenstück fällt anhand des Führungsrohrs zentriert auf einen Kolben, der daraufhin ein Stück Knetmasse kurzzeitig komprimiert. Ein Teil der mechanischen Energie des Massenstücks ist bei diesem Vorgang in innere Energie der Knetmasse umgewandelt worden. Die dadurch entstandene Temperaturerhöhung wird mit Hilfe eines Thermoelements bestimmt.

Den detaillierten Versuchsaufbau zeigen die folgenden Abbildungen. Sowohl der Kolben als auch die Grundplatte sind aus Edelstahl.



Schnittbild durch das „Umwandlungsrohr“

Die folgende Tabelle zeigt eine typische Messreihe dieses Versuchs:

Fallstrecke Δh des 1kg Massenstücks in cm	5	10	15
Thermospannung in μV	5,5	12	18
Temperatur-erhöhung: $\Delta\vartheta$ in $^{\circ}\text{C}$	0,133	0,294	0,441

Im Rahmen der Messgenauigkeit gilt also: $\Delta h \sim \Delta\vartheta$.

Bei den Versuchen galt: Masse der Knetmasse: 0,450g; spezifische Wärmekapazität $c_K = 3,25 \text{ J}/(\text{gK})$ Thermospannung des Thermoelements bei der Temperaturerhöhung um 1°C : $41\mu\text{V}$. Das Thermoelement zeigt in weniger als einer Sekunde die Temperaturänderung an. Der Ausschlag geht aber auch innerhalb weniger Sekunden zurück.

Die Temperaturerhöhung scheint etwas zu gering zu sein. Mit der folgenden Rechnung wird gezeigt, wie sich die Temperatur der Knetmasse erhöhen müsste, wenn sich die gesamte mechanische Energie in innere Energie der Knetmasse umwandeln würde, und das Massenstück aus 15 cm herunter fällt.

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{Massenstück}} &= \Delta E_{i, \text{Knetmasse}} \\ m_M g h &= c_K m_K \Delta\vartheta \\ \Delta\vartheta &= \frac{m_M g h}{c_K m_K} = \frac{1\text{kg} \cdot 9,81 \frac{\text{J}}{\text{mkg}} \cdot 0,15\text{m}}{3,25 \frac{\text{J}}{\text{gK}} \cdot 0,450\text{g}} \approx 1,006\text{K} \pm 0,117\text{K} \end{aligned}$$

Der Wert $\pm 0,117\text{K}$ gibt den Fehler aus der hier - nicht vorgeführten - Fehlerrechnung wieder.

Die theoretisch bestimmte Temperaturerhöhung von 1,006K ist also 2,3 mal so groß wie die experimentell bestimmte Temperaturerhöhung. Das hat mehrere Gründe:

- Das Thermoelement kann nicht in die Mitte, sondern nur an den Rand der Knetmasse positioniert werden, da die Kräfte, die beim Auftreffen des Massenstücks an dem Thermoelement angreifen, so groß sind, dass das Thermoelement nach einigen Versuchen brechen würde.
- Der Kolben ist nach einigen Versuchen sehr stark eingekerbt. Daher wird die Reibung zwischen dem Kolben und dem zylinderförmigen Loch sehr groß.
- Es wird nicht die gesamte mechanische Energie in innere Energie der Knetmasse umgewandelt.
- Der Wärmeübergang Knetmasse - Thermoelement ist schlecht.

Zusammenfassung:

Der beim Münchner Unterrichtskonzept letztendlich verwendete Versuch ist sehr gut zur Einführung der Formel $\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$ geeignet. Er ist schnell aufgebaut und besteht nur aus Materialien, die in jeder Physiksammlung einer Schule vorrätig sind. Das Fallrohr erfüllt diese Anforderungen leider nicht. Zudem sind bei ihm die mechanischen Beanspruchungen an einzelne Bauteile groß, so dass des öfteren Defekte auftreten.

4.5 Das Skript des Münchner Unterrichtskonzepts

Bader

Physik 9

Verfasser: Martin Bader

Das Werk und seine Teile sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verfassers.

Inhaltsangabe

I. Reibung	3
1. Reibungsarten und deren mikroskopische Betrachtung	3
2. Die Reibungsgesetze	4
II. Mechanische Energie und Arbeit	6
1. Die Energie E	6
1.1 Abgeschlossene mechanische Systeme und Energieerhaltungssatz	6
1.2. Die verschiedenen energetischen Größen in der Mechanik	8
1.2.1 Potentielle Energie E_p	8
1.2.1.1 Höhenenergie E_h	8
1.2.1.2 Spannenergie E_s	10
1.2.2 Die kinetische Energie E_k	11
1.3 Energieumwandlungen	14
1.4 Das perpetuum mobile erster Art	17
2. Die Arbeit W	18
3. Kraftwandler und Wirkungsgrad	22
4. Leistung	25
III. Wärmelehre	26
1. Die innere Energie	26
1.1 Definition der inneren Energie und Erweiterung des Energieerhaltungssatzes.	26
1.2 Die Temperatur und der nullte Hauptsatz der Wärmelehre	27
1.2.2 Verschiedene Thermometer; Temperatureinheit und Temperaturskala.....	28
1.2.3 Anomalie des Wassers	30
1.3 Mikroskopische Betrachtung von Körpern	31
1.4 Spezifische Wärmekapazität	34
2. Änderung der inneren Energie	36
2.1 Änderung der inneren Energie durch Verrichten von Arbeit	36
2.2 Änderung der inneren Energie durch Wärmeaustausch	36
2.3 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre	39
2.4 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre	40
3. Die Änderung des Aggregatzustandes	43
3.1 Das Schmelzen	44
3.2 Das Erstarren	44
3.3 Das Sieden	44
3.4 Das Kondensieren	45
3.5 Das Verdunsten	45
4. Das ideale Gas	47
5. Die technische Nutzung der inneren Energie	50
5.1 Physikalische Grundlagen der Wärmekraftmaschinen; Das perpetuum mobile zweiter Art	50
5.2 Die atmosphärische Dampfmaschine	52
5.3 Verbrennungsmotoren	53

I. Die Reibung

1. Reibungsarten und deren mikroskopische Betrachtung

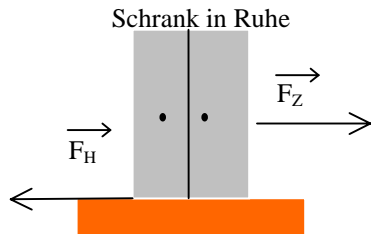


Abb. 3.1: Haftreibung bei einem Schrank.

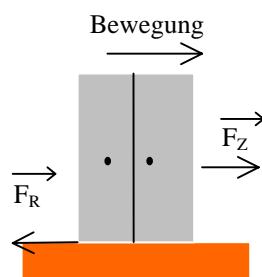


Abb. 3.2: Gleitreibung bei dem, mit konstanter Geschwindigkeit gezogenen Schrank.

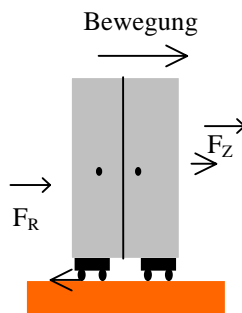


Abb. 3.3: Rollreibung bei dem, mit konstanter Geschwindigkeit auf kleinen Wagen gerollten Schrank.

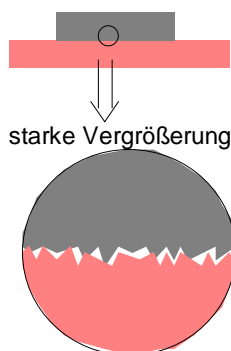


Abb. 3.4: Verzahnung der Oberflächen bei der Reibung

Die Reibung spielt in vielen Vorgängen des täglichen Lebens eine wichtige Rolle. Will man zum Beispiel einen Schrank verschieben (Kraft F_Z), muß an ihm recht kräftig gezogen werden, dass er sich überhaupt in Bewegung setzt (siehe Abb. 3.1). Grund dafür ist, dass die Berührungsflächen des Schranks und des Bodens aneinander reiben. Die Kraft, mit der der Schrank aufgrund der Haftreibung zu Beginn am Boden haftet, nennt man Haftkraft F_H . Die maximale Haftkraft ist die Reibungskraft, die angreift, wenn sich der Gegenstand gerade noch nicht bewegt. Wenn nach heftigem Ziehen der Schrank erst einmal über den Boden gleitet, ist zum Ziehen eine wesentlich geringere Kraft nötig (siehe Abb. 3.2). Man nennt die Kraft, mit der die Bewegung des Schranks aufgrund der Gleitreibung gehemmt wird, Gleitreibungskraft F_R . Möbelpacker bewegen einen Schrank meist sehr viel einfacher. Sie stellen den Schrank auf zwei kleine Rollwagen und schieben ihn mit einer wesentlich geringeren Kraft an die gewünschte Stelle (siehe Abb. 3.3). Diese Art der Bewegung wird aufgrund der Rollreibungskraft F_{Rol} gehemmt. Haftkraft, Gleitreibungskraft und Rollreibungskraft hemmen die gewünschte Bewegung. Daher sind hier diese drei Kräfte gegen die Bewegungsrichtung gerichtet.

Es gibt aber auch viele Bewegungen, die ohne Reibung gar nicht möglich wären. Ein Beispiel ist das Laufen, bei dem zwischen der Schuhsohle und der Unterlage Reibung vorhanden sein muß. Sonst käme man nicht vorwärts.

Versuchen wir nun zu verstehen, warum die Reibung zwischen zwei Körpern überhaupt auftritt. Dazu muß man zwei Effekte unterscheiden, die für die Reibung zwischen zwei Körpern verantwortlich sind:

1. Verzahnung der Oberflächen: Meist sind die Rauheiten der Oberflächen für die Reibung verantwortlich. Stellt man einen Körper auf die Unterlage, verzahnen sich Aufgrund der Rauheiten die Oberflächen ineinander. Damit der Körper bewegt werden kann, müssen die Verzahnungen zwischen dem Körper und der Unterlage gelöst werden (siehe Abb. 3.4). Dabei werden die verzahnten Teile etwas verbogen. Lösen sich die verzahnten Teile von Körper und Unterlage wieder, schwingen sie kurzzeitig hin und her.
2. Anziehen der Oberflächenteilchen: Haben zwei Körper, wie zum Beispiel zwei Glasplatten, sehr glatte Oberflächen, kommen sich die Teilchen (Atome oder Moleküle), aus denen die Körper aufgebaut sind, an der Berührungsfläche der beiden Körper sehr nahe. Diese Oberflächenteilchen ziehen sich gegenseitig an und bewirken so eine Reibungskraft, die oft sehr viel größer ist als die Reibungskraft, die durch die Verzahnung der Oberflächen zustande kommt. Um dies zu zeigen, machen wir folgenden Versuch. Zwei Glasplatten werden aufeinandergelegt. Zum gegenseitigen Verschieben der Glasplatten ist eine große Kraft erforderlich.

Zusammenfassung:

1. Reibungskräfte kommen entweder durch Verzahnung der Oberflächen (siehe Abb. 3.4) oder durch gegenseitige Anziehung der Oberflächenteilchen zustande.
2. Man unterscheidet drei Arten der Reibung:
Haftreibung, Gleitreibung und Rollreibung.
3. Für die Reibungskräfte zwischen einem Körper und einer Unterlage gilt:
maximale Haftkraft > Gleitreibungskraft > Rollreibungskraft

2. Die Reibungsgesetze

Nun beschäftigen wir uns damit, wie man die verschiedenen Reibungskräfte überhaupt messen kann und welche Gesetze gelten. Zieht man an einem Körper so, dass seine Geschwindigkeit konstant ist (das schließt den Fall, dass die Geschwindigkeit null ist, mit ein), so ist nach dem Trägheitssatz von Newton die Summe aller Kräfte gleich null. Daraus folgt, dass bei konstanter Geschwindigkeit die Richtungen der Reibungskraft und der Zugkraft entgegengesetzt, ihre Beträge aber gleich sind.

Somit haben wir eine einfache Möglichkeit gefunden, die Gleit- und Rollreibungskräfte zu messen. Man zieht dazu einen Körper mit konstanter Geschwindigkeit über die Unterlage und mißt mit Hilfe eines Kraftmessers die Zugkraft. Die Reibungskraft hat dann den gleichen Betrag wie die Zugkraft.

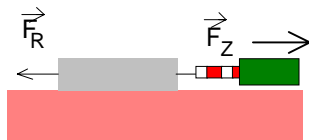


Abb. 4.1: Zusammenhang von Reibungskraft F_R und Zugkraft F_Z

Von welchen Größen sind die Haftkraft und die Gleitreibungskraft abhängig?

Wir untersuchen die Abhängigkeit der Reibungskraft von der Geschwindigkeit, der Größe der Berührungsflächen und der Normalkraft (Abb. 4.1).

1. Reibungskraft in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit:

Wir ziehen einen Holzquader mit unterschiedlichen, aber konstanten Geschwindigkeiten über den Tisch. Man erhält unabhängig von der Geschwindigkeit immer die gleiche Zugkraft. Da Gleitreibungskraft und Zugkraft vom Betrag her gleich sind, folgt aus den Versuchen, dass die Gleitreibungskraft nicht von der Geschwindigkeit abhängt.

2. Reibungskraft in Abhängigkeit von der Größe der Berührungsfläche:

Dazu legen wir den Holzquader einmal auf die kleinere und einmal auf die größere Fläche und messen jeweils die maximale Haftkraft und die Gleitreibungskraft. Für beide Reibungsarten gilt, dass die Kraft von der Größe der Berührungsfläche unabhängig ist.

3. Reibungskraft in Abhängigkeit von der Normalkraft.

Wir legen auf den Holzquader unterschiedlich viele, gleich große Holzquader und messen für die zwei Reibungsarten die Zugkräfte. Da wir den Holzquader über eine waagrechte Unterlage ziehen, ist in diesem Fall der Betrag der Normalkraft gleich der Gewichtskraft des Körpers (siehe Abb. 4.1).

Haftreibung:

F_N in N	1,2	2,4	3,6
F_H in N	0,72	1,5	2,1
$\frac{F_H}{F_N}$	0,60	0,63	0,60

Gleitreibung:

F_N in N	1,2	2,4
F_R in N	0,50	1,0
$\frac{F_R}{F_N}$	0,42	0,42

In der Tabelle ist F_H die maximale Haftkraft, das ist die Reibungskraft, bei der sich der Körper, wenn an ihm gezogen wird, gerade noch nicht bewegt.

Für beide Reibungsarten gilt: $F_{\text{Reibung}} \sim F_N$.

Bei der Haftreibung nennt man die Proportionalitätskonstante Haftreibungszahl μ_H , bei der Gleitreibung Gleitreibungszahl μ_R .

Tab. 5.1:

Beispiele für Reibungszahlen:

	μ_H	μ_R
Eiche auf Eiche:	0,54	0,34
Stahl auf Stahl: (trocken)	0,15	0,12
Stahl auf Stahl: (geschmiert)		0,01
Stahl auf Eis:	0,025	0,014
Reifen auf Asphalt: (trocken)	0,55	0,3
Reifen auf Asphalt: (mit Wasser)	0,3	0,15

Reibungsgesetz für die Haftreibung: $F_H = \mu_H \cdot F_N$ μ_H : Haftreibungszahl F_H : maximale Haftkraft F_N : NormalkraftReibungsgesetz für die Gleitreibung: $F_R = \mu_R \cdot F_N$ μ_R : Gleitreibungszahl F_R : Gleitreibungskraft F_N : Normalkraft

Gewünschte und unerwünschte Reibung:

In vielen Bereichen des täglichen Lebens ist die Reibung erwünscht. So macht zum Beispiel die Reibung zwischen Schuhsohle und Boden das Gehen überhaupt möglich. Ohne das Verhaken der Rauigkeiten von Schuhsohle und Boden würde die Schuhsohle wie auf einer glatten Eisfläche auf dem Boden entlanggleiten. Auch das Abbremsen eines Fahrrads beruht auf der Reibung zwischen Bremsbacken und Felge des Fahrrades. Ohne die Reibung wäre ebenso das Abrollen der Reifen des Fahrrades auf der Straße nicht möglich.

Wird die Reibung nicht erwünscht, zum Beispiel zwischen den einzelnen Gliedern einer Fahrradkette, kann die Reibung durch Einfetten oder Ölen verringert werden. Eine andere Möglichkeit, die Reibung zu verringern ist, anstatt der Gleitreibung die viel geringere Rollreibung in Kauf zu nehmen. So kann man zum Beispiel die Reibung in einer Radachse mit Hilfe von Kugellagern deutlich verringern.

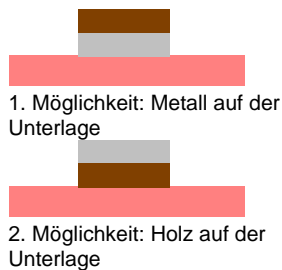
Aufgaben:

Abb. 5.1: Zur Aufgabe 2

- Eine Eiskunstläuferin (50 kg) wird von ihrem Partner mit konstanter Geschwindigkeit über das Eis gezogen.
 - Berechne die Zugkraft, wenn die Kufen des Schlittschuhs aus Stahl sind.
 - Was geschieht, wenn man die Zugkraft vergrößert?
- Ein Holzquader und ein Metallquader werden mit konstanter Geschwindigkeit über eine Unterlage gezogen (siehe Abb. 5.1). Es gilt: $\mu_{R,Holz} = 0,60$ und $\mu_{R,Metall} = 0,40$. In welchem der zwei skizzierten Fälle ist die Reibungskraft größer? (Begründung!)
- Ein Vater zieht den Schlitten ($m = 10,1$ kg) seines Sohnes auf horizontaler Strecke mit konstanter Geschwindigkeit ($\mu_R = 0,400$).
 - Mit welcher Kraft muß er den Schlitten ziehen?
 - Mit welcher Kraft muß er am Schlitten ziehen, wenn die Auflagefläche des Schlittens doppelt so groß ist?
 - Mit welcher Kraft muß der Vater den Schlitten mit dem darauf sitzenden Sohn ($m_S = 40$ kg) ziehen?
- Ein Auto der Masse 1,34 t fährt auf einer waagrechten Straße. Als ein Reh über die Straße läuft, tritt der Fahrer des Wagens so stark auf die Bremse, dass die Räder blockieren. Berechne die Reibungskraft, die an dem Wagen angreift, wenn die Straße trocken ist.

II. Mechanische Energie und Arbeit

1. Die Energie E

Warum rollt eine Kugel eine schiefe Ebene nicht beliebig weit hinauf?
Warum wird ein Turmspringer, der vom 10-Meter-Brett springt, immer schneller, je näher er der Wasseroberfläche kommt?

Warum schwingt ein Fadenpendel, wenn es mal angestoßen wurde, sehr lange hin und her?

All diesen Phänomenen liegt das gleiche Naturgesetz zu Grunde. Dieses Naturgesetz wollen wir näher untersuchen und dabei verstehen lernen.

1.1 Abgeschlossene mechanische Systeme und Energieerhaltungssatz

Zur einfachen Beschreibung von physikalischen Zuständen ist es nützlich, abgeschlossene Systeme zu betrachten. Abgeschlossenes System bedeutet, dass das System keinen oder vernachlässigbaren Kontakt mit der Umgebung hat. Der Zusatz "mechanisch" heißt, dass die Reibung ausgeschlossen wird. Selbstverständlich ist dies eine idealisierte Betrachtungsweise, sie kommt in der Natur so nicht vor.

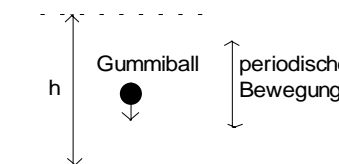


Abb. 6.1 Abgeschlossenes System "Gummiball mit Erde"

Betrachten wir nun das abgeschlossene mechanische System "Gummiball mit Erde" (Abb. 6.1).

Die Betrachtung des Gummiballs alleine ist nicht sinnvoll, da sich Gummiball und Erde gegenseitig anziehen. Die gegenseitige Anziehung bewirkt, dass der Gummiball auf seinem Weg nach unten immer schneller, und auf seinem Weg nach oben immer langsamer wird.

Lässt man einen Gummiball los, nimmt seine Höhe ab und er wird gleichzeitig immer schneller. Beim Auftreffen auf den Boden dreht sich seine Bewegungsrichtung um. Auf dem Weg nach oben nimmt seine Höhe zu und er wird dabei immer langsamer. Wenn er seine ursprüngliche Höhe erreicht hat, beginnt der Bewegungsablauf von neuem. Der Gummiball pendelt also immer zwischen der Höhe h , aus der er losgelassen wurde, und dem Boden hin und her. Es ist ein immer wiederkehrender, also konstanter Bewegungsablauf. Dies legt nahe, dass es in diesem abgeschlossenen System eine konstante Größe (eine Erhaltungsgröße) gibt, die diesen Bewegungsablauf charakterisiert. Diese Erhaltungsgröße nennt man Gesamtenergie E .

Die Überlegungen veranlassen uns zu folgender Annahme:

Energieerhaltungssatz der Mechanik:
In einem abgeschlossenen mechanischen System ist die Gesamtenergie E eine Erhaltungsgröße (d.h. sie ist konstant).

Anmerkung: Der Energieerhaltungssatz der Mechanik kann auch theoretisch hergeleitet werden.

Die konstante Gesamtenergie kann man mit einer bestimmten Menge Bausteine vergleichen, um die sich zwei Kinder streiten. Einmal kann sich das eine Kind mehr Bausteine verschaffen, und ein anderes Mal kann das andere Kind mehr Bausteine zu sich her ziehen. Die Summe der Bausteine ist immer konstant, nur ist die Aufteilung auf zwei Haufen jeweils unterschiedlich. So ist es auch bei der Energie in dem obigen Beispiel mit dem Gummiball. Sie kann in der Bewegung oder der Höhe stecken, wobei die Summe aus "Bewegungsenergie" und "Höhenenergie" konstant ist, denn diese Summe ist die Gesamtenergie E .

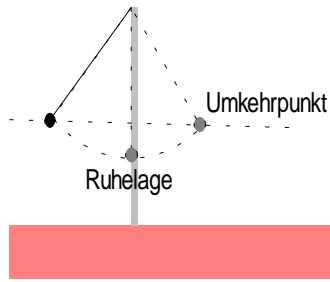


Abb. 7.1: Abgeschlossenes System "Fadenpendel mit Erde"

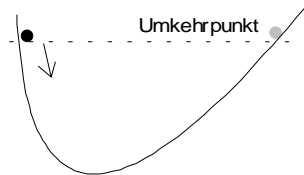


Abb. 7.2: Kugel auf einer Rennbahn.

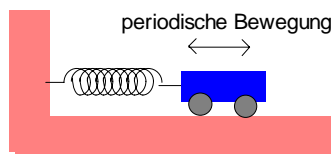


Abb. 7.3: Abgeschlossenes System "Schraubenfeder"



Abb. 7.4: Abgeschlossenes System "bewegte Kugel, bei der die Summe aller Kräfte 0 ist."

Betrachten wir nun einige Anwendungsbeispiele des Energieerhaltungssatzes der Mechanik:

a. Das abgeschlossene mechanische System "Fadenpendel mit Erde" (Abb. 7.1).

Lässt man den Pendelkörper an einem Umkehrpunkt los, wird er auf seinem Weg nach unten immer schneller und seine Höhe verringert sich dabei. Das heißt, dass seine Bewegungsenergie zunimmt und seine Höhenenergie abnimmt. Nachdem er die Ruhelage passiert hat, bewegt er sich wieder nach oben. Dabei wird er wieder langsamer und seine Höhe wächst an. Seine Bewegungsenergie nimmt ab und seine Höhenenergie zu. Wenn er seine ursprüngliche Höhe erreicht hat, kehrt sich die Bewegungsrichtung um. Der Bewegungsablauf beginnt von neuem.

Bei der geschilderten Bewegung nimmt also eine Energieform immer auf Kosten der anderen zu. Die Gesamtenergie, die sich aus der Summe der beiden Energieformen Bewegungsenergie und Höhenenergie ergibt, bleibt dabei konstant.

b. Das abgeschlossene mechanische System "Kugel auf einer Rennbahn mit Erde" (Abb. 7.2).

Lässt man eine Kugel auf einer flexiblen Rennbahn an einem Umkehrpunkt los, so wird sie auf ihrem Weg nach unten immer schneller und ihre Höhe verringert sich dabei. Das heißt, dass ihre Bewegungsenergie zunimmt und ihre Höhenenergie abnimmt. Bewegt sie sich wieder nach oben, wird sie wieder langsamer. Hier nimmt also ihre Bewegungsenergie ab und ihre Höhenenergie zu. Wenn sie ihre ursprüngliche Höhe erreicht hat, dreht sich die Bewegungsrichtung um und der Bewegungsablauf beginnt von neuem.

Dass die Kugel immer wieder auf die gleiche Höhe kommt, ist also nicht auf eine besondere Form der Bahn zurückzuführen, sondern liegt ausschließlich in der Konstanz der Gesamtenergie begründet.

c. Das abgeschlossene mechanische System "Schraubenfeder" (Abb. 7.3).

Da sich der Abstand zwischen dem Wagen und dem Schwerpunkt der Erde nicht ändert, bewirkt die Gravitationskraft keine Änderung der Geschwindigkeit des Wagens. Die Wechselwirkung zwischen dem Wagen und der Erde braucht also nicht betrachtet zu werden. Daher gehört die Erde dem abgeschlossenen System nicht an.

Lässt man den Wagen los, wird er um so schneller, je mehr sich die Feder entspannt. Hier nimmt also seine Bewegungsenergie zu und die "Spannenergie" der Feder ab. Nachdem der Wagen die Ruhelage passiert hat, wird die Feder wieder gespannt (zusammengedrückt) und der Wagen wird langsamer. Die Bewegungsenergie des Wagens nimmt also wieder ab und die Spannenergie der Feder nimmt wieder zu. Ist die Feder um die gleiche Strecke zusammengedrückt, wie sie zuvor gespannt war, beginnt der Bewegungsablauf von neuem.

Auch bei dieser Bewegung nimmt also eine Energieform immer auf Kosten der anderen zu. Die Gesamtenergie, die sich aus der Summe der beiden Energieformen Bewegungsenergie und Spannenergie ergibt, bleibt dabei konstant. Deshalb schwingt die Schraubenfeder immer mit der gleichen maximalen Auslenkung um die Ruhelage herum.

d. Das abgeschlossene mechanische System "bewegte Kugel, bei der die Summe aller Kräfte 0 ist" (Abb. 7.4).

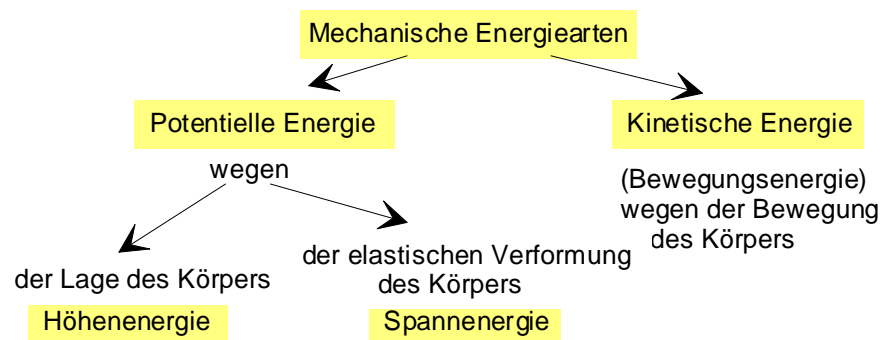
Da sich in diesem Fall die Bewegungsenergie in keine andere Energieart umwandeln kann und die Gesamtenergie (hier nur Bewegungsenergie) in dem abgeschlossenen System konstant bleibt, kann sich der Betrag der Geschwindigkeit des Körpers nicht verändern. Diese Aussage ist ein Teil des Trägheitssatzes von Newton, den wir in der 8. Klasse kennengelernt haben.

Anmerkung:

Es kommt sehr häufig vor, dass eine physikalische Größe in einem abgeschlossenen System konstant ist. Man ist sich dessen nur nicht bewusst. Betrachten wir dazu folgendes Beispiel: Ein geschlossenes Gefäß, in dem sich etwas Wasser befindet, wird erhitzt. Dabei verdampft ein Teil des Wassers. Der Wasserspiegel in dem Gefäß sinkt. Die Wassermenge bleibt also nicht konstant. Dass die Wassermoleküle beim Verdampfen nicht einfach verschwunden sind, wird klar, wenn man das Gefäß wieder abkühlt. Der Wasserspiegel steigt wieder auf den ursprünglichen Wert. Da sich hier die Wassermenge verändert, fragt man sich natürlich, was hier die Erhaltungsgröße ist. In diesem Fall ist es so: Die Anzahl der Wassermoleküle, die sich zum einen in der flüssigen und anderen in der gasförmigen Phase befinden, bleibt immer gleich. Bei diesem Beispiel ist also die Teilchenzahl die Erhaltungsgröße.

1.2 Die verschiedenen energetischen Größen in der Mechanik

In der Mechanik werden zwei verschiedenartige Energiearten unterschieden:



1.2.1 Potentielle Energie E_p

Potentielle Energie hat ein Körper aufgrund seiner Lage, oder weil er elastisch verformt wurde.

1.2.1.1 Höhenenergie E_h :

Ein Körper besitzt aufgrund seiner Lage Höhenenergie.

Untersuchen wir erst einmal, ob die Höhenenergie von dem Weg abhängt, den ein Körper beschreibt, wenn sich seine Lage um die Höhe h ändert.

Wir lassen eine Kugel auf einer flexiblen Rennbahn eine bestimmte Höhendifferenz h herunterrollen. Die kinetische Energie und damit die Geschwindigkeit der Kugel nach dem Herunterrollen um die Höhe h ist von der Form der Bahn unabhängig. Um dies experimentell zu überprüfen, messen wir bei unterschiedlicher Form der Bahn die Momentangeschwindigkeit, die die Kugel nach dem Überwinden der Höhe h jeweils hat. Die Momentangeschwindigkeit v erhält man, indem man die Zeit t mißt, in der die Kugel (Durchmesser d) die Lichtschranke beim Vorbeirollen verdunkelt. Es gilt dann: $v = \frac{d}{t}$. Es zeigt sich im Versuch,

dass bei unterschiedlichen Formen der Bahn immer wieder die gleiche Momentangeschwindigkeit gemessen wird. Wählen wir eine andere Höhendifferenz und messen - bei unterschiedlichen Formen der Rennbahn - erneut die Momentangeschwindigkeit, ist auch diese von der Form der Rennbahn unabhängig.

Die Versuche zeigen, dass die Höhenenergie unabhängig von dem Weg ist, den ein Körper bei der Lageänderung um die Höhe h beschreibt. Das bedeutet aber, dass die Höhenenergie nicht von dem individuellen Weg abhängt, der beim Heben eines Körpers beschrieben wird, sondern von der sich ergebenden Höhendifferenz h .

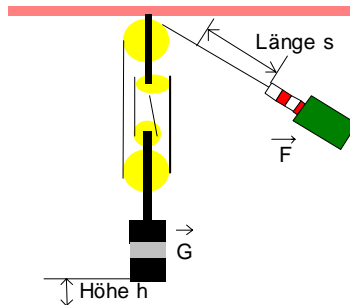


Abb. 9.1: Flaschenzug

Um die Formel für die Höhenenergie E_h herzuleiten, überlegen wir uns, wie man die Höhenenergie eines Körpers um einen ganz bestimmten Wert ändern kann. Das erreichen wir, indem der Körper um eine bestimmte Höhe h angehoben wird. Gehoben werden kann der Körper zum Beispiel mit Hilfe eines Flaschenzugs (siehe Abb. 9.1).

Zugkraft am Seil: $F = \frac{1}{4} G$ (Das Gewicht der Rollen wird vernachlässigt.)

Gezogene Seillänge: $s = 4h$

$$F \cdot s = \frac{1}{4} G 4h = G \cdot h$$

Im Gegensatz zu F und s ist das Produkt aus G und h von der Anzahl der Rollen unabhängig. Nimmt man einen Flaschenzug mit einer anderen Anzahl von festen und losen Rollen, kommt man zum selben Ergebnis. Da das Produkt aus G und h keine Größen enthält, die angeben, wie der Körper um die Höhe h gehoben wurde, ist anzunehmen, dass die Höhenenergie E_h das Produkt aus der Gewichtskraft G und der Höhe h ist.

$$E_h = G \cdot h$$

Wenn wir von der Höhe eines Körpers sprechen, müssen wir immer angeben, von welchem Bezugsniveau aus wir die Höhe des Körpers messen. Die Wahl des Bezugsniveaus ist uns freigestellt, wir müssen nur bei der Angabe des Energiewerts mit angeben, auf welches Bezugsniveau wir es beziehen. Daher ergibt sich für die Höhenenergie:

Höhenenergie: $E_h = Gh$

h : von einem (beliebig festgelegten) Bezugsniveau aus gemessene Höhe.

Meßeinheit: $[E_h] = 1 \text{ J (Joule)}$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$$

Anmerkung: Ein Körper hat nur dann Höhenenergie, wenn er von einem anderen Körper aufgrund der Gravitation angezogen wird. In der obigen Formel drückt sich diese Tatsache durch den Ortsfaktor g (bei $G = m \cdot g$) aus. Ist der gleiche Körper jeweils einen Meter von der Mond- bzw. Erdoberfläche entfernt, so ist die Höhenenergie auf dem Mond wegen $g_{\text{Mond}} = \frac{1}{5} g_{\text{Erde}}$ nur $\frac{1}{5}$ der Höhenenergie auf der Erde.

Aufgaben:

1. Ein Koffer des Gewichts 100 N steht auf einem 2,0 m hohen Schrank.
 - a. Berechne die Höhenenergie, wenn als Bezugsniveau der Zimmerboden angenommen wird.
 - b. Berechne die Höhenenergie, wenn als Bezugsniveau die Platte eines 1,2 m hohen Tisches genommen wird.

2. a. Berechne die Höhenenergie eines Aktenordners der Masse 1,5 kg, der 50 cm vom Erdboden entfernt ist.
b. Berechne die Höhenenergie einer Schultasche der Masse 10 kg, die 50 cm vom Erdboden entfernt ist.
3. Ein Gewichtheber hat ein Gewicht der Masse 130 kg hochgehoben. Die Höhenenergie des Massenstücks beträgt 1,9 kJ. Wie hoch hat der Gewichtheber das Massenstück gehoben?
4. Gazellen können mit allen vier Beinen gleichzeitig in die Luft springen. Die Sprünge sind dazu da, die Aufregung auf andere Tiere zu übertragen. Bei einem solchen Prellsprung erreicht ein Gazellenbock eine Höhe von 3,1 m. Seine Höhenenergie ändert sich dabei um 1,5 kJ. Berechne die Masse des Gazellenbocks.
5. Eine Raumkapsel der Masse 1,7 t ist von der Erdoberfläche 1,4 km entfernt. Wie weit ist sie dann von der Marsoberfläche ($g_{\text{Mars}} = 3,8$ Fehler!) entfernt, wenn sie die gleiche Höhenenergie wie auf der Erde hat?

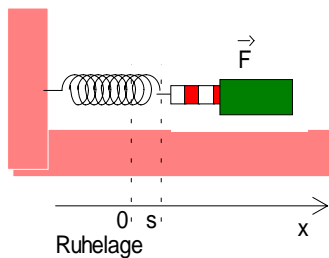


Abb. 10.1: Spannenergie einer Schraubenfeder

1.2.1.2 Spannenergie E_s :

Ein elastisch verformter Körper hat aufgrund seiner Verformung Energie gespeichert (siehe Abb. 10.1).

Zur Erinnerung: Bei einer Schraubenfeder gilt das Hooksche Gesetz:

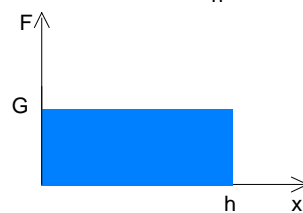
$$F = D \cdot s$$

D: Federhärte

s: Elongation (Auslenkung aus der Ruhelage)

Vergleichen wir die Spannenergie einer Schraubenfeder und die Höhenenergie eines Körpers miteinander.

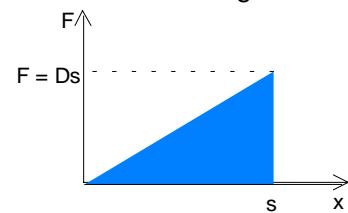
Höhenenergie E_h



$$E_h = G \cdot h$$

E_h ist die Fläche unter dem Graphen.

Spannenergie E_s



Wir vermuten: E_s muß auch hier gleich der

Fläche unter dem Graphen

sein.

$$E_s = \frac{1}{2} s \cdot (Ds)$$

$$E_s = \frac{1}{2} Ds^2$$

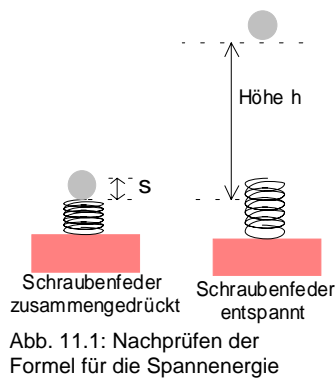
Wenn die Vermutung richtig ist, dass die Fläche unter dem Graphen bei einem x-F-Diagramm gleich der Energie ist, ergibt sich: die Spannenergie ist gleich dem halben Produkt aus der Federhärte D und dem Quadrat der Elongation s.

Spannenergie: $E_s = \frac{1}{2} Ds^2$

D: Federhärte

s: Elongation

Meßeinheit: $[E_s] = 1 \text{ J}$



Mit dem folgenden Versuch überprüfen wir die Formel für die Spannenergie experimentell.

Wir katapultieren mit Hilfe einer zusammengedrückten Schraubenfeder ($D = 0,49 \text{ Fehler!}$) eine Kugel der Masse $14,3 \text{ g}$ nach oben (siehe Abb. 11.1). Wenn die Kugel den oberen Umkehrpunkt erreicht hat, muß sich nach dem Energieerhaltungssatz die Spannenergie $E_{s;\text{Feder}}$ der Feder vollständig in Höhenenergie $E_{h;\text{Kugel}}$ der Kugel umgewandelt haben. Daher gilt: $E_{s;\text{Feder}} = E_{h;\text{Kugel}}$.

Experiment: Stauchung der Feder: $s = 4,0 \text{ cm}$;
Höhe der Kugel: $h = 27 \text{ cm}$.

$$E_{s;\text{Feder}} = \frac{1}{2} D s^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,49 \text{ Fehler!} \cdot 16 \text{ cm}^2 = 39,2 \text{ Ncm} \approx 0,039 \text{ J.}$$

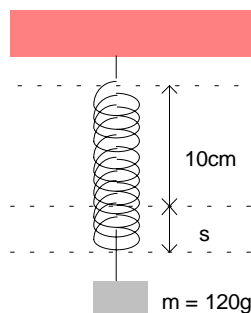
$$E_{h;\text{Kugel}} = mgh = 0,0143 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ Fehler!} \cdot 27 \text{ cm} = 37,87 \text{ Ncm} \approx 0,038 \text{ J}$$

Das Experiment ergibt: $E_{s;\text{Feder}} = E_{h;\text{Kugel}}$.

Der Versuch bestätigt die Formel für die Spannenergie.

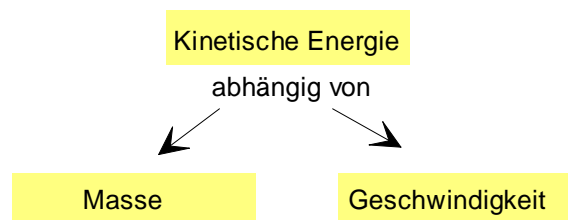
Aufgaben:

- Eine Feder der Federhärte $2,70 \frac{\text{N}}{\text{m}}$ wird um 5 cm zusammengedrückt. Berechne die Spannenergie.
- Wie ändert sich die Spannenergie, wenn die Federhärte D einer Feder verdreifacht wird?
 - Wie ändert sich die Spannenergie, wenn die Auslenkung s einer Feder verdreifacht wird?
- Wie weit muß man eine Feder ($D = 7,5 \text{ Fehler!}$) auseinanderziehen, damit sie eine Spannenergie von 39 J besitzt?
- Welche Federhärte hat eine Feder, die bei einer Stauchung um $4,0 \text{ cm}$ eine Spannenergie von $0,189 \text{ J}$ besitzt?
- Man hängt an eine senkrecht aufgehängte Feder der Länge $10,0 \text{ cm}$ ein Massenstück von 120 g (siehe Abb. 11.2).
 - Berechne die Länge der gespannten Feder.
 - Berechne die Spannenergie der gespannten Feder.



1.2.2 Die kinetische Energie E_k

Unter kinetischer Energie versteht man die Energie, die in einem Körper aufgrund seiner Bewegung gespeichert ist.



E_k in Abhängigkeit von der Masse:

Um den Zusammenhang von kinetischer Energie und Masse herzuleiten, betrachten wir n zunächst ruhende Körper mit gleichen Massen m , die die Höhe h nach unten fallen. Da sich die Höhenenergien der Körper um den gleichen Wert ändern, sind die kinetischen Energien E_k der Körper aufgrund des Energieerhaltungssatzes gleich. Die n Körper der Gesamtmasse $n \cdot m$ haben also eine gesamte kinetische Energie von $n \cdot E_k$. Eine Ver- n -fachung der Masse m eines Körpers führt unter sonst gleichen Bedingungen zu einer Ver- n -fachung der kinetischen Energie E_k . Daraus folgt:

I. $E_k \sim m$

E_k in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit:

Um den Zusammenhang von kinetischer Energie und Geschwindigkeit experimentell herzuleiten, machen wir folgenden Versuch: Wir lassen einen Gummiball aus unterschiedlichen Höhen fallen und messen die Durchschnittsgeschwindigkeit, die er kurz vor Erreichen des Bodens hat.

Da in diesem abgeschlossenen System die Gesamtenergie konstant ist, lässt sich der Wert der kinetischen Energie am Boden wie folgt berechnen:

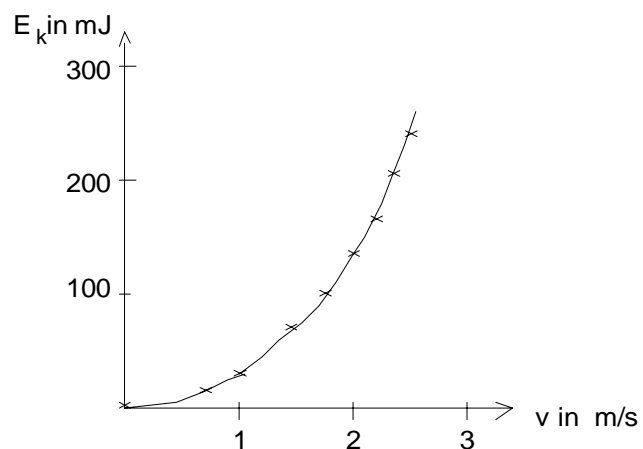
$$E_k = E_h = G \cdot h.$$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit v erhält man, indem man die Zeit t misst, die der Gummiball benötigt, um zwei sehr dicht hintereinander liegende Lichtschranken (Abstand d) nacheinander beim Vorbeifliegen zu verdunkeln. Es gilt dann: $v = \frac{d}{t}$.

$E_k (= E_h)$ in mJ	0	17	34	69	103
v in $\frac{m}{s}$	0	0,7	1,0	1,4	1,7

$E_k (= E_h)$ in mJ	137	172	206	240
v in $\frac{m}{s}$	2,0	2,2	2,4	2,6

Um den Zusammenhang zwischen E_k und v zu erkennen, zeichnet man ein v - E_k -Diagramm.



Der Graph ist eine Parabel. Daraus folgt: **II. $E_k \sim v^2$**

Aufgrund der Abhängigkeit der kinetischen Energie von der Masse und der Geschwindigkeit des Körpers ergibt sich aus den Formeln I und II:

$$E_k \sim mv^2$$

Nach dem Einsetzen einer Proportionalitätskonstanten A erhält man folgende Formel:

$$E_k = Amv^2$$

Mit Hilfe eines Messwertes bestimmen wir die Proportionalitätskonstante.

Masse des Balls: $m = 0,071 \text{ kg}$, $E_k = 0,034 \text{ J}$, $v = 1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

$$E_k = Amv^2$$

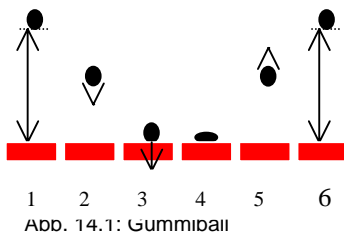
$A = \text{Fehler!} \approx 0,49$ Genaue Messungen ergeben: $A = \text{Fehler!}$

Die kinetische Energie ist somit das halbe Produkt aus der Masse m des Körpers und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit v .

Kinetische Energie: $E_k = \text{Fehler!}mv^2$
 m : Masse des Körpers
 v : Geschwindigkeit des Körpers
 Meßeinheit. $[E_k] = 1 \text{ J}$
 $1 \text{ J} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2$

Aufgaben:

1. a. Ein Leichtathlet macht einen 100-Meter-Lauf. Er hat eine Masse von 70 kg und rennt mit einer Geschwindigkeit von $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.
 Berechne seine kinetische Energie.
 b. Der Gepard ist ein ausgesprochener Sprinter. Man hat bei einem Gepard ($m = 60 \text{ kg}$) einmal für eine Strecke von 640 m eine Zeit von 20 s gestoppt. Berechne seine kinetische Energie.
2. Berechne die kinetische Energie eines Autos (1,2 t) bei folgenden Geschwindigkeiten:
 - a. 50 **Fehler!** (Höchstgeschwindigkeit in der Stadt),
 - b. 120 **Fehler!** (Geschwindigkeit auf der Autobahn).
3. a. Wie ändert sich bei einem Fahrradfahrer die kinetische Energie, wenn er seine Geschwindigkeit verdoppelt?
 b. Um das wievielfache müsste ein Autofahrer seine Geschwindigkeit erhöhen, wenn er seine kinetische Energie verneunfachen möchte?
4. Furchenwale können so schnell schwimmen, dass sie mit modernen Fahrgastschiffen mithalten können. Ursache dafür ist ihre federnde Haut, die beim Schwimmen die Bildung von Wasserwirbeln und damit große Reibung verhindert. Die kinetische Energie eines Furchenwals der Geschwindigkeit 24,0 **Fehler!** beträgt 2,89 MJ.
 Berechne seine Masse.
5. Ein Flugzeug der Masse 3,4 t fliegt mit konstanter Geschwindigkeit und hat eine kinetische Energie von 5,6 MJ.
 Berechne seine Geschwindigkeit sowohl in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$, als auch in **Fehler!** .

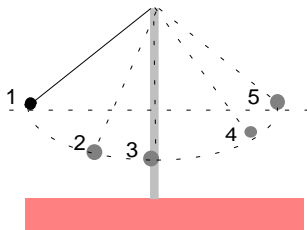


1.3 Energieumwandlungen

Wie die ständige Auf- und Abbewegung des hüpfenden Gummiballs zeigt, können die verschiedenen Energieformen ineinander umgewandelt werden (siehe Abb. 14.1).

In den verschiedenen Positionen 1 bis 6 haben E_h , E_k und E_s unterschiedliche Werte. Die Gesamtenergie des abgeschlossenen Systems "Gummiball mit Erde" bleibt aber erhalten.

	E_h	E_k	E_s
1	am größten	0	0
2	nimmt ab	nimmt zu	0
3	0	am größten	0
4	0	0	am größten
5	nimmt zu	nimmt ab	0
6	am größten	0	0



Als weiteres Beispiel für Energieumwandlung betrachten wir das abgeschlossene System "Fadenpendel mit Erde" (siehe Abb. 14.2).

In den verschiedenen Positionen 1 bis 5 haben E_h und E_k ebenfalls unterschiedliche Werte. Auch hier bleibt die Gesamtenergie erhalten.

	E_h	E_k
1	am größten	0
2	nimmt ab	nimmt zu
3	0	am größten
4	nimmt zu	nimmt ab
5	am größten	0

Wie diese Beispiele zeigen, kann der Energieerhaltungssatz folgendermaßen genauer formuliert werden:

In einem abgeschlossenen mechanischen System können die einzelnen Energiearten ineinander umgewandelt werden. Die Gesamtenergie bleibt dabei erhalten.

Energieerhaltungssatz:

In einem abgeschlossenen mechanischen System gilt

$$E = E_k + E_p \quad \text{ist konstant,}$$

$$\text{bzw. } E = E_k + (E_h + E_s) \quad \text{ist konstant.}$$

Die einzelnen Energiearten können ineinander umgewandelt werden.

Bei der Energieumwandlung sollten wir noch mal an das Beispiel mit den beiden Kindern denken, die sich um die Bausteine (Energie) streiten. Wir dürfen hier nicht aus den Augen lassen, dass jedes Kind (entspricht einer Energieform) zwar eine unterschiedliche Anzahl von Bausteinen (entspricht der Energie) haben kann, dass aber die Gesamtzahl von Bausteinen (entspricht der Gesamtenergie) konstant bleibt.

Das letzte Beispiel ist das abgeschlossene System "zwei Körper auf der Fahrbahn". Bei ihm wird kinetische Energie von einem Körper auf einen anderen übertragen. Dazu fahren zwei Körper unterschiedlicher Massen (m_1 und m_2) und Geschwindigkeiten (v_1 und v_2) aufeinander zu, stoßen gegeneinander und bewegen sich dann wieder voneinander mit den Geschwindigkeiten v_1' und v_2' weg.

Da die Gesamtenergie erhalten bleibt, muss gelten:

$$E_{K,1} + E_{K,2} = E_{K,1}' + E_{K,2}'$$

Experimentelle Überprüfung:

$$m_1 = 100 \text{ g}, m_2 = 150 \text{ g}, v_1 = 0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_2 = 0,14 \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$v_1' = 0,11 \frac{\text{m}}{\text{s}}, v_2' = 0,23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$E_{K,1} + E_{K,2} = \frac{1}{2} \cdot 100 \text{ g} \cdot (0,25 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + \frac{1}{2} \cdot 150 \text{ g} \cdot (0,14 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 4,6 \text{ mJ}$$

$$E_{K,1}' + E_{K,2}' = \frac{1}{2} \cdot 100 \text{ g} \cdot (0,11 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 + \frac{1}{2} \cdot 150 \text{ g} \cdot (0,23 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \approx 4,6 \text{ mJ}$$

Das Experiment bestätigt also unsere Erwartung.

Aufgaben:

1. Ein Kind wirft einen Ball senkrecht nach oben.
 - a. Beschreibe die Energieumwandlungen des Balls, nachdem er die Hand des Kindes verlassen hat, in Form einer Tabelle.
 - b. Welche Höhe erreicht der Ball, wenn das Kind den Ball mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $12,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ hochwirft?
2. Ein Lachs der Masse 24 kg springt eine 2,3 m hohe Stromschnelle hinauf.
 - a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
 - b. Welche Geschwindigkeit hat der Lachs mindestens, wenn er gerade das Wasser verlässt?
 - c. Welche Anfangsgeschwindigkeit hat ein 12 kg schwerer Lachs, der die gleiche Stromschnelle überwinden muß?
3. Ein Kind schießt mit einer Federpistole der Federhärte 5,0 **Fehler!** eine 4 g schwere Erbse senkrecht nach oben.
 - a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
 - b. Wie weit wird die Feder zusammengedrückt, wenn die Erbse 2,4 m hochfliegt?
 - c. Welche Geschwindigkeit hat die Erbse beim Verlassen des Pistolenlaufs?
 - d. Welche Geschwindigkeit hat die Erbse, wenn sie bereits 1,0 m weit nach oben geflogen ist?
4. Ein Tennisball (40 g) trifft mit einer Geschwindigkeit von 110 **Fehler!** waagrecht auf die Bespannung eines Tennisschlägers. In grober Näherung verhält sich die Bespannung wie eine Feder der Federhärte 770 **Fehler!**.
 - a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.

- b. Wie weit wird die Bespannung eingedrückt?
c. Wie hoch würde der Tennisball fliegen, wenn er mit der angegebenen Geschwindigkeit senkrecht nach oben geschossen wird?
5. Die Feder (0,5 g) eines Kugelschreibers wird mit einer Kraft von 0,9 N um 0,5 cm zusammengedrückt.
a. Berechne die Federhärte.
Jetzt wird die Feder so losgelassen, dass sie senkrecht nach oben fliegt.
b. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
c. Berechne die maximale Spannenergie der Feder.
d. Welche maximale kinetische Energie hat die Feder?
e. Wie hoch fliegt die Feder?
6. Ein Skifahrer (80 kg) fährt in einer Schussfahrt reibungsfrei eine 300 m lange Piste herunter. Er überwindet dabei eine Höhendifferenz von 40 m.
a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
b. Berechne die Endgeschwindigkeit des Skifahrers.
7. Ein Kunstspringer (70 kg) springt von einem 5-Meter-Brett in das Schwimmbecken.
a. Welche Geschwindigkeit hat er nach 2 m Flugstrecke?
b. Aus welcher Höhe muß er abspringen, um die Geschwindigkeit $v = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ beim Auftreffen zu haben?
c. Auf das wievielfache müßte er seine Absprunghöhe steigern, um die 4-fache Endgeschwindigkeit zu erreichen?
8. Ein Schimpanse (40 kg) springt 10 m tief von einem Baum zu einem anderen.
a. Berechne die Endgeschwindigkeit des Schimpansen.
b. Berechne die Höhenenergie (bezogen auf den Erdboden) und die Geschwindigkeit, nachdem er vom Baum 4,0 m untergesprungen ist.
9. Mit Hilfe eines Bogens wird ein Pfeil (120 g) aus 1,3 m Höhe senkrecht nach oben geschossen. Er steigt dann 15 m nach oben und fällt anschließend auf den Boden.
a. Beschreibe die Energieumwandlungen in Form einer Tabelle.
b. Berechne die Spannenergie.
c. Wie groß ist die Geschwindigkeit des Pfeils, nachdem er 5,4m nach oben geflogen ist?
d. Wie groß ist die Geschwindigkeit des Pfeils beim Berühren des Bodens?
10. Der Schützenfisch lebt in den Gewässern Südostasiens. Er jagt nach Insekten, indem er seine Schnauze aus dem Wasser streckt und mit einem Wasserstrahl nach ihnen schießt. Um die Brechung der Lichtstrahlen an der Wasseroberfläche möglichst gering zu halten, stellt sich der Schützenfisch möglichst senkrecht unter das Insekt.
a. Wie hoch schießt der Fisch einen 5,0 g schweren Wasserstrahl, der zu Beginn eine Geschwindigkeit von $2,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ hat?
b. Der Fisch hat ein Insekt der Masse 1,5 g getroffen, gerade als das Wassertröpfchen seinen höchsten Punkt erreicht hat. Welche Geschwindigkeit hat das Insekt mitsamt dem Wassertröpfchen beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche?

1.4 Das Perpetuum mobile erster Art

(perpetuus, lat.: unaufhörlich ; mobilis, lat.: beweglich)

Immer wieder wurde der Versuch unternommen, Maschinen zu entwickeln, die mechanische Energie aus dem "Nichts" - d.h. ohne die Beteiligung einer Energieumwandlung - erzeugen sollen. Man hätte also eine unerschöpfliche Energiequelle! Der Energieerhaltungssatz lehrt uns aber, dass es solche Maschinen nicht geben kann. Der Wert einer Energieart kann nur durch Umwandlung in andere Energiearten verändert werden, die Gesamtenergie bleibt dabei erhalten.

In der Originalarbeit befindet sich hier ein Bild von E. Escher. Aufgrund des Urheberrechts wurde das Bild weggelassen.

Abb. 17.1: Eschers Bild zeigt uns eine unmögliche Welt, in der ein Perpetuum Mobile möglich ist.
(M. C. Escher: 1898 –1972, holländischer Graphiker)

2. Die Arbeit W

(W ist die Abkürzung für work, engl.: Arbeit)

Der Energieerhaltungssatz sagt aus, dass verschiedene Energiearten ineinander umgewandelt werden können und dass die Summe der verschiedenen Energiewerte in einem abgeschlossenen System immer gleich bleibt. Er gibt keine Antwort auf die Fragen, wie die Änderung der Energiewerte überhaupt möglich ist und wie nicht abgeschlossene mechanische Systeme zu behandeln sind.

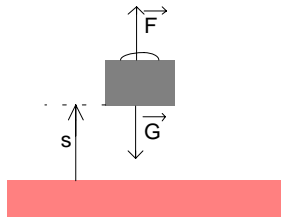


Abb. 18.1: Heben eines Koffers

Um diese Fragen zu beantworten, betrachten wir, was geschieht, wenn man einen Koffer des Gewichts \vec{G} um die Höhe s anhebt (siehe Abb. 18.1). Die Höhenenergie des Koffers nimmt dabei um $E_h = G \cdot s$ zu. Das Anwachsen der Höhenenergie hat seine Ursache im Angreifen der Kraft \vec{F} am Koffer. In unserem alltäglichen Sprachgebrauch sagt man: Beim Hochheben des Koffers wird Arbeit verrichtet. Die physikalische Sprechweise ist da etwas genauer. Man sagt: Die Kraft \vec{F} hat an dem Körper Arbeit verrichtet.

Wird der Koffer mit konstanter Geschwindigkeit gehoben, ändert sich seine kinetische Energie nicht. In diesem Fall sind zwar die Richtungen von \vec{F} und \vec{G} entgegengesetzt, die Beträge aber gleich. Ansonsten würde der Koffer beim Heben noch beschleunigt.

Ergebnis: I. Die Änderung des Energiewertes ΔE eines Körpers kann durch Arbeit zustande kommen. Dabei muß gelten: $\Delta E = W$.

Da sich bei unserem Beispiel der Wert der Höhenenergie um $G \cdot s$ erhöht hat und $G = F$ ist, gilt: $W = F \cdot s$.

Dies gilt gleichermaßen für abgeschlossene und nicht abgeschlossene Systeme.

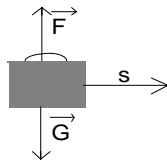


Abb. 18.2: Tragen eines Koffers auf einem waagrechten Weg.

Wenden wir unsere physikalische Vorstellung von der Arbeit gleich auf das folgende Beispiel an:

Trägt man einen Koffer der Gewichtskraft \vec{G} auf einem waagrechten Weg der Länge s (siehe Abb. 18.2), so ändert sich der Wert der Höhenenergie des Koffers nicht. Es wird also von der Kraft \vec{G} keine Arbeit geleistet! Worin liegt dann der Unterschied zwischen dem vorherigen Beispiel und dem jetzigen, dass man so völlig unterschiedliche Ergebnisse erhält?

Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel sind hier Kraft und Weg nicht parallel, sondern senkrecht zueinander.

Ergebnis: II. Arbeit kann nur von der Kraftkomponente geleistet werden, die entlang (d. h. parallel) des Weges angreift.

Schauen wir uns das zweite Beispiel noch etwas genauer an. Es ist doch überraschend, dass man sich beim waagrechten Tragen eines schweren Koffers ganz schön anstrengen muss, dabei aber im physikalischen Sinn keine Arbeit verrichtet. Das kann man erst verstehen, wenn man die Vorgänge in einem angespannten Muskel genauer betrachtet. Wird ein Muskel angespannt, sind nicht immer alle Fibrillen (kleinste Muskeleinheiten) gespannt. Vielmehr spannen und entspannen sich die einzelnen Fibrillen immer wieder. Bei jedem Spannungs-Entspannungs-Vorgang wird chemische Energie in andere Energieformen umgewandelt und nimmt deshalb ab. Wir haben deshalb das Gefühl, dass es ganz schön anstrengend ist, einen schweren Koffer zu tragen und uns wird beim Tragen eines schweren Koffers warm. Wenn wir den Koffer hochheben, wird ein Teil der chemischen Energie in mechanische Energie umgewandelt. Beim waagrechten Tragen des Koffers wird die chemische

Energie nicht in mechanische Energie, sondern vollständig in eine uns noch unbekanntere Energieform umgewandelt.

Bei einem Muskel werden im allgemeinen 15% der chemischen Energie in mechanische Energie umgewandelt. Durch Training kann dieser Prozentsatz auf etwas mehr als 30% gesteigert werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Arbeit mit der Formel $W = F \cdot s$ berechnet werden kann (Ergebnis I.); die Kraft F ist dabei die Kraftkomponente entlang des Weges (Ergebnis II.).

Es gilt:

Arbeit: $W = \text{Kraftkomponente entlang des Weges} \cdot \text{Weg}$
 $W = F \cdot s$
 Maßeinheit: $[W] = 1 \text{ J (Joule)}$

- Anmerkungen:
1. W ist die Abkürzung für das Wort work, engl.: Arbeit.
 2. Der Wert einer Energie E kann in der Mechanik nur durch Verrichten einer Arbeit W geändert werden. Dabei gilt für die Änderung des Energiewertes: $\Delta E = W$.
 3. Bei der Angabe der Arbeit ist immer die zugehörige Kraft zu nennen.
 4. Ein Körper besitzt nur Energie und keine Arbeit! Grund dafür ist, dass die Arbeit keine Energieart, wie zum Beispiel die kinetische oder potentielle Energie ist. Vielmehr gibt die Arbeit nur an, um welchen Wert sich die Energie eines Körpers geändert hat.

Im Folgenden betrachten wir einige Beispiele, bei denen Arbeit verrichtet wird.

1. Das abgeschlossene System "Gummiball mit Erde".

Bei allen Beispielen zur Energie wurde immer von abgeschlossenen Systemen ausgegangen. Wir wollen nun untersuchen, welche Rolle die Arbeit in solch einem abgeschlossenen System spielt. Was geschieht also, wenn ein Gummiball des Gewichts G aus einer Höhe h auf den Boden fällt?

Beschleunigungsarbeit, von der Gravitationskraft verrichtet: $W_a = G \cdot h$

Erhöhung der kinetischen Energie um: $\Delta E_k = W$

$$\Delta E_k = G \cdot h$$

Verringerung der potentiellen Energie um: $\Delta E_p = W$

$$\Delta E_p = G \cdot h$$

Die Arbeit gibt also in diesem Beispiel an, um wieviel sich der Wert der einzelnen Energiearten geändert hat. Die Gesamtenergie bleibt erhalten.

2. Das nicht abgeschlossene System "Körper mit Erde":

Wir betrachten nun zum ersten mal ein nicht abgeschlossenes System. Das heißt Kontakte (zum Beispiel Berühren oder Anstoßen) des Systems "Körper mit Erde" mit der Umgebung werden zugelassen. Was geschieht also, wenn ein Körper der Masse m um die Höhe h gehoben wird?

Hubarbeit, von der Muskelkraft verrichtet: $W_h = G \cdot h = mgh$

Erhöhung der Höhenenergie um: $\Delta E_h = W$

$$\Delta E_h = G \cdot h = mgh$$

Auch hier gibt die Arbeit an, um wieviel sich der Wert der einzelnen Energiearten geändert hat. Die Gesamtenergie des Systems "Körper mit Erde" hat sich dadurch, dass Arbeit an ihm verrichtet wurde, um $W = G \cdot h$ erhöht.

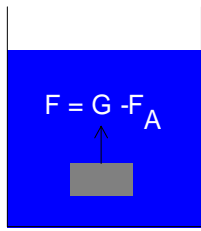


Abb. 20.1: Heben eines Körpers in einer Flüssigkeit

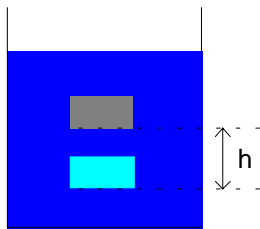


Abb. 20.2: Ein um die Höhe h gehobener Körper. Das hellblaue Flüssigkeitsvolumen wurde dabei um die Höhe h nach unten geschoben.

3. Wagen wir uns nun an ein etwas komplizierteres System. Ein Körper befindet sich in einer Flüssigkeit und wird um die Höhe h gehoben (siehe Abb. 20.1 und 20.2).

Hubarbeit, von der Kraft der Muskeln verrichtet: $W_h = (G_{\text{Körper}} - F_A) \cdot h$
 F_A ist dabei die Auftriebskraft, die an dem Körper angreift.

Bei der Angabe von ΔE_p kann vereinfacht angenommen werden, dass zum einen der Körper mit dem Volumen V gehoben wird (E_p wird größer), zum andern ein gleich großes Flüssigkeitsvolumen um die Höhe h gesenkt wird (E_p wird kleiner). Daraus folgt:

$$\Delta E_p = G_{\text{Körper}} \cdot h - G_{\text{Flüssigkeit}} \cdot h$$

Mit $\Delta E_p = W_h$ ergibt sich: $(G_{\text{Körper}} - F_A) \cdot h = G_{\text{Körper}} \cdot h - G_{\text{Flüssigkeit}} \cdot h$

Durch Umformungen ergibt sich: $F_A = G_{\text{Flüssigkeit}}$

Die letzte Gleichung besagt, dass die Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft der von dem Körper verdrängten Flüssigkeit ist. Das ist gerade das archimedische Prinzip, das wir in der 8. Klasse kennengelernt haben!

Man unterscheidet verschiedene Arten der Arbeit:

Art der Arbeit	Beispiel	Kraft, die angreift	Energieart, deren Wert sich verändert
Hubarbeit W_h	Ein Körper wird mit der Hand hochgehoben.	Kraft der Muskeln	Höhenenergie E_h
Spannarbeit W_s	Dehnen einer Schraubenfeder mit der Hand	Kraft der Muskeln	Spannenergie E_s
Beschleunigungsarbeit W_a (a ist die Abkürzung für acceleration, eng.: Beschleunigung)	Ein Körper beschleunigt beim Herunterfahren von einer schiefen Ebene.	Hangabtriebskraft	Kinetische Energie E_k
Reibungsarbeit W_R	Die Reibung verändert die Geschwindigkeit eines Körpers.	Reibungskraft	Kinetische Energie E_k

Aufgaben:

1. Ein Gewichtheber stemmt eine Hantel (120 kg) 1,8 m hoch.
 - a. Berechne die von dem Gewichtheber verrichtete Hubarbeit.
 - b. Wieviel Höhenenergie hat die Hantel dazugewonnen?
 - c. Berechne die von dem Gewichtheber umgewandelte chemische Energie, wenn 32% der chemischen Energie in mechanische Energie umgewandelt wurden.
- Der Gewichtheber lässt nun die Hantel von oben herunter fallen.
 - d. Welche kinetische Energie und welche Geschwindigkeit hat die Hantel beim Auftreffen auf den Boden?

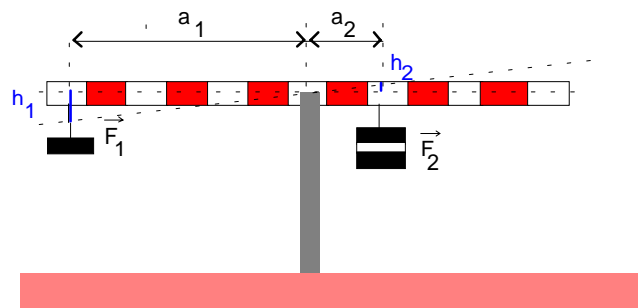
2. Ein Leopard schleppt seine 40 kg schwere Beute 3,2 m hoch auf einen Baum, um sie vor Löwen in Sicherheit zu bringen. Berechne die von dem Leoparden an seiner Beute verrichtete Hubarbeit.
3. Der afrikanische Schmutzgeier schleudert zum Öffnen eines Straußeneis einen 300 g schweren Stein 20 cm hoch. Anschließend fällt der Stein nach einer Höhendifferenz von 30 cm auf das Ei.
 - a. Berechne die Beschleunigungsarbeit, die der Schmutzgeier an dem Stein verrichtet.
 - b. Der Stein schlägt ein Loch in das Ei und dringt 1,0 cm in das Ei ein. Berechne die mittlere Kraft, die bei der Deformation an dem Ei angreift.
4. Ein Tennisball der Masse 40 g fällt von einem 1,2 m hohen Tisch.
 - a. Berechne die von der Gravitationskraft insgesamt verrichtete Beschleunigungsarbeit.
 - b. Beim Auftreffen des Tennisballs auf den Boden gehen 40% der kinetischen Energie durch Reibungsarbeit und Verformungsarbeit in uns noch unbekannte nicht mechanische Energiearten über. Wie weit springt der Tennisball nun nach oben?
5. Ein Auto ($m = 1,2 \text{ t}$) der Geschwindigkeit 100 **Fehler!** wird auf einem Bremsweg von 90 m bis zum Stillstand heruntergebremst.
 - a. Berechne die mittlere Bremskraft.
 - b. Wie lange wäre der Bremsweg gewesen, wenn das Auto bei gleicher Bremskraft halb so schnell gewesen wäre (keine Rechnung)?
6. Ein Bierfass (56 kg) rollt eine 4,5 m lange schiefe Ebene herunter. Die Reibung wird vernachlässigt.
Wie groß ist die Hangabtriebskraft, wenn das Bierfass am Schluss eine Geschwindigkeit von $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ hat?
7. Ein Vater zieht den Schlitten ($m = 10,1 \text{ kg}$) seines Sohnes auf horizontaler Strecke mit konstanter Geschwindigkeit ($\mu_R = 0,400$).
 - a. Mit welcher Kraft muss er den Schlitten ziehen?
 - b. Mit welcher Kraft muss er am Schlitten ziehen, wenn die Auflagefläche des Schlittens doppelt so groß ist?
 - c. Wie weit hat der Vater den Schlitten mit dem darauf sitzenden Sohn ($m_S = 40 \text{ kg}$) gezogen, wenn er eine Arbeit von 96 kJ verrichtet hat?
8. Eine Kugel mit der Masse 100 g prallt waagrecht mit einer Geschwindigkeit von $10,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auf eine Feder ($D = 250 \frac{\text{N}}{\text{m}}$).
 - a. Berechne die Spannarbeit, die beim Zusammendrücken der Feder verrichtet wird.
 - b. Um welche Strecke wurde die Feder zusammengepresst?
9. Im Britischen Museum ist eine Schiffsplanke ausgestellt, in die das Schwert eines Schwertfisches 56 cm tief eingedrungen ist.
Wie schnell war der Schwertfisch (580 kg) vor dem Zusammenstoß, wenn sein Schwert mit einer mittleren Kraft von 323 kN in die Schiffsplanke eindrang?

3. Kraftwandler und Wirkungsgrad

Bereits in der Antike wurden Maschinen erfunden, mit denen man schwere Lasten heben konnte. Man nennt diese Maschinen Kraftwandler. Einige dieser Maschinen, nämlich der Flaschenzug, der Hebel und die Hydraulische Presse wurden bereits in der 8. Klasse untersucht. Im folgenden schauen wir uns einige dieser Kraftwandler unter den Gesichtspunkten Arbeit und Energie genauer an.

a. Der Hebel

Der Hebel befindet sich im Gleichgewicht. Durch eine vernachlässigbar geringe Kraft wird der Hebel auf der linken Seite leicht nach unten gedrückt. Dadurch wird das Massenstück (Gewicht F_1) auf der linken Seite um die Höhe h_1 gesenkt und das Massenstück (Gewicht F_2) auf der rechten Seite um die Höhe h_2 nach oben gehoben.



Betrachten wir die Veränderung der Energiewerte anhand eines Energieflussdiagramms:

Beim Massenstück auf der linken Seite verringert sich die Höhenenergie um $\Delta E_1 = F_1 \cdot h_1$

Der Hebel ist starr, also nimmt er keine Spannenergie auf. Der Hebel wird reibungsfrei bewegt, an ihm wird daher keine Arbeit verrichtet. Im Hebel kann somit keine Energie gespeichert werden.

Beim Massenstück auf der rechten Seite erhöht sich die Höhenenergie um $\Delta E_2 = F_2 \cdot h_2$

Wie das Energieflussdiagramm zeigt, kann der Hebel keine Energie speichern. Somit gilt aufgrund des Energieerhaltungssatzes:

$$\Delta E_1 = \Delta E_2$$

$$\text{bzw. } F_1 \cdot h_1 = F_2 \cdot h_2 \quad (I.)$$

Da h_1 und h_2 parallel zueinander sind, gilt mit dem Strahlensatz:

$$\frac{h_1}{a_1} = \frac{h_2}{a_2} \quad | \cdot a_1$$

$$h_1 = \mathbf{Fehler!}$$

Setzen wir diese Gleichung in die obige Energie-Arbeitsgleichung (I.) ein, ergibt sich:

$$F_1 \cdot \mathbf{Fehler!} = F_2 \cdot h_2 \quad | \cdot \mathbf{Fehler!}$$

$$F_1 \cdot a_1 = F_2 \cdot a_2$$

Diese Gleichung ist genau die Hebelgleichung, die wir im letzten Jahr experimentell hergeleitet haben!

Ist der Kraftarm a_1 kleiner a_2 , so ist die Kraft F_2 , die zum Heben des Massenstücks notwendig ist, kleiner als die Gewichtskraft F_1 des Massenstücks. Daher nennt man diese Maschine "Kraftwandler".

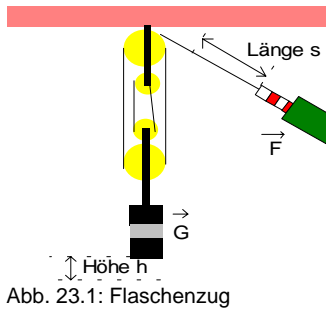


Abb. 23.1: Flaschenzug

b. Der Flaschenzug (siehe Abb. 23.1)

Hebt man ein Massenstück (Gewichtskraft G) mit Hilfe eines Flaschenzugs um die Höhe h , so nimmt seine Höhenenergie um $E_h = G \cdot h$ zu. Die Zugkraft F verrichtet die Zugarbeit $W = F \cdot s$. Bei einem reibungsfrei bewegten Flaschenzug gilt, unter der Annahme, dass die Rollen gewichtslos sind, aufgrund des Energieerhaltungssatzes:

$$E_h = W$$

$$\text{bzw. } G \cdot h = F \cdot s$$

Da bei dem Flaschenzug die gezogene Seillänge größer ist als die Höhe h , ist die Zugkraft F geringer als die Gewichtskraft G des gehobenen Massenstücks. Also ist auch diese mechanische Maschine ein Kraftwandler.

c. Die schiefe Ebene (siehe Abb. 23.2)

Hebt man ein Massenstück (Gewichtskraft G) mit Hilfe einer schiefen Ebene der Länge l um die Höhe h , so nimmt seine Höhenenergie um $E_h = G \cdot h$ zu. Die Zugkraft F verrichtet hierbei die Arbeit $W = F \cdot s$.

Dabei gilt:

$$E_h = W$$

$$\text{bzw. } G \cdot h = F \cdot l$$

Da bei der schiefen Ebene die Länge l , um die gezogen wird, größer ist als die Höhe h , ist die Zugkraft F geringer als die Gewichtskraft G des gehobenen Massenstücks. Also ist auch diese mechanische Maschine ein Kraftwandler.

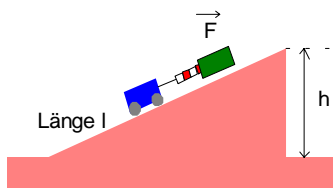


Abb. 23.2: Schiefe Ebene

Wirkungsgrad:

Man muß sich bewusst sein, dass bei allen besprochenen Kraftwandlern immer die Reibung und beim Flaschenzug zusätzlich das Gewicht der Rollen vernachlässigt wurde. Bei realen Experimenten dürfen diese Vereinfachungen sehr oft nicht gemacht werden.

Betrachten wir daher nochmals den Flaschenzug, wobei sowohl die Reibung als auch das Gewicht der Rollen nicht vernachlässigt werden.

Dann steht der genutzten Arbeit

$$W_{\text{nutz}} = W_{h, \text{Massenstück}}$$

eine aufgewendete Arbeit

$$\begin{aligned} W_{\text{aufgewendet}} &= W_{h, \text{Massenstück}} + W_{h, \text{Rollen}} + W_{\text{Reibung}} \\ &= W_{\text{nutz}} + W_{h, \text{Rollen}} + W_{\text{Reibung}} \end{aligned}$$

gegenüber.

Wie man erkennt, gilt stets: $W_{\text{nutz}} \leq W_{\text{aufgewendet}}$

$$\text{bzw. } \frac{W_{\text{nutz}}}{W_{\text{aufgewendet}}} \leq 1.$$

Grund dafür ist der Energieerhaltungssatz. Eine Maschine kann nicht mehr Energie abgeben (genutzte Arbeit) als sie erhalten hat (aufgewendete Arbeit).

Die Güte jedes Kraftwandlers kann man mit Hilfe des Quotienten aus W_{nutz} und $W_{\text{aufgewendet}}$ angeben. Diesen Quotienten nennt man Wirkungsgrad η .

Zur Beurteilung der Güte einer Maschine dient der Wirkungsgrad η .

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{W_{\text{nutzt}}}{W_{\text{aufgewendet}}}$$

$$\eta = \frac{W_n}{W_a}$$

Es gilt stets: $\eta \leq 1$

Dass der Wirkungsgrad höchstens den Wert 1 haben kann, drückt man in der "goldenen Regel der Mechanik" aus:

Bei einer idealen Maschine (ohne Reibung etc.) ist die zum Betreiben der Maschine aufgewendete Arbeit $W_{\text{aufgewendet}}$ gleich der genutzten Nutzarbeit W_{nutzt} .

Aufgaben:

1. Ein Waldarbeiter hebt den Schwerpunkt eines Baumstamms (150 kg) mit Hilfe eines Hebels um 30 cm an.
 - a. Berechne die von ihm verrichtete Hubarbeit.
 - b. Mit welcher Kraft muss der Waldarbeiter den Hebel nach unten drücken, wenn er das Ende des Hebels dabei um 1,2 m nach unten drückt?
 - c. Wie lang ist der Kraftarm Baumstamm-Hebeldrehpunkt, wenn der Kraftarm Waldarbeiter-Hebeldrehpunkt 2,4 m lang ist?
2. Um eine Last mit dem reibungsfreien Flaschenzug aus zwei festen und zwei losen Rollen um 6,0 m hochzuziehen, ist eine Kraft F von 375 N erforderlich.
Welche Arbeit verrichtet die Person am Flaschenzug?
3. Mit Hilfe eines Flaschenzuges mit 5 festen und 5 losen Rollen (die losen Rollen sind untereinander fest verbunden) soll ein Klavier ($G = 2,1 \text{ kN}$) von der Straße aus in den 4. Stock gehoben werden.
 - a. Berechne die Höhe, um die das Klavier gehoben werden kann, wenn die Hubarbeit 28 kJ beträgt. Dabei werden sowohl die Reibung, als auch das Gewicht der Rollen vernachlässigt.
 - b. Berechne die erforderliche Zugkraft unter Vernachlässigung des Gewichts der Rollen sowie der Reibung.
Bei den folgenden Teilaufgaben wird die Gewichtskraft der losen Rollen mit berücksichtigt.
 - c. Die Zugkraft beträgt nun (Gewichtskraft der losen Rolle mit berücksichtigt) 0,40 kN. Berechne die Gewichtskraft einer losen Rolle, wenn die Reibung vernachlässigt werden kann.
 - d. Berechne für die Aufgabe c. den Wirkungsgrad.
4. Ein Auto (1,3 t) fährt mit konstanter Geschwindigkeit einen 120 m langen Weg hinauf und bewältigt dabei eine Höhendifferenz von 20 m. Der Weg kann näherungsweise als schiefe Ebene betrachtet werden.
 - a. Berechne die Rollreibungskraft, wenn das Auto mit einer Normalkraft von ca. 2,1 kN auf den Weg drückt und die Rollreibungszahl 0,010 beträgt.
 - b. Berechne die Arbeit, die der Motor bei einem Wirkungsgrad von 38% beim Hinauffahren verrichtet.

5. Ein Wagen der Gewichtskraft 300 N wird über eine 0,40 km lange schiefe Ebene mit konstanter Geschwindigkeit auf eine Höhe von $h = 20$ m gezogen.
 - a. Berechne die Zugkraft, wenn die Reibung vernachlässigt werden kann.
 - b. Wie groß ist die aufzuwendende Arbeit (in kJ), wenn man nun die auftretende Reibungskraft von 5,0 N mit berücksichtigt?
 - c. Berechne den Wirkungsgrad (in %) der schiefen Ebene.

4. Leistung P

In der Physik versteht man unter dem Begriff Leistung genau das gleiche wie im Alltag. Man sagt, dass jemand eine höhere Leistung erbringt, wenn er die gleiche Arbeit in einer kürzeren Zeit verrichtet, oder wenn er in einer bestimmten Zeit mehr Arbeit verrichtet. Daher hat man in der Physik den Begriff der Leistung folgendermaßen definiert:

Leistung P (engl. power: Vermögen, Macht):

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

W: verrichtete Arbeit

t: dazu benötigte Zeit

Meßeinheit: [P] = 1 W (Watt)

früher: 1 PS (Pferdestärke) = 736 W

- Anmerkung: 1. Die Leistung P ist um so größer, je kürzer die Zeit t für eine bestimmte zu verrichtende Arbeit W ist.
 2. Die Leistung P ist um so größer, je mehr Arbeit W in einer bestimmten Zeit verrichtet wird.

Aufgaben:

1. Ein Gewichtheber hebt im Reißen 110 kg in 1,35 s auf eine Höhe von 2,15 m.
Wie groß ist die Hubleistung?
2. Wieviel Liter Wasser fördert eine Pumpe der Leistung 3,50 kW in zehn Minuten aus einem überschwemmten Keller, wenn der Wasserspiegel im Keller 1,5 m tiefer als der Abfluss der Pumpe liegt?
3. Eine Aufzugkabine mit Leergewicht von 20 kN befördert 6 Personen mit einer durchschnittlichen Masse von 75 kg pro Person mit einer konstanten Geschwindigkeit von $1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ um 34 m nach oben.
 - a. Berechne die Leistung, die der Motor abgibt.
 - b. Der Wirkungsgrad des Motors beträgt 65%.
Berechne die Leistung, die der Motor aufnimmt.
4. Ein Auto hat bei einer Geschwindigkeit von 160 **Fehler!** eine Leistung von 53 kW.
Berechne seine Zugkraft.

III. Wärmelehre

In dem vorhergehenden Kapitel "Mechanische Energie und Arbeit" wurde gezeigt, wie wichtig der Energieerhaltungssatz in der Mechanik ist.

Zur Wiederholung:

In einem abgeschlossenen mechanischen System ist die Gesamtenergie E eine Erhaltungsgröße (d.h. sie ist konstant).

Abgeschlossenes mechanisches System bedeutet, dass die Reibung vernachlässigt wird. In vielen Naturvorgängen ist die Vernachlässigung der Reibung jedoch nicht erlaubt! Was geschieht dann mit der mechanischen Energie, wenn sie durch Reibungsarbeit verringert wird? Gilt der Energieerhaltungssatz der Mechanik hier nicht mehr? Die Beantwortung dieser Frage führt uns zu einer weiteren Energieform, die wir im folgenden näher untersuchen.

1. Die innere Energie

1.1 Definition der inneren Energie und Erweiterung des Energieerhaltungssatzes

Wir befestigen einen Körper der Masse 2 kg an einer Schnur. Indem wir die Schnur durch die Hand nach unten gleiten lassen, bewegt sich der Körper langsam auf den Boden zu (siehe Abb. 26.1).

Das folgende Diagramm zeigt, wie bei diesem Vorgang verschiedene Energieformen ineinander umgewandelt werden.



Abb. 26.1: Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie

Mechanische Energie des 2 kg Körpers:
Der Körper verliert auf dem Weg nach unten seine gesamte mechanische Energie.

Reibungsarbeit:
Wandelt die Energieformen ineinander um.

Innere Energie der Hand und der Schnur:
Die Hand und die Schnur erwärmen sich. Ihre "inneren Energien" werden mit zunehmender Erwärmung größer.

Unter der inneren Energie versteht man diejenige Energie, die übrig bleibt, wenn man von der Gesamtenergie des Systems die äußere, rein mechanische Energie (kinetische oder potentielle) Energie abzieht.

Die Änderung der inneren Energie zeigt sich durch eine Temperaturänderung oder durch eine Volumenänderung (siehe später).

Die Reibung vernichtet also keine Energie, sondern wandelt die mechanische Energie in innere Energie um. Der Energieerhaltungssatz muß somit um diese Energieform erweitert werden.

Energieerhaltungssatz:

In einem abgeschlossenen System ist die Gesamtenergie E eine Erhaltungsgröße (d.h. sie ist konstant).

$$E_{\text{mechanisch}} + E_{\text{innen}} = \text{konstant, bzw.}$$

$$E_k + E_p + E_i = \text{konstant.}$$

Bei der Einführung des Energieerhaltungssatzes der Mechanik wurde die Gesamtenergie mit einer festen Menge von Bauklötzen, um die sich zwei Kinder stritten, verglichen. Wir greifen diesen Vergleich nochmals auf. Nachdem die beiden Kinder den ganzen Tag um die Bauklötze gestritten haben, werfen sie diese, um ihre Eltern zu ärgern, in die mit einem

Schaumbad gefüllte Badewanne. Die Eltern merken aber an dem gestiegenen Wasserspiegel sofort, dass die Bauklötze in die Badewanne geworfen wurden. Es folgt also, dass die Anzahl der Klötze auch hier konstant bleibt, ihre Erscheinungsform hat sich jedoch grundlegend geändert. So geht es uns gerade mit der Energie. Die Gesamtenergie bleibt auch bei Reibungsprozessen erhalten. Die Energie tritt hier nur in einer uns bisher unbekannt Form, der inneren Energie auf.

Um die innere Energie besser verstehen zu können, müssen wir zum einen klären, wie man die Erwärmung eines Körpers messen kann. Zum andern benötigen wir eine Vorstellung davon, was im Inneren eines Körpers bei seiner Erwärmung geschieht.

1.2 Die Temperatur und der nullte Hauptsatz der Wärmelehre

Die Aussage "ein Körper hat sich erwärmt", gibt leider keine Auskunft darüber, wie stark sich dieser Körper erwärmt hat. Um dies angeben zu können, benötigt man die physikalische Größe Temperatur.

1.2.1 Grundlagen der Temperaturmessung

Bevor wir die Temperatureinheit und die Temperaturmessung betrachten, untersuchen wir erst einmal, auf welchen physikalischen Grundlagen die Temperaturmessung beruht.

Aus der alltäglichen Erfahrung weiß man, dass bei Körpern im Kontakt ein Temperaturengleich stattfindet. Dabei nimmt die Temperatur des Körpers mit der höheren Anfangstemperatur so lange ab und die Temperatur des Körpers mit der geringeren Anfangstemperatur so lange zu, bis die Temperaturen beider Körper gleich sind. Diese Endtemperatur liegt dann zwischen der höheren und der geringeren Anfangstemperatur beider Körper. Die Körper sind dann im thermischen Gleichgewicht. Diese Erfahrung fasst man im nullten Hauptsatz der Wärmelehre zusammen.

**Nullter Hauptsatz der Wärmelehre:
Befinden sich Körper untereinander im thermischen Gleichgewicht, haben sie die gleiche Temperatur.**

Dieser Satz ist deshalb so wichtig, weil nur aufgrund seiner Aussage eine Temperaturmessung möglich ist! Bringt man ein Thermometer mit einem Körper in Kontakt, ändern sich durch den Austausch von innerer Energie die Temperaturen beider Körper. Dabei kühlt sich ein Körper ab und einer erwärmt sich. Wenn das Thermometer und der Körper nach einiger Zeit im thermischen Gleichgewicht sind, sind nach dem nullten Hauptsatz ihre Temperaturen gleich. Die Endtemperatur liegt dabei zwischen der höheren und der niedrigeren Anfangstemperatur. Jetzt kann man an dem Thermometer seine eigene Temperatur und somit auch die Temperatur des Körpers ablesen.

Daraus ergibt sich, dass bei Temperaturmessungen auf folgendes zu achten ist:

1. Nach Beginn des thermischen Kontakts Körper-Thermometer muß man einige Zeit warten, bis sich die Temperatur von Körper und Thermometer angeglichen haben.
2. Der Körper, dessen Temperatur man messen möchte, muß sehr viel größer sein, als das Thermometer. Damit ist gewährleistet, dass sich die innere Energie und damit die Temperatur des Körpers beim thermischen Kontakt mit dem Thermometer nur unwesentlich ändert.

Nach der Betrachtung der physikalischen Grundlagen der Temperaturmessung beschäftigen wir uns nun mit der Temperaturmessung und der Temperatureinheit.

1.2.2 Verschiedene Thermometer; Temperatureinheit und Temperaturskala

Unsere Haut ist als Temperaturmesser nur sehr bedingt geeignet. Nimmt man ein Stück Metall und ein Stück Wolle aus dem Kühlschrank, fühlt sich das Metall kälter als die Wolle an, obwohl beide Körper nach dem nullten Hauptsatz die gleiche Temperatur, nämlich die Innentemperatur des Kühlschranks, haben.

Unserer Temperatursinn ist in einen Wärmesinn und einen Kältesinn geteilt. Da die Wärmepunkte tiefer unter der Haut liegen, kann man sie nicht so gut lokalisieren wie die Kältepunkte. Besonders viele Kältepunkte haben die Nase und die Augenlider (13 bis 15 Kältepunkte pro cm^2), besonders wenig Kältepunkte haben die Finger (0 bis 3 Kältepunkte pro cm^2). Das kann man in einem einfachen Experiment zeigen. Dazu nimmt man ein Metallstück, das Zimmertemperatur hat. An ein Augenlid gehalten fühlt es sich kälter an, als wenn man es an einen Finger hält.

Zur Temperaturmessung besser geeignet ist das Volumen verschiedener Stoffe. Denn bei manchen Stoffen gibt es bei Temperaturänderungen sehr starke Volumenänderungen und diese können sehr leicht abgelesen werden.



Abb. 28.1: Fuge einer Brücke



Abb. 28.2: Rollenlagerung einer Brücke

Beispiele:

1. Festkörper: Erwärmt man eine Eisenkugel, so passt sie nicht mehr durch einen zuvor passgenauen kreisrunden Ausschnitt einer Metallplatte. Da Brücken wegen der temperaturabhängigen Ausdehnung im Sommer länger sind als im Winter, haben lange Brücken an ihren Enden Fugen und sind auf Rollen gelagert (siehe Abb. 28.1 und 28.2).
2. Flüssigkeit: Erwärmt man Alkohol in einem Glas, so steigt die Höhe der Flüssigkeit deutlich an.
3. Gas: Erwärmt man die Luft in einem Luftballon, indem man den Luftballon in heißes Wasser taucht, so nimmt das Luftvolumen in dem Luftballon zu und der Luftballon wird größer.

Die Versuche zeigen außerdem, dass Gase, Flüssigkeiten und Festkörper ein unterschiedliches Ausdehnungsverhalten haben.

In der Regel dehnen sich Gase bei Erwärmung stärker aus als Flüssigkeiten. Flüssigkeiten wiederum dehnen sich bei Erwärmung stärker aus als Festkörper.

Betrachten wir nun zwei Arten von Thermometer, die mittels des temperaturabhängigen Volumens Temperaturen anzeigen: Flüssigkeits- und Bimetallthermometer.

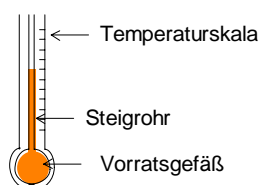


Abb. 28.3: Flüssigkeitsthermometer

Flüssigkeitsthermometer:

Ein Flüssigkeitsthermometer besteht aus einem Vorratsgefäß und einem Steigrohr (siehe Abb. 28.3). Erwärmen wir ein solches Thermometer, so steigt bei zunehmender Erwärmung der Flüssigkeitsspiegel (meist Alkohol oder Quecksilber) in dem Steigrohr an. Da bei den benutzten Flüssigkeiten das Volumen mit zunehmender Erwärmung sehr viel schneller anwächst als die Ausdehnung des Glasgefäßes zunimmt, kann die Ausdehnung des Gefäßes vernachlässigt werden.

Der schwedische Astronom Anders Celsius (1701 -1744) benutzte zur Einführung seiner Temperatureinheit ein Quecksilberthermometer.

Er nahm zwei Fixpunkte des Wassers zu Hilfe, um die uns gebräuchliche Temperaturskala und Temperatureinheit einzuführen.

1. Eispunkt des Wassers: Jede Mischung aus Wasser und Eis hat unabhängig davon, wieviel Wasser bzw. Eis sie besitzt, bei normalem Luftdruck von 1013 mbar, immer die gleiche Temperatur. Celsius wies dieser Temperatur den Wert 0°C zu.
2. Siedepunkt des Wassers: Bringt man Wasser bei normalem Luftdruck von 1013 mbar zum Sieden, so hat das Wasser unabhängig von seiner Masse immer die gleiche Temperatur. Celsius wies dieser Temperatur den Wert 100°C zu.

Nachdem Celsius die beiden Werte an das von ihm benutzte Thermometer angetragen hatte, teilte er den Abstand zwischen den beiden Temperaturmarken in 100 gleich große Teile ein. Den Abstand zwischen zwei so entstandenen benachbarten Markierungen nennt man 1°C (ein Grad Celsius).

Fassen wir zusammen:

Die Celsius - Temperaturskala:
 Die Temperaturskala wird bestimmt durch:
 0°C : Eispunkt des Wassers
 100°C : Siedepunkt des Wassers
 Der hundertste Teil der Temperaturerhöhung zwischen dem Eispunkt und dem Siedepunkt des Wassers führt zur
 Einheit der Temperatur ϑ (theta): $[\vartheta] = 1^{\circ}\text{C}$ (1 Grad Celsius)

Einige markante Temperaturen:

- 219°C : Schmelztemperatur von Sauerstoff
- 0°C : Eispunkt des Wassers
- 37°C : Körpertemperatur eines gesunden Menschen
- 200°C : Motorblock eines Autos im Betrieb
- $1\ 535^{\circ}\text{C}$: Schmelztemperatur von Eisen
- $6\ 000^{\circ}\text{C}$: Oberflächentemperatur der Sonne
- $20\ 000\ 000^{\circ}\text{C}$: Temperatur im Sonneninneren
- $300\ 000\ 000^{\circ}\text{C}$: Bei einer 1993 in Princeton durchgeführten kontrollierten Kernfusion erzeugte Temperatur

Einsatzbereich verschiedener Flüssigkeitsthermometer:

Quecksilberthermometer: -30°C bis 200°C

Galliumthermometer: -30°C bis 2000°C

Äthylalkohol: -100°C bis 70°C

Beispiele für Flüssigkeitsthermometer:

Fieberthermometer

Das Fieberthermometer ist ein Maximumthermometer, d.h. es zeigt die höchste gemessene Temperatur an.

Bei einem Fieberthermometer ist das Vorratsgefäß über ein dünnes Rohr mit dem Steigrohr verbunden. Beim Messen der Körpertemperatur steigt der Quecksilberspiegel in dem Steigrohr an. Wird das Thermometer nach dem Messen der kühleren Umgebungsluft ausgesetzt, zieht sich das Quecksilber wieder zusammen. Dabei reißt der Quecksilberfaden in dem dünnen Rohr ab, somit bleibt das Quecksilberniveau im Steigrohr erhalten. Da sich das Quecksilber in dem Steigrohr beim Kontakt mit der Umgebungsluft nicht wieder in das Vorratsgefäß zurückziehen kann, ist das Ablesen der Körpertemperatur möglich. Durch Schütteln wird das Quecksilber, welches sich im Steigrohr befindet, in das Vorratsgefäß zurückgedrängt.

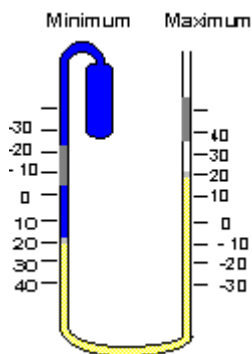


Abb. 30.1: Maximum-Minimum-Thermometer
 Thermometerflüssigkeit: blau
 Quecksilber: gelb
 minimale Temperatur: $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$
 maximale Temperatur: $36\text{ }^{\circ}\text{C}$
 momentane Temperatur: $20\text{ }^{\circ}\text{C}$



Abb. 30.2: Bimetallthermometer beim Erwärmen

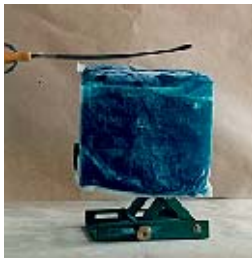


Abb. 30.3: Bimetallthermometer beim Abkühlen

Maximum-Minimum-Thermometer

In dem Thermometer befinden sich zwei Flüssigkeiten (siehe Abb. 30.1) : Alkohol, die eigentliche Thermometerflüssigkeit und Quecksilber. Letzteres hat die Aufgabe, die links und rechts befindlichen Metallstifte zu verschieben. Die Ausdehnung des Quecksilbers wird gegenüber der Ausdehnung des Alkohols vernachlässigt.

Erhöhung der Temperatur: Die Thermometerflüssigkeit schiebt die Quecksilbersäule von links nach rechts.

Verringerung der Temperatur: Die Thermometerflüssigkeit zieht die Quecksilbersäule von rechts nach links.

Trifft die Quecksilbersäule auf einen der beiden Metallstifte, schiebt sie ihn vor sich her. Die Metallstifte zeigen somit die maximale bzw. minimale Temperatur an. Die momentane Temperatur ist sowohl links als auch rechts an dem Quecksilberniveau abzulesen.

Um eine neue Messung der Maximum- und Minimumtemperatur zu ermöglichen, werden die Metallstifte mit Hilfe eines Magneten bis zum Quecksilberniveau nach unten verschoben.

Bimetallthermometer:

Bimetallthermometer bestehen aus zwei zusammengewalzten Blechen mit unterschiedlichem Ausdehnungsverhalten.

Erhöhung der Temperatur: Das Metall, dessen Volumen und damit dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung stärker verändert, ist nun länger als das andere Metall. Daher biegt sich das Blech, und zwar in die Richtung des Metalls, dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung weniger verändert (siehe Abb. 30.2).

Verringerung der Temperatur: Das Metall, dessen Volumen und damit dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung stärker verändert, ist nun kürzer als das andere Metall. Daher biegt sich das Blech, und zwar in die Richtung des Metalls, dessen Länge sich bei einer Temperaturänderung mehr ändert (siehe Abb. 30.3).

1.2.3 Anomalie des Wassers

Im allgemeinen dehnen sich Stoffe bei einer Temperaturerhöhung aus. Eine der wenigen Ausnahmen ist Wasser im Temperaturbereich von 0°C bis $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Erwärmt man 1000 cm^3 Eis der Masse $917,28\text{ g}$, so zeigt das Volumen folgende Temperaturabhängigkeit:

Temperatur in $^{\circ}\text{C}$	Volumen in cm^3	Dichte in Fehler!
0 (Eis)	1000	0,971 728
0 (Wasser)	917,43	0,999 841
1	917,38	0,999 900
2	917,34	0,999 941
3	917,32	0,999 965
4	917,31	0,999 973
5	917,32	0,999 965
6	917,34	0,999 941
7	917,38	0,999 902
8	917,42	0,999 849
9	917,49	0,999 782
10	917,56	0,999 701

Erwärmt man Wasser von 0°C auf 4°C , so nimmt sein Volumen ab. Dieses Phänomen nennt man Anomalie des Wassers.

Weiterhin gilt, dass Eis von 0°C ein um 9 % größeres Volumen als die gleiche Masse Wasser von 0°C hat.

Die Abhängigkeit der Dichte von der Temperatur hat zur Folge, dass ein See immer von oben her zufriert. Hat das Wasser an seiner Oberfläche aufgrund der Abkühlung durch die Umgebungsluft eine Temperatur von 4°C , sinkt es nach unten. Bei zunehmender Abkühlung des Sees befindet sich das Wasser mit 4°C (der größten Dichte) am Boden, Wasser mit 0°C (einer kleineren Dichte) an der Oberfläche des Sees. Dieses Oberflächenwasser kann bei einer weitererem Abkühlung zu Eis werden.

Die Tatsache der Temperaturschichtung lässt sich sehr leicht in einem Schulversuch zeigen. Gibt man Eis in ein Glas Wasser, stellt sich sehr schnell eine Temperaturschichtung ein. An der Wasseroberfläche hat das Wasser 0°C , die Temperatur des Wassers erreicht mit 4°C am Boden des Glases seinen höchsten Wert.

1.3 Mikroskopische Betrachtung

Um ein tieferes Verständnis der inneren Energie eines Körpers zu erhalten, muß man die Atome bzw. Moleküle betrachten, aus denen der Körper aufgebaut ist. Der folgende Versuch gibt uns modellhaft einen Einblick, wie sich die Atome bzw. Moleküle eines Körpers verhalten.

Betrachtet man eine Milch-Wasser-Emulsion unter dem Mikroskop, so ist zu sehen, dass die Fetttropfchen der Milch eine unregelmäßige, ständige d.h. mit der Zeit nicht nachlassende Zitterbewegung ausführen. Diese Bewegung heißt zu Ehren des Biologen Brown, der sie erstmals beschrieben hat, Brownsche Molekularbewegung. Heute kennt man den Grund für diese Zitterbewegung: Stoßen mehrere Wassermoleküle unregelmäßig, aber fast gleichzeitig von einer Seite gegen die Fetttropfchen, so bewirken diese Stöße eine Richtungsänderung der Fetttropfchen. Die Bewegung der Fetttropfchen ist ein Spiegelbild der unregelmäßigen, ständigen Bewegung der Wassermoleküle.

Dies zeigt auch folgender Modellversuch: In einem Glasgefäß befinden sich kleine Plexiglas-Kugeln, die den Wassermolekülen entsprechen, und eine größere Styroporkugel, die einem Fetttropfchen entspricht (siehe Abb. 31.1). Werden die Plexiglas-Kugeln mit Hilfe eines Motors in Bewegung versetzt, stoßen sie immer wieder an die Styroporkugel und lassen diese die Zitterbewegung (Brownsche Molekularbewegung) ausführen.

Versuchen wir nun die Brownsche Molekularbewegung der Wassermoleküle zu verstehen.

Unregelmäßigkeit der Bewegung: Im Wasser befinden sich unzählige Wassermoleküle dicht beieinander. Diese Wassermoleküle stoßen immer wieder aneinander und können dadurch ihre Richtung ändern (siehe Abb. 31.2). Das führt zur Unregelmäßigkeit der Zitterbewegung.

Beständigkeit der Bewegung: Da sich die Wassermoleküle bewegen, müssen sie kinetische Energie besitzen. Die kinetische Energie dieser Wassermoleküle ist jedoch nur ein Teil der inneren Energie der



Abb. 31.1: Modellversuch zur Molekularbewegung

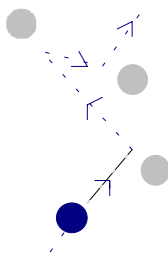
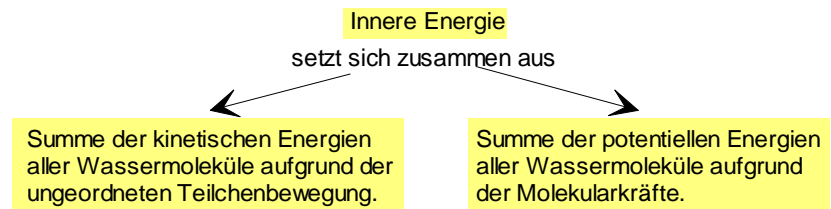


Abb. 31.2: Stoß eines Wassermoleküls (blau) mit anderen Molekülen.

Milch-Wasser-Emulsion. Um den anderen Teil der inneren Energie zu finden, müssen wir uns daran erinnern, dass es in der Mechanik neben der kinetischen Energie noch die potentielle Energie gibt. In einem Körper ist die potentielle Energie die Energie, die die Atome bzw. Moleküle aufgrund ihrer Molekularkräfte besitzen. Das folgende Schaubild zeigt zusammenfassend, aus welchen Teilen sich die innere Energie eines Körpers zusammensetzt.



Von dem einführenden Experiment der Wärmelehre wissen wir, dass eine Temperaturerhöhung eine Erhöhung der inneren Energie nach sich zieht. Nimmt die innere Energie zu, nimmt auch die kinetische Energie aller Atome bzw. Moleküle zu und somit auch die ungeordnete Bewegung dieser Atome bzw. Moleküle.

Fassen wir das Wesentlichsten über die Brownschen Molekularbewegung zusammen:

1. Atome und Moleküle von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern führen eine ständige, unregelmäßige Zitterbewegung aus. Man nennt diese Bewegung "Brownsche Molekularbewegung" oder "thermische Bewegung".
2. Je höher die Temperatur ist, desto größer ist die kinetische Energie aller Atome und Moleküle und damit auch die Geschwindigkeit der ungeordneten Bewegung der Atome und Moleküle eines Stoffes.

Was geschieht nun, wenn man die Temperatur eines Festkörpers immer mehr verringert?

Dann nimmt die innere Energie und somit auch die mittlere kinetische Energie der Atome bzw. Moleküle immer mehr ab. Der Temperaturpunkt, bei dem man die kinetische Energie der Atome bzw. Moleküle nicht mehr verringern kann, ist bei $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eine Temperatur, die unterhalb dieses Temperaturpunktes liegt, kann es nicht geben.

Es liegt nahe, eine neue Temperaturskala einzuführen, die der tiefsten theoretisch erreichbaren Temperatur den Wert 0 zuweist.

Die Klevin-Temperaturskala:

Die Temperaturskala wird bestimmt durch:

0 K: Absoluter Nullpunkt

273,15 K: Eispunkt des Wassers

Meßeinheit: $[T] = 1\text{ K}$

Ändert sich die Temperatur eines Körpers um 1 K, so ändert sie sich auch um $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Zusammenhang der Kelvin- und der Celsiuskala:

$$\frac{T}{K} = \frac{\vartheta}{^{\circ}C} + 273,15$$

Anmerkung: Auch am absoluten Temperatur-Nullpunkt hat jeder Körper noch etwas kinetische Energie. Diese kinetische Energie kann den Körpern jedoch nicht mehr entzogen werden.

Mit Hilfe der Brownschen Bewegung kann man auch den Zusammenhang zwischen der Reibung und der Erhöhung der inneren Energie verstehen. Betrachten wir dazu nochmals das einführende Experiment der Wärmelehre. Ein Körper der Masse 2 kg war an einer Schnur befestigt. Indem wir die Schnur durch die Hand gleiten ließen, bewegte sich der Körper langsam auf den Boden. Mikroskopisch betrachtet kommt die Reibung zwischen der Hand und dem Seil durch Verzahnungen der beiden Oberflächen zustande. Bewegt sich das Seil mit dem Körper nach unten, reißt es aufgrund der Verzahnungen immer wieder an Molekülen der Haut und erhöht daher die Bewegung der Teilchen. Durch Stöße der Teilchen untereinander erhöht sich auch die Bewegung der Teilchen in Inneren der Hand. Dadurch erhöht sich die innere Energie der Hand und somit auch ihre Temperatur.

Aufgaben:

1. Rechne folgende Temperaturen in K um:
 - a. 21° C: angenehme Zimmertemperatur
 - b. 180° C: durchschnittliche Temperatur beim Kuchenbacken
 - c. 57,8° C: Höchste gemessene Lufttemperatur in Al Aziziyah, Libyen (21.07.1922)
 - d. 1535° C: Schmelztemperatur von Eisen
2. Rechne folgende Temperaturen in °C um:
 - a. 90 K: Siedetemperatur von Sauerstoff
 - b. 183,95 K: Niedrigste Lufttemperatur gemessen in der antarktischen Station Wostok (21.07.1983)
 - c. 297 K: Temperatur des Mittelmeers im Sommer
 - d. 1336 K: Siedetemperatur von Gold

1.4 Spezifische Wärmekapazität

Die bisherigen Überlegungen haben gezeigt, dass mit der Temperaturänderung eines Körpers auch eine Änderung seiner inneren Energie einher geht. Wir werden im folgenden eine Formel herleiten, mit der man die Änderung der inneren Energie bei gegebener Temperaturänderung berechnen kann.

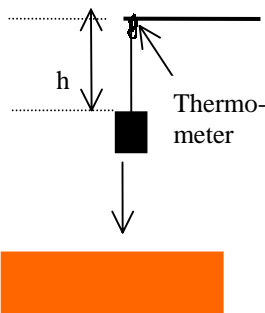
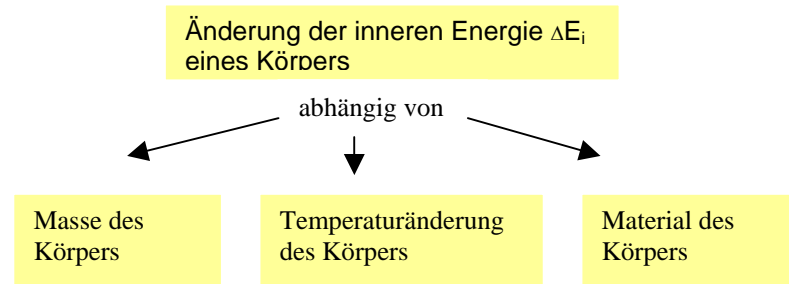


Abb. 34.1: Umwandlung von Höhenenergie in innere Energie

ΔE_i in Abhängigkeit von der Temperaturänderung des Thermometers:

Um den Zusammenhang zwischen der Änderung der inneren Energie und der Temperaturänderung herzuleiten, machen wir folgenden Versuch:

Wir binden ein Massenstück (1 kg) an eine Schnur und wickeln ein Teil dieser Schnur um ein Thermometer (Thermoelement) der Masse m . Damit die Reibung groß genug ist, wird die Schnur mit samt dem Thermometer zwischen zwei Styroporteile eingeklemmt. Das Massenstück lässt man nun langsam nach unten gleiten. Gemessen wird der Weg h , den das Massenstück zurückgelegt hat und die am Thermometer angezeigte Temperaturerhöhung. Unter der Annahme, dass die gesamte Höhenenergie des Massenstücks in innere Energie des Thermometers übergeht, gilt für die Änderung der inneren Energie $\Delta E_i = E_h$.

h in cm	0	5	10	15	20
ΔE_i in J	0	0,49	0,98	1,47	1,96
$\Delta \vartheta$ in °C	0	0,6	1,2	1,8	2,3

Es folgt: I. $\Delta E_i \sim \Delta \vartheta$

ΔE_i in Abhängigkeit von der Masse m des Thermometers:

Bei n gleichen Anordnungen (gleiche Massen der durch Reibung erwärmten Thermometer, gleiche $\Delta E_{i(k)}$) wird bei jeder der n Anordnungen die innere Energie der Thermometer um $\Delta E_i^{(k)}$ ($k = 1, 2, 3 \dots n$) geändert, insgesamt also um $\Delta E_i = n \cdot \Delta E_i^{(k)}$. Bei den n Thermometern mit Gesamtmasse $n \cdot m$ wurde die innere Energie also insgesamt um $n \cdot \Delta E_i^{(k)}$ geändert. Daraus folgt II. $\Delta E_i \sim m$.

Aufgrund der Abhängigkeit der Änderung der inneren Energie von der Masse und der Temperatur des Körpers ergibt sich aus den Formeln I und II:

$$\Delta E_i \sim m \Delta \vartheta$$

Wir setzen nun eine Proportionalitätskonstante c ein, die von der Beschaffenheit des jeweiligen Materials abhängt.

Tab. 35.1: Beispiele für verschiedene Wärmekapazitäten:

Stoff:	c in $\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$
Festkörper:	
Beton:	0,84
Eis (0° C)	2,1
Eisen:	0,45
Granit:	0,75
Gold:	0,13
Holz:	2,5
Sand (trocken):	0,84
Flüssigkeiten:	
Olivenöl:	1,97
Wasser:	4,2
Gas:	
Luft (bei 1bar):	1,0

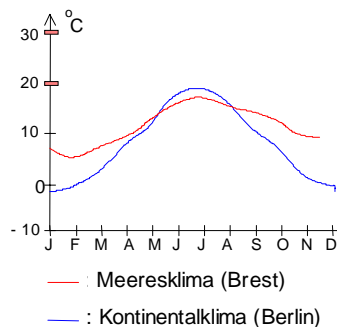


Abb. 35.1: mittlere jährliche Temperaturen

Änderung der inneren Energie: $\Delta E_i = cm\Delta\vartheta$
 c: spezifische Wärmekapazität in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$
 m: Masse des Körpers
 $\Delta\vartheta$: Temperaturänderung des Körpers
 $[\Delta E_i] = 1 \text{ J (Joule)}$

Anmerkung: Mit Hilfe der obigen Formel lassen sich nur Änderungen der inneren Energie berechnen.

Die Formel sollte aber nicht zu der Annahme verleiten, dass bei einem Körper, dessen Temperatur sich nicht ändert ($\Delta\vartheta = 0$), die innere Energie den Wert 0J hat. Vielmehr ist richtig, dass jeder Körper eine von der Temperatur abhängige innere Energie besitzt. Diese setzt sich aus der Summe der kinetischen und potentiellen Energien der Atome bzw. Moleküle des Körpers zusammen.

Die unterschiedlichen Werte der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und Gestein sind für die Unterschiede des Meeresklimas und des Kontinentalklimas verantwortlich.

Untersuchen wir dazu, wie stark sich die Temperaturen von 1 kg Wasser und 1kg Granit bei einer Energiezufuhr von $\Delta E_i = 4,2 \text{ kJ}$ erhöhen. Diese Energie gibt die Sonne im Sommer an einen Stein, bei dem 60 cm^2 der Oberfläche beschienen werden, in zirka 50 Minuten ab.

$$\Delta\vartheta_{\text{Wasser}} = \text{Fehler!} = 1^\circ\text{C}$$

$$\Delta\vartheta_{\text{Granit}} = \text{Fehler!} = 5,6^\circ\text{C}$$

Wie wir an diesem Rechenbeispiel sehen, weist das Kontinentalklima bei gleichem Breitengrad und damit gleicher Energiezufuhr durch die Sonne, im Laufe des Jahres stärkere Temperaturschwankungen auf als das Meeresklima. Die Abb. 35.1 zeigt einen Vergleich der mittleren Temperaturen von Brest und Berlin, die annähernd auf dem gleichen Breitengrad liegen.

Aufgaben:

- 18 °C warmes Wasser (1,0 kg) wurde auf 22 °C erwärmt.
Berechne die Änderung der inneren Energie.
- 18 °C warme Wolle (1 kg, $c = 1,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$) wurde auf 22 °C erwärmt.
Berechne die Änderung der inneren Energie.
- Bei einem 2,00 kg schweren Ziegelstein hat sich durch Abkühlen um 6,50 K die innere Energie um 10,92 kJ verringert.
Berechne die spezifische Wärmekapazität des Ziegelsteins.
- Eine 1,0 kg schwere Bleikugel ($c = 0,129 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$) fällt aus einer Höhe von 1,2 m auf den Boden. 30 % der Höhenenergie werden in innere Energie der Kugel umgewandelt.
Berechne die Temperaturerhöhung der Kugel.
- Das Wasser (200 kg) einer Badewanne wird von 15 °C auf 38 °C erwärmt.
Welche Geschwindigkeit hätte das Wasser, wenn man die zugeführte Energie zum Beschleunigen des Wassers hergenommen hätte?

2. Änderung der inneren Energie

In diesem Kapitel untersuchen wir, wie man die innere Energie eines Körpers verändern kann.

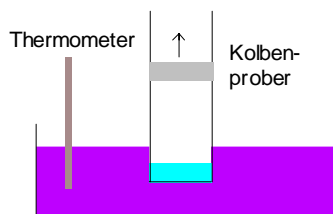
2.1 Änderung der inneren Energie durch Verrichten von Arbeit

In allen bisherigen Versuchen wurde der Wert der inneren Energie immer nur durch Arbeit verändert. Betrachten wir dazu nochmals einige Beispiele:

1. Fährt man mit einem Finger mehrmals über die Tischoberfläche, so wird der Finger wärmer.

Reibungsarbeit wird verrichtet

Innere Energie der Hand nimmt zu



Gefäß mit warmem Wasser
Abb. 36.1: Verringern der inneren Energie um Arbeit zu verrichten

2. Wir stellen einen Kolbenprober, in dem sich etwas Wasser befindet, in ein Gefäß mit heißem Wasser (siehe Abb. 36.1). Die Temperatur des heißen Wassers wird kontinuierlich mit einem Thermometer gemessen. Wir beobachten, dass mit der Temperaturabnahme des heißen Wassers ein Anstieg des Kolbens vom Kolbenprober einher geht. Daraus folgt, dass das warme Wasser einen Teil seiner inneren Energie an den Kolbenprober abgibt. Dort wird die dazugewonnene innere Energie zum Teil in mechanische Arbeit umgewandelt, der Kolben steigt hoch.

Innere Energie des warmen Wassers nimmt ab.

Hubarbeit am Kolben

Wie die Beispiele zeigen, kann durch das Verrichten von Arbeit die innere Energie sowohl erhöht als auch verringert werden.

2.2 Änderung der inneren Energie durch Wärmeaustausch

Aus der alltäglichen Erfahrung weiß man, dass sich die Temperatur und damit auch die innere Energie eines Körpers nicht nur durch Arbeit verändern kann. Eine Temperaturänderung ist auch möglich, indem zwei Körper durch thermischen Kontakt innere Energie untereinander austauschen. Die dabei ausgetauschte innere Energie nennt man Wärme Q .

Für Körper gibt es drei Möglichkeiten, Wärme untereinander auszutauschen:

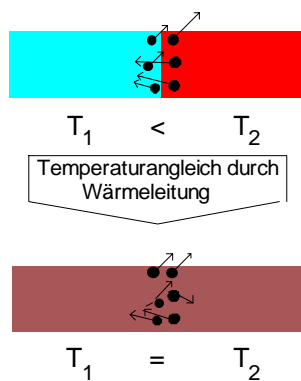


Abb. 36.2: Wärmeleitung

1. Wärmeaustausch durch Wärmeleitung:

- a. Bringt man zwei Körper unterschiedlicher Temperatur in direkten Kontakt, so stoßen an ihren Berührungsflächen die Atome bzw. Moleküle aneinander. Die dabei übertragene innere Energie wird auch innerhalb der jeweiligen Körper durch Stöße der Atome bzw. Moleküle weitergegeben und somit im Laufe der Zeit auf den gesamten Körper verteilt. Bei den Stößen wird so lange Energie ausgetauscht, bis die Körper die gleiche Temperatur besitzen (siehe Abb. 36.2).

Es folgt: Wärmeleitung kommt durch gegenseitiges Anstoßen von Atomen bzw. Molekülen zustande.

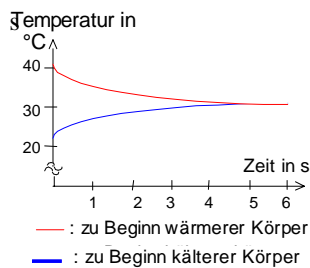


Abb. 37.1: Temperaturverlauf bei der Wärmeübertragung

b. Auf einen Metallstab werden in gleichmäßigen Abständen kleine Wachstropfen aufgebracht und dieser an einem Ende in die Flamme eines Bunsenbrenners gehalten. Sie schmelzen nacheinander ab. Es folgt: Die Ausbreitung der Temperaturänderung mittels Wärmeleitung benötigt eine gewisse Zeit.

c. Zwei mit Farbe überzogene Bleiplatten unterschiedlicher Temperatur werden aufeinandergelegt. Anschließend mißt man einige Minuten lang ihre Temperaturen (Temperaturverlauf siehe Abb. 37.1). Die Temperatur des Körpers mit der höheren Anfangstemperatur nimmt immer mehr ab, die des Körpers mit der geringeren Anfangstemperatur immer mehr zu. Nach geraumer Zeit haben sich ihre Temperaturen angeglichen.

Es folgt: Es wird so lange Wärme vom dem Körper höherer Temperatur auf den Körper geringerer Temperatur übertragen, bis beide Körper die gleiche Temperatur besitzen. Dann kommt der Wärmeübergang zum Stillstand.

d. Auf einem Metallstück und einem Wattestück befindet sich jeweils ein Stück Wachs. Beides wird auf eine Heizplatte gelegt. Während das Wachs auf dem Metallstück kurz nach dem Anschalten der Heizplatte schmilzt, verändert sich das Wachs auf der Wolle überhaupt nicht. Es folgt: Die Wärmeleitung ist vom Material abhängig. Es gibt gute und schlechte Wärmeleiter.

Gute Wärmeleiter: Metall

Schlechte Wärmeleiter: Watte, Holz, Eis, Beton, Glas, Wasser, Schamott (wird beim Bau von Kaminen verwendet), Luft (extrem schlecht)

Denken wir in diesem Zusammenhang noch einmal an das Experiment "Watte und Metallstück aus dem Kühlschrank". Obwohl die beiden Körper die gleiche Temperatur besaßen, fühlte sich die Watte wärmer an als das Metall. Das liegt daran, dass die Watte wesentlich schlechtere Wärmeleiteigenschaften besitzt als das Metallstück. Beim Kontakt der Hand mit der Watte nahm die Temperatur der Watte aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit nur auf der Wattoberfläche schnell zu. Im Inneren war die Watte immer noch kalt. Eine Verringerung der Handtemperatur fand daher kaum statt. Somit fühlte sich die Watte warm an. Das Metallstück leitete die von der Hand abgegebene Wärme jedoch schnell in sein Inneres weiter. Die Oberflächentemperatur des Metalls erhöhte sich daher nicht so stark wie bei der Watte. Das führte wiederum dazu, dass die Handtemperatur stärker verringert wurde als bei dem Kontakt mit der Watte. Daher fühlte sich das Metall kalt an.

e. Den Unterschied zwischen guten und schlechten Wärmeleitern machen sich viele Tiere zunutze. So haben Gattwale eine Fettschicht, die durchschnittlich 50 cm dick ist. Bei Bauwalen ist die Fettschicht zwischen 4 cm und 8 cm dick. Sie schützen sich so gegen die geringen Wassertemperaturen. Betrachten wir das unterschiedliche Wärmeleitverhalten von mageren Fleisch und reinem Fett. Wir legen dazu gleich dicke Scheiben Fleisch und Fett auf einen Eisblock und messen die Oberflächentemperaturen der beiden Scheiben. Die Oberflächentemperatur des mageren Fleisches nimmt sehr viel schneller ab als die Oberflächentemperatur des Fettes. Also ist mageres Fleisch ein besserer Wärmeleiter als Fett.

2. Wärmeaustausch durch Konvektion:

Betrachten wir dazu einige Beispiele:

- a. Wir stellen ein Glas Wasser, in dem sich ein Körnchen Kaliumpermanganat befindet, auf eine Heizplatte. Das Kaliumpermanganat färbt kontinuierlich das Wasser in seiner Umgebung lila. Dadurch ist es möglich zu untersuchen, welche Strömungen im Wasser auftreten. Schalten wir die Heizplatte ein, so tritt die Temperaturerhöhung zuerst beim Wasser am Boden auf. Da das erwärmte Wasser eine geringere Dichte als das kältere Wasser der Umgebung hat, steigt das erwärmte Wasser nach oben. Wir können das Aufsteigen des Wassers anhand der vom Kaliumpermanganat ausgehenden, langsam nach oben ziehenden, lila Schlieren sehen. Zum Ausgleich strömt kälteres Wasser, das eine höhere Dichte hat, von oben her nach unten. Der Transport von Wärme ist hier mit einem Massentransport verbunden. Man nennt dieses Phänomen Konvektion. Es folgt: Da für die Konvektion immer ein Massentransport nötig ist, ist die Konvektion nur in Flüssigkeiten und Gasen möglich.

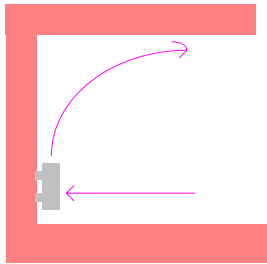


Abb. 38.1: Konvektion durch einen Heizkörper

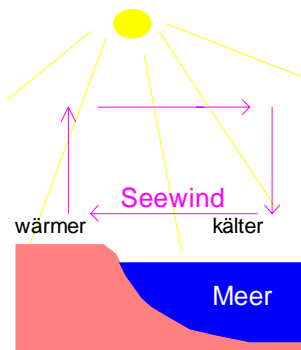


Abb. 38.2: Land-See-Wind-System durch Konvektion



Abb. 38.3: Nachweis der Wärmestrahlung im Vakuum

- b. Ist ein Heizkörper in einem Raum in Betrieb (siehe Abb. 38.1), so wird die Luft in der Umgebung des Heizkörpers erwärmt. Die Dichte der erwärmten Luft ist geringer als die der Umgebung und daher steigt die erwärmte Luft nach oben. Dort verdrängt sie kühler Luft, die aufgrund ihrer größeren Dichte nach unten hin abfällt und dann vom Heizkörper erwärmt wird. Die Luft zirkuliert somit im Raum.
- c. Beim sogenannten Land-See-Wind-System (siehe Abb.38.2) wird aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazitäten von Erde und Wasser das Land tagsüber stärker erwärmt als das Wasser. Wenn keine Großwetterlagen stören, bildet sich wegen der einsetzenden Konvektion der Luft vom Wasser aufs Land hin ein Seewind aus.

3. Wärmeaustausch durch Wärmestrahlung:

Betrachten wir dazu einige Beispiele:

- a. Wir legen ein heißes Metallstück, an das ein Thermometer angebracht wurde, auf ein Stück Styropor (schlechter Wärmeleiter). Die Versuchsanordnung wird von einem Glasgefäß umgeben. Nachdem wir die Luft aus dem Glasgefäß gepumpt haben, befindet sich das Metallstück im Vakuum (siehe Abb. 38.3). Trotz fehlender Konvektion und Wärmeleitung nimmt die Temperatur des Metallstücks ab!

Es folgt: Das Metallstück gibt Energie ab, ohne dass zur Wärmeübertragung irgendeine Materie benötigt wird. Das Metallstück strahlt Energie ab, da seine Temperatur größer ist als die der Umgebung. Diese Art der Wärmeübertragung nennt man Wärmestrahlung.

- b. Die Erwärmung der Erde durch die Sonne erfolgt ausschließlich durch die Wärmestrahlung. Nashörner schützen sich vor der Wärmestrahlung dadurch, dass sie sich im Schlamm oder Staub suhlen und auf diese Weise eine Schutzschicht auf ihre Haut aufbringen. Beim Menschen findet ein Teil des Wärmeaustausches durch Wärmestrahlung statt. Steckt man eine Hand in eine Blechdose, stellt sich aufgrund der von der Hand abgegebenen Wärmestrahlung sehr schnell ein Wärmegefühl ein.

Für alle drei Arten der Wärmeübertragung (Wärmeleitung, Konvektion und Wärmestrahlung) gilt:

1. Es findet so lange ein Wärmeübergang von einem Körper höherer Temperatur zu einem Körper geringerer Temperatur statt, bis beide Körper die gleiche Temperatur besitzen.
2. Der Wärmeaustausch pro Zeiteinheit ist bei größerer Temperaturdifferenz größer als bei geringerer Temperaturdifferenz (siehe Abb. 37.1).
3. Der Wärmeaustausch eines Körpers ist um so geringer, je kleiner seine Oberfläche ist. Daher rollen sich die Tiere beim Winterschlaf auch zusammen.

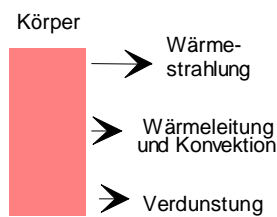


Abb. 39.1: Relative Menge der Wärmeabgabe beim Menschen; Luft 20°C, Himmel bedeckt

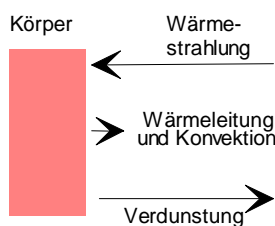


Abb. 39.2: Relative Menge der Wärmeabgabe beim Menschen; Luft 30°C, sonnig

Der Mensch wandelt bei biochemischen Prozessen ein Teil der chemische Energie in innere Energie um. Würde man einen Menschen so einpacken, dass er keine Wärme mehr abgeben kann, nähme seine Temperatur in der Stunde um etwa 1° C zu. Nach fünf Stunden hätte sich seine Körpertemperatur lebensbedrohlich erhöht. Daran sieht man, wie wichtig die Abgabe von Wärme für die Regulation der Körpertemperatur ist. Zur Wärmeabgabe werden in der Nähe der Haut die Durchmesser der Arterien und der Venen vergrößert. Dies führt zu einem verstärkten Transport von warmem Blut aus dem Körperinneren an die Körperoberfläche. Man erkennt dies an der zunehmenden Rötung der Backen oder der Ohrläppchen. Da durch diesen Trick die Hauttemperatur und damit die Temperaturdifferenz Haut-Umgebung angestiegen ist, kann der Körper in der gleichen Zeit mehr Wärme abgeben.

Der menschliche Körper gibt Wärme ab in Form von Wärmestrahlung, Wärmeleitung, Konvektion und Verdunstung (siehe Abb. 39.1 und 39.2). Die Wärmestrahlung der Haut kann man sehr leicht beobachten. Hält man eine Handfläche ganz nah an eine Backe, stellt sich schon nach kurzer Zeit ein Wärmegefühl ein.

2. 3 Der erste Hauptsatz der Wärmelehre

Wie wir in den beiden vorhergehenden Kapiteln gesehen haben, kann die Änderung der inneren Energie eines Körpers sowohl durch Arbeit, als auch durch Wärme erfolgen. Dieses Ergebnis wird in folgendem Satz zusammengefasst.

Erster Hauptsatz der Wärmelehre:
Die innere Energie ΔE_i eines Körpers kann durch Arbeit W und Wärme Q verändert werden.

$$\Delta E_i = W + Q$$

Ein diesem Zusammenhang ist noch folgendes wichtig:

Ein Körper hat Energie; er hat weder Arbeit noch Wärme.
Unter Arbeit und Wärme versteht man die übertragene Energiemenge.

2.4 Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre

Bei allen Versuchen zur Wärmeübertragung ging die Wärme immer von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper geringerer Temperatur über. Es ist nie beobachtet worden, dass Wärme von selbst von einem Körper niedrigerer Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur überging. Wenn dies möglich wäre, könnte zum Beispiel ein Glas Wasser so lange Wärme an die wärmere Umgebung abgeben, bis das Wasser zu Eis wird. Ein solcher Vorgang wurde aber noch nie beobachtet. Diese Tatsache faßt man im folgenden Satz zusammen:

Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre:
Wärme kann von selbst nur von einem Körper höherer Temperatur auf einen Körper geringerer Temperatur übergehen.

- Anmerkung: 1. Nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre kann immer so lange ein Wärmeübergang zwischen zwei Körpern stattfinden, bis sich ihre Temperaturen angeglichen haben.
2. Im Alltag gibt es durchaus Beispiele, wo diese Gesetzmäßigkeit bei oberflächlicher Betrachtung nicht zu stimmen scheint. Das beste Beispiel für solch einen Prozeß ist der Kühlschrank. Hier wird dem Inneren eines Kühlschranks mit Hilfe eines Kühlaggregats Wärme entzogen und der Umgebungsluft zugeführt. Dabei ist die Temperatur im Kühlschrank geringer als die der Umgebungsluft. Der entscheidende Unterschied ist hier aber, dass die Wärme nicht von selbst von einem Körper auf den anderen Körper übergeht. Eine Maschine, in diesem Fall ein Kühlaggregat, leistet im Kühlschrank Arbeit, damit Wärme von einem Körper niedrigerer Temperatur (Luft im Kühlschrank) auf einen Körper höherer Temperatur (Luft der Umgebung) übertragen werden kann.

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre betrifft Vorgänge, die von selbst nur in eine Richtung verlaufen. Solche Vorgänge nennt man irreversibel (nicht umkehrbar). Ein Beispiel dafür ist das Mischen zweier unterschiedlicher Flüssigkeiten gleicher Temperatur in einem Becher. Diese beide Flüssigkeiten werden sich von selbst nicht mehr entmischen.

Betrachtet man mechanische Vorgänge, wie zum Beispiel die Hin- und Herbewegung eines Pendels, so wiederholt sich dieser Bewegungsablauf, wenn keine Reibung vorhanden ist, immer wieder. Vorgänge, die von selbst auch in der umgekehrten Richtung laufen können, nennt man reversibel (umkehrbar).

Fast alle Systeme, die wir in der Mechanik betrachten, sind mit Reibung behaftet. Bei diesen wandelt sich stets ein Teil der mechanischen Energie durch Reibungsarbeit in innere Energie um. Dadurch sind die reibungsbehafteten mechanischen Vorgänge irreversibel! Diese Irreversibilität hat zur Folge, dass in der reibungsbehafteten Mechanik alle Vorgänge von selbst nur in eine Richtung laufen. Kommt zum Beispiel ein angestoßenes Fadenpendel zur Ruhe, läuft der Vorgang von selbst nicht wieder in der umgekehrten Reihenfolge ab. Das heißt, dass ein ruhendes Fadenpendel aufgrund der irreversiblen Umwandlung von mechanischer Energie in innere Energie nie von selbst zu schwingen beginnt. Die dafür notwendige Energie könnte es ja - ohne den ersten Hauptsatz zu verletzen - durch Umwandlung von innerer Energie der Umgebung in mechanische Energie der Schwingung gewinnen.

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre hat also zum Inhalt, dass fast alle Vorgänge in der Natur irreversibel sind.

Aufgaben:

1. Hält man Kaffee in einem Metallbecher oder einem Styroporbecher besser warm?
2. Warum stellt man einen Metallöffel in ein heißes Getränk, damit das Getränk schneller abkühlt?
3. Warum kühlt im Frühjahr die Erde bei einer sternklaren Nacht stärker ab, als wenn der Himmel wolkenbedeckt ist?
4. Ein Fahrrad wird durch eine konstante Kraft von 12,1 N längs einer Strecke von 12 m zum Stehen gebracht.
Berechne die Temperaturerhöhung des Bremsbackens ($m = 15 \text{ g}$; $c = 1,4 \text{ Fehler!}$), wenn 27,9 % der Arbeit zur Erhöhung der inneren Energie führt.
5. Bei den folgenden beiden Teilaufgaben wird angenommen, dass sich 100 % der Arbeit in innere Energie umwandeln.
 - a. Aus welcher Höhe fällt ein Kugelschreiber ($c = 2,43 \text{ Fehler!}$, $m = 10 \text{ g}$), damit sich seine Temperatur um 0,004 K erhöht?
 - b. Aus welcher Höhe muss eine 8,5 kg schwere Schultasche fallen, damit ihre Temperaturerhöhung ebenfalls 0,004 K beträgt?
6. Die Luft in einem Arbeitszimmer ($l = 4,0 \text{ m}$, $b = 3,5 \text{ m}$, $h = 2,4 \text{ m}$) wird durch die Wärmestrahlung der Sonne von 20° C auf 26° C erwärmt.
Berechne die Änderung der inneren Energie der Luft.
7. In eine Porzellantasse ($c = 0,80 \text{ Fehler!}$, $m = 100 \text{ g}$) der Temperatur 20° C werden 150 ml Tee ($c = 4,1 \text{ Fehler!}$) gegossen, der eine Temperatur von 80° C hat.
Berechne die Mischungstemperatur.

8. In einer Badewanne befinden sich 170 l Wasser der Temperatur 42° C.
- Wieviel Wasser der Temperatur 16° C muss eingeleitet werden, damit die Mischungstemperatur 35° C beträgt?
 - Erkläre, warum mehr kaltes Wasser zugegeben werden muss, als man in der Teilaufgabe a. berechnet hat.
9. a. Drei Eisenquader gleicher Grundfläche und den Massen von 100 g, 300 g und 700 g haben eine Temperatur von 200° C. Sie werden gleichzeitig auf einen Eisblock gestellt.
Welcher der Eisenquader sinkt am meisten ein?
- b. Drei Metallquader gleicher Grundfläche, gleicher Masse und der spezifischen Wärmekapazitäten $c_{\text{Blei}} = 0,129$ **Fehler!**, $c_{\text{Eisen}} = 0,452$ **Fehler!** und $c_{\text{Titan}} = 0,52$ **Fehler!** haben eine Temperatur von 200° C. Sie werden gleichzeitig auf einen Eisblock gestellt.
Welcher der Quader sinkt am meisten ein?
10. Die spezifische Wärmekapazität von Körpern kann sehr einfach durch Mischungsversuche bestimmt werden.
Gibt man 10 g Silber der Temperatur 200° C in 200 ml Wasser der Temperatur 20,0° C, ergibt sich nach einiger Zeit eine Mischtemperatur von 20,5° C.
Berechne die spezifische Wärmekapazität von Silber.
11. Bei einem Schülerversuch werden 200 ml Wasser der Temperatur 20° C und 100 ml Wasser der Temperatur 85° C in einen Styroporbecher geschüttet. Die Mischungstemperatur beträgt 39° C.
Berechne um wieviel sich die innere Energie des Wassers im Styroporbecher erhöht hat.
12. Wie verhält sich das Land-Seewind-System bei einer sternklaren Nacht?
13. Eine Kugel rollt reibungsfrei eine schiefe Ebene hinunter und anschließend waagrecht weiter. Wie muß man den Versuch gestalten, damit der Vorgang reversibel ist, das heißt die Kugel anschließend den gleichen Weg die schiefe Ebene wieder hinauf rollt?
14. Schiebt man einen Wagen auf einer waagrechten Unterlage kurz an, so nimmt seine Geschwindigkeit aufgrund der Reibung immer mehr ab und er kommt schließlich zur Ruhe.
- Ist der Vorgang reversibel oder irreversibel? (Begründung)
 - Wie muß der Versuch gestaltet werden, damit der Wagen aus der Ruhe wieder auf die Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt wird? (Tip: äußere Kräfte sind zugelassen.)

3. Die Änderung des Aggregatzustandes

Bei den bisherigen Versuchen wurde die Temperatur von Körpern immer nur soweit geändert, dass sie während des Versuchs jeweils fest, flüssig oder gasförmig blieben. Das heißt, ihr Aggregatzustand hat sich nicht verändert.

Bevor wir untersuchen, was bei einer Änderung des Aggregatzustandes geschieht, betrachten wir das Teilchenmodell bei festen, flüssigen und gasförmigen Körpern etwas näher.

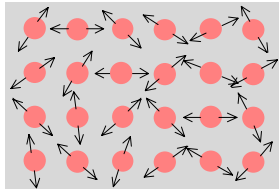


Abb. 43.1: fester Aggregatzustand

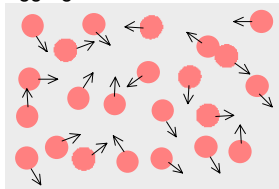


Abb. 43.2: flüssiger Aggregatzustand

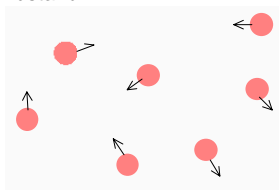


Abb. 43.3: gasförmiger Aggregatzustand

Fester Aggregatzustand (siehe Abb. 43.1):

Ein Festkörper hat einen regelmäßigen gitterförmigen Aufbau. Dabei sind die Teilchen (Atome oder Moleküle) fest an ihre Gitterplätze gebunden. Sie führen um diese Gitterplätze herum Schwingungen aus.

Flüssiger Aggregatzustand (siehe Abb. 43.2):

Eine Flüssigkeit hat keinen regelmäßigen Aufbau. Die Teilchen sind nur leicht an andere Teilchen gebunden. Sie können sich in der gesamten Flüssigkeit bewegen.

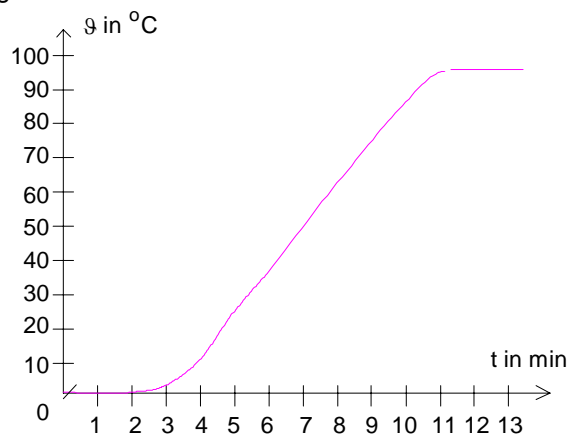
Gasförmiger Aggregatzustand (siehe Abb. 43.3):

Auch ein Gas weist keinen regelmäßigen Aufbau auf. Die Bindung mit anderen Teilchen ist sehr viel geringer als in Flüssigkeiten. Sie können meist vernachlässigt werden. Die Teilchen können sich im gesamten Gasraum frei bewegen.

Untersuchen wir nun, was geschieht, wenn sich der Aggregatzustand eines Körpers ändert. Dazu stellen wir einen Becherglas, in dem sich ein Eis-Wasser-Gemisch der Temperatur 0°C befindet, auf eine Heizplatte und messen in festen Zeitabständen die Temperatur.

Zeit t in min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
θ in °C	0	0	0	2	14	26	38	50	62	74	86	96	96

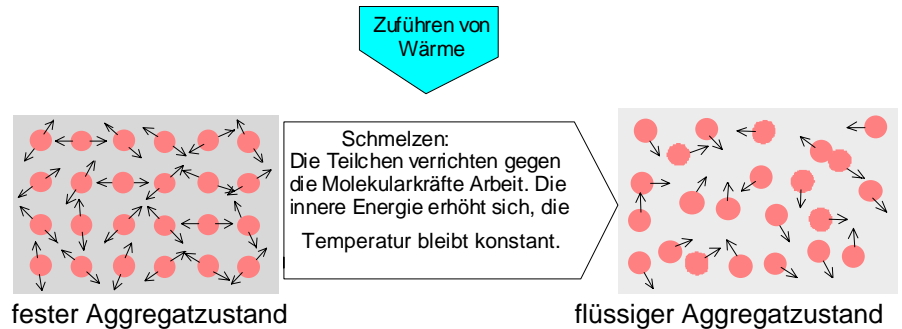
t-θ-Diagramm:



Das t-θ-Diagramm zeigt, dass bei 0°C (Schmelztemperatur von Wasser) und bei 96°C (Siedetemperatur von Wasser) die Temperatur für einige Zeit konstant bleibt, obwohl die Heizplatte kontinuierlich Wärme an das Eis bzw. Wasser abgibt. Um dieses Phänomen zu erklären betrachten wir die Änderung der Aggregatzustände und der damit verbundenen energetischen Prozesse mit Hilfe des Teilchenmodells.

3.1 Das Schmelzen

Wird einem festen Körper kontinuierlich Wärme zugeführt, beginnt er zu schmelzen. Er geht dabei vom festen in den flüssigen Aggregatzustand über. Betrachten wir den Schmelzvorgang unter Zuhilfenahme des Teilchenmodells genauer.



Tab. 44.1:

Stoff	Schmelztemperatur in °C	spezifische Schmelzenergie in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Ethanol	-114	108
Quecksilber	-38,9	11,8
Eis	0	334
Blei	327	23
Gold	1063	65,7

Die Energie, die man zum Schmelzen eines Körpers benötigt, nennt man Schmelzenergie E_s . Da jedes Teilchen beim Schmelzen im Mittel die gleiche Arbeit verrichten muß, ist die Schmelzenergie direkt proportional zur Teilchenanzahl und somit auch zur Masse des Körpers. Der Quotient aus Schmelzenergie E_s und Masse m ist eine Materialkonstante. Man nennt ihn spezifische Schmelzenergie s .

$$\text{Spezifische Schmelzenergie: } s = \frac{E_s}{m}$$

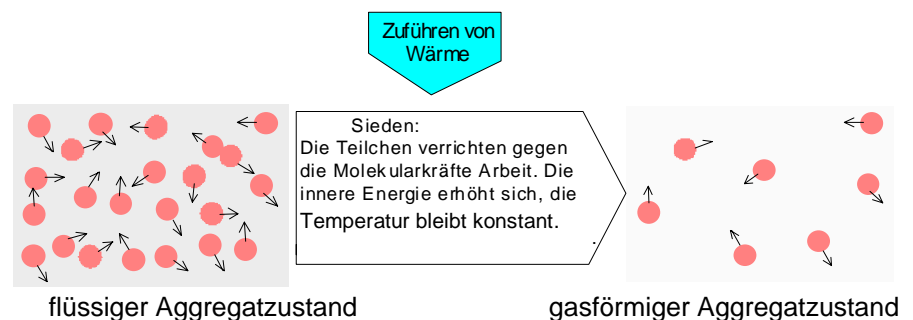
$$\text{Meßeinheit: } [s] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

3.2 Das Erstarren

Beim Übergang vom flüssigen in den festen Aggregatzustand wird Energie frei. Man nennt sie Erstarrungsenergie E_E . Da beim Erstarren genauso viel Energie frei wird, wie zum Schmelzen aufgewendet werden muss, ist die spezifische Erstarrungsenergie eines Körpers genauso groß wie seine spezifische Schmelzenergie.

3.3 Das Sieden

Wird einem flüssigen Körper kontinuierlich Wärme zugeführt, beginnt er zu sieden, die Flüssigkeit beginnt zu verdampfen. Der Körper geht dabei vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand über. Betrachten wir den Siedevorgang unter Zuhilfenahme des Teilchenmodells genauer.



Tab. 44.1:

Stoff	Verdampfungs- temperatur in °C	spezifische Verdampf- ungs- energie in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Ethanol	78,3	840
Queck- Silber	356,9	285
Wasser	100	2256
Blei	1750	8600
Gold	2677	1650

Die Energie, die man zum Verdampfen eines Körpers benötigt, nennt man Verdampfungsenergie E_V . Da jedes Teilchen beim Verdampfen im Mittel die gleiche Arbeit verrichten muß, ist die Verdampfungsenergie direkt proportional zur Teilchenanzahl und somit auch zur Masse des Körpers. Der Quotient aus Verdampfungsenergie E_V und Masse m ist eine Materialkonstante. Man nennt ihn spezifische Verdampfungsenergie r .

$$\text{Spezifische Verdampfungsenergie: } r = \frac{E_V}{m}$$

$$\text{Meßeinheit: } [r] = 1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

3.4 Das Kondensieren

Beim Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Aggregatzustand wird Energie frei. Man nennt sie Kondensationsenergie E_K . Da beim Kondensieren genau soviel Energie frei wird, wie zum Verdampfen aufgewendet werden muß, ist die spezifische Kondensationsenergie eines Körpers genauso groß wie seine spezifische Verdampfungsenergie.

3.5 Das Verdunsten

Teilchen einer Flüssigkeit können auch unterhalb der Siedetemperatur vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen. Man nennt diesen Vorgang Verdunsten. Beim Verdunsten müssen die Teilchen der Flüssigkeit zum einen Arbeit gegen die Molekularkräfte verrichten, zum andern verrichten sie auch Ausdehnungsarbeit gegen den herrschenden Luftdruck. Somit können nur Teilchen, die eine deutlich höhere kinetische Energie als die meisten anderen Flüssigkeitsmoleküle haben, die Flüssigkeit verlassen. Daraus resultiert aber, dass sich die mittlere kinetische Energie der restlichen Flüssigkeitsteilchen verringert und die Temperatur in der Flüssigkeit abnimmt.

Dies zeigt auch folgender Versuch: Wir umhüllen das Vorratsgefäß eines Thermometers mit Watte und tröpfeln auf die Watte etwas Spiritus. Dass der Spiritus verdampft, erkennt man daran, dass das Thermometer eine stetig fallende Temperatur anzeigt und außerdem nach kurzer Zeit der gesamte Raum nach Spiritus riecht.

Die folgenden Beispiele zeigen, dass das Phänomen Verdunsten häufig in unserem Alltag vorkommt.



Abb. 45.1: Hechelnder Hund

a. Die Tiere verdunsten Wasser um sich abzukühlen. So verdunstet der Hund beim Hecheln Wasser auf der Zunge, den Atemwegen und der Lunge (siehe Abb. 45.1). Die größte Wärmeabgabe erfolgt dabei über die großflächige Riechschleimhaut, an der der warme Atem vorbeiströmt. Die Verdunstungskälte bewirkt eine Abkühlung des Tieres.

b. Auch der Mensch verdunstet Wasser, um sich abzukühlen. Die Haut gibt durch Schweißbildung in etwa die gleiche Wassermenge ab wie beim Ausatmen.

Wie wichtig die Verdunstung für die Regulation der Körpertemperatur ist, zeigt der 1798 von Blagden, einem Sekretär der Royal Society, durchgeführte Versuch. Er begab sich eine dreiviertel Stunde lang in einen Raum, dessen Lufttemperatur 126°C betrug und in dem die Luftfeuchtigkeit sehr gering war. Anschließend verließ er den Raum ohne gesundheitliche Folgen, hatte aber großen Durst. Ein zum Vergleich mitgeführtes Beefsteak war in der Dreiviertelstunde so gegart worden, dass es ganz hart war.

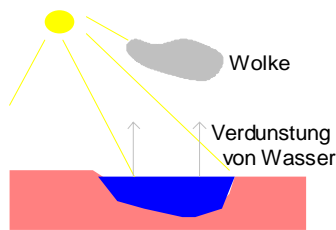


Abb. 46.1: Wolkenbildung durch Verdunsten

- c. Der Waldstorch brütet auf Baumwipfeln und ist daher stark der Sonnenstrahlung ausgesetzt. Um sich abzukühlen, uriniert er häufig auf seine Beine. Der verdunstende Urin bewirkt eine Abkühlung des Vogels.
- d. Bei Gewässern verdunstet kontinuierlich ein Teil des Wassers (siehe Abb. 46.1). Die Wassermoleküle sammeln sich in der Atmosphäre und sind so für die Wolkenbildung verantwortlich.

Aufgaben:

1. In einen Gefrierschrank wird 20 ml Wasser der Temperatur 20°C gegeben.
 - a. Wieviel Wärme wird dem Wasser entzogen, bis es eine Temperatur von 0°C hat?
 - b. Wieviel Wärme wird dem Wasser entzogen, bis es ganz zu Eis erstarrt ist?
2. 0,5 l Wasser der Temperatur 100°C sollen durch Wärmezufuhr verdampft werden.
 - a. Berechne die dazu benötigte Wärmemenge.
 - b. Wieviel Liter Wasser könnte man mit der in Teilaufgabe 2.a berechneten Wärmemenge von 20°C auf 100°C erwärmen?
3. Zur Kühlung gibt man in 200 ml Limonade der Temperatur 23°C 10 g Eis der Temperatur 0°C . Berechne die Mischtemperatur.
4. Beim Öffnen eines Kochtopfes strömt Wasserdampf aus. 0,2 g dieses Wasserdampfes kondensieren im Gesicht der Köchin, die dem Topf zu nahe gekommen ist.
 - a. Berechne die freigewordene Wärme, wenn das kondensierte Wasser am Ende die Körpertemperatur angenommen hat.
 - b. Wieviel Liter Wasser müssen von 45°C auf 37°C heruntergekühlt werden, damit die gleiche Wärme frei wird, wie in der Aufgabe 4.a berechnet?
5. Warum bläst man über die Oberfläche einer Suppe, wenn man sie schnell abkühlen möchte?
6. Warum hechelt ein Hund bei großer Hitze?

4. Das ideale Gas

Bei den meisten Wärmekraftmaschinen wie zum Beispiel der Gasturbine oder dem Benzinmotor, wird mit Hilfe eines Gases innere Energie in mechanische Arbeit umgewandelt.

Bevor wir in den nächsten Kapiteln die technischen Bestandteile dieser Wärmekraftmaschinen betrachten, untersuchen wir näher, wie sich Gase bei Druck-, Temperatur- und Volumenänderungen verhalten. Dabei beschränken wir uns der Einfachheit halber auf ideale Gase. Das sind Gase, deren anziehende Molekularkräfte so gering sind, dass man diese Kräfte vernachlässigen kann. Wir können uns also unter einem idealen Gas viele harte Kugeln vorstellen die im Raum herum fliegen. Die Kugeln ändern ihre Flugbahn nur dann, wenn sie entweder auf andere Kugeln oder auf einen Gegenstand treffen.

Um eine bestimmte Menge des idealen Gases beschreiben zu können, benötigt man folgende Größen: Volumen, Druck und Temperatur des Gases. Wie diese Größen voneinander abhängen, wird im folgenden untersucht.

Zusammenhang von Volumen und Druck:

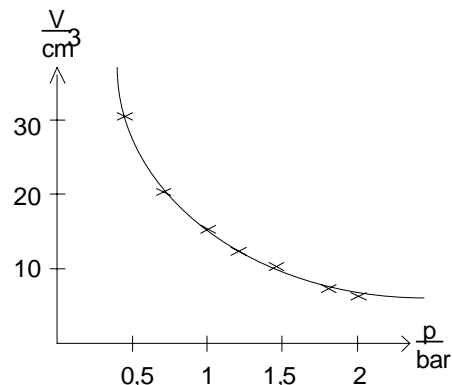
Wir verändern bei konstant gehaltener Temperatur den Druck p eines idealen Gases (hier Luft) und messen, wie sich sein Volumen V verändert (siehe Abb. 47.1). Die Gasmenge wird während des gesamten Versuchs konstant gehalten.



Abb. 47.1 Zusammenhang von Volumen und Druck beim idealen Gas.

p/bar	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0
V/cm ³	30	21	15	13	10	8,7	7,4

Um den Zusammenhang zwischen p und V zu erkennen, zeichnet man ein p - V -Diagramm.



Der Graph ist eine Hyperbel. Daraus folgt:

$$I. \quad V \sim \frac{1}{p} \quad \text{bei konstanter Temperatur } T$$

Das ist das Boyle-Mariottesche Gesetz.

Zusammenhang von Volumen und Temperatur:

Wir verändern bei konstantem Druck die Temperatur T eines Gases und messen, wie sich sein Volumen V verändert. Dazu geben wir ein unten geschlossenes Glasrohr, das innen eine Querschnittsfläche von 4 mm² hat und von einem Quecksilbertropfen verschlossen ist, in ein Wasserbad (siehe Abb. 47.2). Das Wasserbad wird nun so langsam erwärmt, dass die

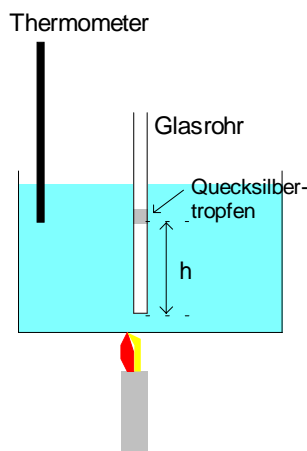
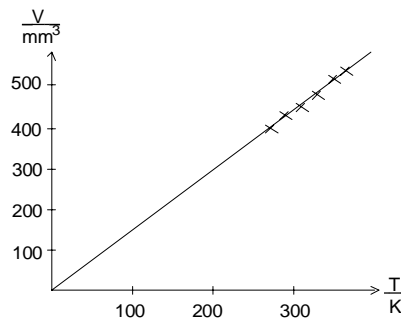


Abb. 47.2: Zusammenhang von Volumen und Temperatur bei einem idealen Gas

Temperatur T des Gases stets gleich der Temperatur des Wassers ist. Bei der Erwärmung des Gases erhöht sich sein Volumen gerade so weit, dass der Druck des Gases gleich der konstanten Summe aus Atmosphärendruck und Schweredruck des Quecksilbertropfens ist. Der Druck bleibt also konstant. Neben dem Druck wird auch die Gasmenge während des gesamten Versuchs konstant gehalten. Das Volumen V des Gases berechnet sich bei diesem Versuch folgendermaßen: $V = 4\text{mm}^2 \cdot h$.

T / K	273	293	313	333	353	368
V / mm ³	400	430	459	491	518	538

Um den Zusammenhang zwischen T und V zu erkennen, zeichnet man ein T-V-Diagramm.



Der Graph ist eine Gerade. Daraus folgt:

II. $V \sim T$ bei konstantem Druck p
Das ist das Gay-Lussacsche Gesetz.

Aufgrund der Abhängigkeit des Volumens vom Druck und der Temperatur ergibt sich aus I und II.: $V \sim \frac{T}{p}$

bzw. **Fehler!** = konstant.

Ändert man also den Zustand einer bestimmten Menge des idealen Gases, so bleibt der Quotient pV/T immer konstant. Wird also eine bestimmte Menge Gas von einem Anfangszustand (bezeichnet mit dem Index 1) in einen Endzustand gebracht (bezeichnet mit dem Index 2), so ergibt sich folgende Gleichung:

Zustandsgleichung des idealen Gases:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

- 1: Anfangszustand des Gases
- 2: Endzustand des Gases

- Anmerkung: 1. Weitere Versuche ergeben, dass die oben angegebene Zustandsgleichung für alle idealen Gase gilt.
2. Die Zustandsgleichung des idealen Gases gilt für das Gas nur dann, wenn seine Menge während des Versuchs konstant bleibt.

Aufgaben:

1. Eine leere verschlossene Mineralwasserflasche wird von einem Raum der Lufttemperatur $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($p = 1,02\text{ bar}$) in die Sonne gestellt und erwärmt sich auf eine Temperatur von $31\text{ }^{\circ}\text{C}$.
Berechne den Luftdruck in der Flasche.
2. Im sechzehnten Jahrhundert wurde die Luftpumpe entwickelt.
Welcher Druck ist in einer Kugel ($V_K = 0,11\text{ m}^3$), wenn bei der Luftpumpe ($V_P = 1,2\text{ dm}^3$) 18 Kolbenzüge gemacht wurden und am Anfang in der Kugel ein Luftdruck von $1,013\text{ bar}$ herrschte?
3. Ein Dorsch wird mit einem Schleppnetz sehr schnell aus einer Tiefe von 270 m an die Wasseroberfläche gebracht. Durch die Ausdehnung des Gases in der Schwimmblase (20 cm^3 in 270 m Tiefe) drückt es ihm den Darm aus dem Maul heraus.
Berechne das Volumen des Gases in der Schwimmblase, wenn der Dorsch an die Wasseroberfläche gelangt ist.
4. Die Tiefsee ist der Bereich, der sich mehr als 200 m unter dem Meeresspiegel befindet. Dort gibt es Fischarten, die in der Nacht bis an die Wasseroberfläche steigen.
Ein Tiefseefisch schwimmt bei konstanter Körpertemperatur aus einer Tiefe von 600 m an die Wasseroberfläche. Wieviel Luft muss ein Fisch, ablassen, wenn seine Schwimmblase ein (konstantes) Volumen von 5 cm^3 hat?
Nimm zur Vereinfachung an, dass der Fisch erst an der Wasseroberfläche die Luft aus der Luftblase abgibt.
5. Die Luft in einem Backofen ($l = 40\text{ cm}$, $b = 40\text{ cm}$, $h = 30\text{ cm}$) wird von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufgewärmt. Der Luftdruck beträgt $1,0\text{ bar}$.
 - a. Berechne den Druck im Inneren des Herdes, wenn bei der Erwärmung keine Luft aus dem Herd strömen kann.
 - b. Berechne das Volumen der Luft, die aus dem Herd strömt, wenn der Innenraum des Herdes nicht luftdicht ist.
6. Im Jahr 1891 stieg Berson mit einem Ballon auf eine Höhe von 10 km . Der Ballon konnte maximal 8400 m^3 Gas fassen. Die Temperatur auf dem Erdboden betrug $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, es herrschte ein Luftdruck von $1,0\text{ bar}$. In 10 km Höhe betrug die Temperatur $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, bei einem Luftdruck von $0,28\text{ bar}$.
Welches Volumen Gas war auf dem Erdboden in dem Ballon, wenn in der genannten Höhe der Ballon voll gespannt war?

5. Die technische Nutzung der inneren Energie



Abb. 50.1: Windmühle

Die uns von der Natur zur Verfügung stehende mechanische Energie kann häufig technisch genutzt werden. Denken wir nur an die Windmühlen, bei denen die kinetische Energie der Luft benutzt wird, um Mahlsteine anzutreiben (siehe Abb. 50.1). Oder betrachten wir einmal eine an einem Fluß liegende Mühle. Hier wird die kinetische Energie des Wassers zum Antreiben von Wasserrädern benutzt, die wiederum Mahlsteine antreiben. Diese Maschinen haben jedoch zwei wesentliche Nachteile. Zum einen können sie nur dort aufgestellt werden, wo die Natur im ausreichenden Maß Energie in Form von Wind zur Verfügung stellt. Zum andern steht die von der Natur zur Verfügung gestellte technisch nutzbare mechanische Energie nur im begrenzten Maß zur Verfügung.

Diese Nachteile treten bei der Verbrennung fossiler Energieträger wie zum Beispiel Holz, Kohle oder Erdöl nicht auf. Durch die Verbrennung kann an jedem Ort beliebig viel innere Energie zur Verfügung gestellt werden, die zum Teil in mechanische Energie umgewandelt werden kann. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe hat auch Nachteile. So ist zum Beispiel das bei der Verbrennung entstehende Kohlendioxid zum Teil für den Treibhauseffekt verantwortlich.

Wir untersuchen nun, wie man mit Hilfe von Wärmekraftmaschinen die innere Energie in mechanische Energie umwandeln kann.

5.1. Physikalische Grundlagen der Wärmekraftmaschinen: das Perpetuum mobile zweiter Art

Alle Wärmekraftmaschinen arbeiten nach dem gleichen Prinzip.

Zuerst wird an ein Gas kurzzeitig Wärme übertragen (siehe Abb. 50.2). Dadurch erhöht sich seine innere Energie und damit auch die Temperatur des Gases. Wie wir aus der Gleichung des idealen Gases leicht ablesen können, steigt dadurch der Druck des Gases an. Das Gas drückt somit den Kolben entgegen dem äußeren Druck nach oben. Durch das Verschieben des Kolbens leistet das Gas Arbeit. Aufgrund des Energieerhaltungssatzes erfolgt eine Abnahme der inneren Energie und somit auch der Temperatur. Der Kolben wird um so weiter heraus gedrückt, je höher die Temperatur des erwärmten Gases ist. Das Gas leistet dann mehr Arbeit.

Da man es bei einer Wärmekraftmaschine nicht bei einer einmaligen Verschiebung des Kolbens belassen möchte, ist es notwendig den Kolben in seine Ursprungsstellung zurückzuführen. Dazu kühlt man das Gas mit Hilfe einer Kühlflüssigkeit ab (siehe Abb. 50.3). Wie wir auch hier sehr leicht an der Gleichung des idealen Gases sehen können, sinkt der Druck des Gases ab. Da nun der von außen auf den Kolben angreifende Druck größer ist als der Druck des Gases, wird der Kolben zurückgedrängt. Je geringer die Temperatur des abgekühlten Gases ist, desto weiter schiebt sich der Kolben in den Zylinder zurück.

Nun kann der gesamte Prozeß wieder von vorne beginnen. Wir haben damit eine periodisch arbeitende Maschine erhalten, die zum einen Teil die ihr zugeführte innere Energie in mechanische Arbeit umwandelt, zum andern den Rest der ihr zugeführten inneren Energie in Form von Abwärme an die Kühlflüssigkeit abgibt. Dieser Zusammenhang soll mit dem untenstehenden Energie-Fluss-Diagramm nochmals verdeutlicht werden.

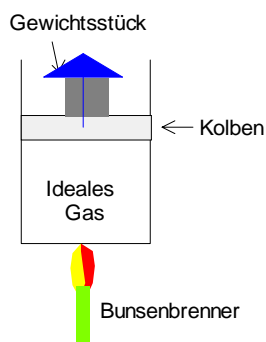


Abb. 50.2: Erwärmen eines idealen Gases

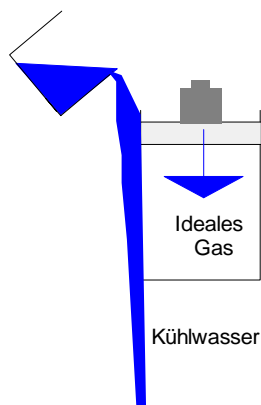
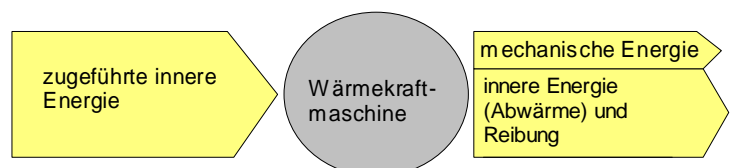


Abb. 50.3: Abkühlen eines idealen Gases



In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu erkennen, dass jede Wärmekraftmaschine, um periodisch arbeiten zu können, innere Energie in Form von Abwärme abgibt. Bei dem von uns gewählten Beispiel wäre ohne diese Form der Energieabgabe das Zurückdrängen des Kolbens in seine ursprüngliche Lage nur unter der Aufwendung von Arbeit möglich. Die dazu aufzuwendende Arbeit ist aber genau so groß wie die Arbeit, die zuvor von dem Gas verrichtet wurde. In der Summe stünde uns also keine Arbeit zur Verfügung.

Dabei muß nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre die Temperatur des Gases in dem Kolben höher sein als die Temperatur der Kühlflüssigkeit. Die Abwärme kann aufgrund ihrer geringen Temperatur nicht mehr zur anschließenden Erwärmung des Gases im Kolben herangezogen werden. Die innere Energie, die in der Abwärme steckt, kann von der Maschine nicht mehr genutzt werden. Somit ist bei einer periodisch arbeitenden Wärmekraftmaschine eine vollständige Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie nicht möglich. Diese Aussage ist gleichwertig mit der bereits bekannten Aussage des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre. Also kann man den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre auch folgendermaßen formulieren:

Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre:

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die nichts anderes bewirkt als die Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie und die Abkühlung eines Wärmereservoirs.

Anmerkungen: 1. Für den Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine gilt:

$$\begin{aligned}\eta &= \text{Fehler!} \\ &= \text{Fehler!} \\ &= 1 - \text{Fehler!}\end{aligned}$$

Da nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre bei einer periodisch arbeitenden Maschine immer Abwärme entsteht, ist ihr Wirkungsgrad nach oben hin beschränkt. Er ist somit immer kleiner als 1. Für die Beschränkung des Wirkungsgrades sind also nicht technische Unzulänglichkeiten, sondern der zweite Hauptsatz der Wärmelehre verantwortlich.

2. Wir hatten festgestellt, dass der Kolben um so weiter herausgetrieben wird, je höher die Temperatur des erwärmten Gases im Kolben ist und dass der Kolben um so weiter in den Zylinder zurückgedrängt wird, je geringer die Temperatur des abgekühlten Gases ist. Das heißt aber, dass die von der Wärmekraftmaschine verrichtete Arbeit und damit auch ihr Wirkungsgrad um so größer ist, je höher die Temperaturdifferenz zwischen der höchsten und der geringsten Temperatur des Gases in dem Kolben ist.
3. Die Abwärme kann aufgrund ihrer geringen Temperatur nicht mehr zum Antrieb der Wärmekraftmaschine benutzt werden. Sie erwärmt die Umwelt. Man sagt: Die durch die Abwärme technisch nicht genutzte innere Energie ist entwertet.
4. Eine periodisch arbeitende Maschine, die innere Energie vollständig in mechanische Energie umwandeln kann, nennt man Perpetuum mobile zweiter Art. Der zweite Hauptsatz besagt, dass das Perpetuum mobile zweiter Art nicht existieren kann.

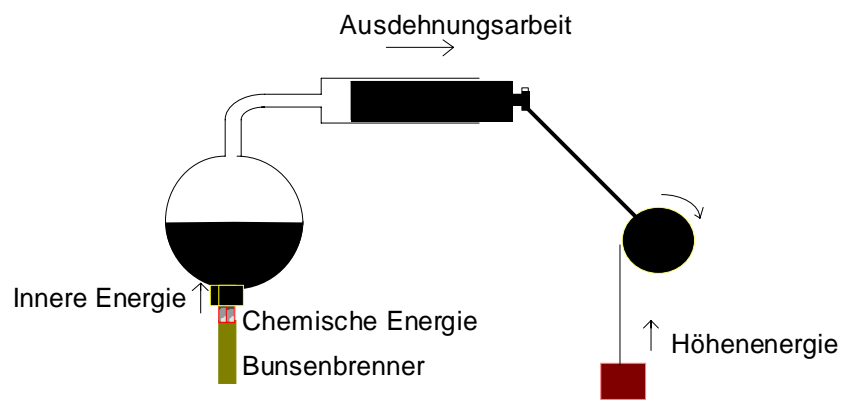


Abb. 52.1: Newcomen - Dampfmaschine 1682

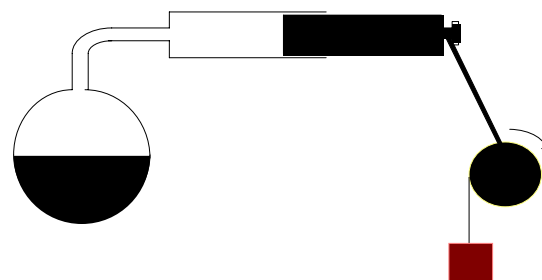
5. 2 Die atmosphärische Dampfmaschine

Die atmosphärische Dampfmaschine ist untrennbar mit dem Beginn der industriellen Revolution am Anfang des achtzehnten Jahrhunderts verbunden (siehe Abb. 51.1). Sie wurde dazu benutzt, das Wasser aus Kohlengruben zu pumpen. Ihr Wirkungsgrad von 1 % war so schlecht, dass über sie gewitzelt wurde, man bräuchte für ihren Betrieb eine eigene Kohlengrube. Verständlicherweise drang man sehr schnell auf Verbesserungen, so dass diese Art der Dampfmaschine bald veraltet war. Wir betrachten sie deshalb genauer, weil sich mit ihr sehr gut die teilweise Umwandlung von innerer Energie in mechanische Arbeit zeigen lässt.

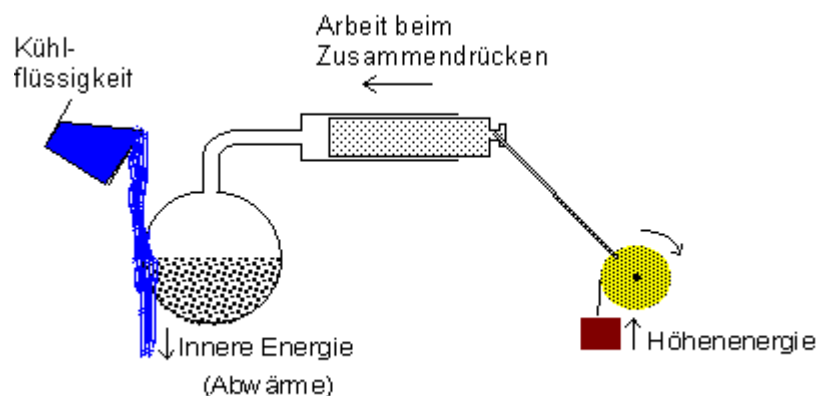
Die folgenden Abbildungen zeigen den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise einer atmosphärischen Dampfmaschine.



Dem Wasser im Glaskolben wird durch Verbrennung Wärme zugeführt. Dadurch verdampft ein Teil des Wassers. Der entstehende Wasserdampf drückt den Kolben des Kolbenprobers nach rechts. Über eine feste Rolle wird ein Massenstück hochgehoben. Dabei wird Hubarbeit verrichtet.



Wenn der Kolben des Kolbenprobers genügend weit nach rechts geschoben wurde führt man dem Wasser keine Wärme mehr zu.



Wenn man das Wasser im Glaskolben abkühlt, wird ihm Wärme entzogen. Dadurch kondensiert der Wasserdampf, so dass in dem Glaskolben und dem Kolbenprober ein Unterdruck entsteht. Daher schiebt der Atmosphärendruck den Kolben wieder nach links. Über eine feste Rolle wird das Massenstück wiederum hochgehoben. Dabei wird Hubarbeit verrichtet.

Die atmosphärische Dampfmaschine hat ihren Namen aufgrund der Tatsache, dass der Atmosphärendruck den Kolben beim Abkühlvorgang in den Kolbenprober zurückdrängt.

Wiederholt man den Vorgang des Erhitzens und des anschließenden Abkühlens immer wieder, erhält man eine periodisch arbeitende Maschine.

Betrachten wir nun noch die innere Energie-mechanische Energiebilanz der atmosphärischen Dampfmaschine:

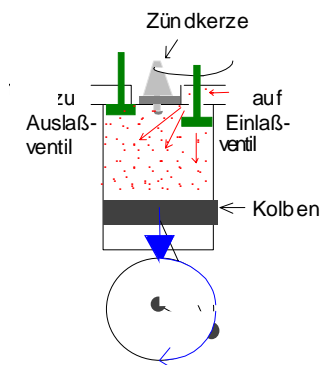
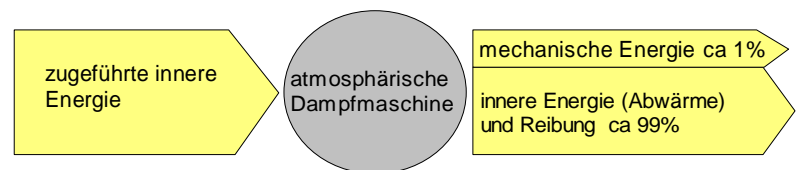


Abb. 53.1: Ansaugtakt

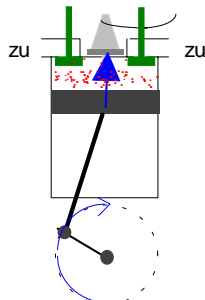


Abb. 53.2: Verdichtungstakt

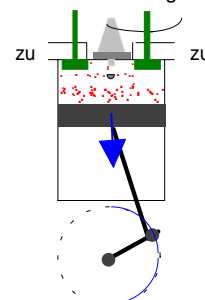


Abb. 53.3: Arbeitstakt

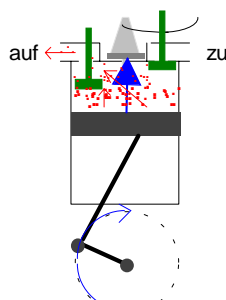


Abb. 53.4: Auspufftakt

5.3 Verbrennungsmotoren

Bei Verbrennungsmotoren wird die bei der Verbrennung frei werdende innere Energie zum Teil in mechanische Energie umgewandelt.

Der Viertakt-Ottomotor:

Wir betrachten nun den weitverbreitetsten Automotor, nämlich den Viertakt-Ottomotor. Bei ihm unterscheidet man vier Arbeitstakte.

1. Ansaugtakt (siehe Abb. 53.1): Das vom Vergaser kommende Benzin-Luft-Gemisch wird durch das geöffnete Einlaßventil vom Kolben angesaugt.
2. Verdichtungstakt (siehe Abb. 53.2): Nachdem das Einlaßventil geschlossen wurde, drückt der Kolben das Benzin-Luft-Gemisch zusammen. Dabei erwärmt sich das Benzin-Luft-Gemisch.
3. Arbeitstakt (siehe Abb. 53.3): Das zusammengedrückte Benzin-Luft-Gemisch wird von der Zündkerze entzündet. Chemische Energie wird in innere Energie umgewandelt. Das entstandene Verbrennungsgas hat aufgrund der hohen Temperatur einen großen Druck und drückt daher den Kolben wieder nach unten. Dabei verrichtet das Verbrennungsgas Arbeit und verringert dadurch seine Temperatur.
4. Auspufftakt (siehe Abb. 53.4). Das Verbrennungsgas wird wegen des sich nach oben bewegenden Kolbens, durch das geöffnete Auslaßventil in die Auspuffanlage gedrückt.

Anschließend beginnt der Vorgang mit dem Ansaugtakt von neuem.

Der Kolben ist mit der Pleuelstange verbunden. Diese setzt die Bewegung des Kolbens in eine Drehbewegung um. Da nur beim einem der vier Takte, nämlich dem Arbeitstakt, Arbeit verrichtet wird, würde ein Motor mit einem Ventil nicht gleichmäßig laufen. Daher werden bei Autos mehrere Zylinder verwendet, deren Takte zeitlich gegeneinander versetzt sind.

Der Viertakt-Dieselmotor:

Der Dieselmotor hat keine Zündkerzen und keinen Vergaser. Bei ihm wird die im Ansaugtakt angesaugte Luft im Verdichtungstakt zusammengedrückt. Dadurch wird die Luft auf bis zu 900 °C erwärmt. Nun spritzt man das Dieselöl ein, das sich bei den hohen Temperaturen selbst entzündet.

Der Wirkungsgrad eines Ottomotors beträgt ungefähr 25%, der eines Dieselmotors zwischen 35% und 46%. Im Vergleich dazu erreichen die Muskeln von Hochleistungssportlern einen Wirkungsgrad von etwas über 30%. Sowohl bei den Motoren als auch bei den Muskeln wird der Teil der zur Verfügung gestellten inneren Energie, der nicht in mechanische Arbeit umgewandelt wird, in Form von Abwärme und Reibung abgegeben.

5. Felduntersuchung des Lernerfolgs

Der erste Entwurf des Münchner Unterrichtskonzepts wurde erstmals im Schuljahr 1996/97 in einer Schulklasse erprobt. Lernschwierigkeiten, die direkt während des Unterrichts auftraten oder anhand von Schülerinterviews erkennbar wurden, führten zu einer überarbeiteten Fassung. Diese neue Fassung des Münchner Unterrichtskonzepts war dann die Grundlage für die im Schuljahr 1997/98 durchgeführte vergleichende Felduntersuchung. Bei dieser Untersuchung wurde ein Teil der Schüler/innen nach dem Münchner Unterrichtskonzept (im folgenden Versuchsgruppe genannt), der andere Teil (im folgenden Kontrollgruppe genannt) nach dem konventionellen Unterrichtskonzept beschult (siehe Kapitel 4.2 Seite 44). Dabei erhielten die Schüler/innen der Versuchsgruppe als Ersatz für das Schulbuch ein 54 Seiten umfassendes Unterrichtsskript (siehe Kapitel 4.4 Seite 48- 101).

Im Laufe des Schuljahres bearbeiteten die Schüler/innen unter Angabe ihres Namens folgende Tests:

- Intelligenztest zu Beginn des Schuljahres
- Vortest zu Beginn des Schuljahres
- Lernerfolgstest I nach Abschluß des Kapitels „mechanische Energie“
- Lernerfolgstest II nach Abschluß des Kapitels „Wärmelehre“

Bevor die Schülergruppen und die verwendeten Tests vorgestellt werden, erfolgt erst einmal die Besprechung der verwendeten Testverfahren.

5.1 Testverfahren

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Testverfahren angewendet. Ein Intelligenztest, um die kognitiven Fähigkeiten der Schüler/innen zu bestimmen, und unterschiedliche statistische Prüfverfahren, um die gewonnen Untersuchungsdaten statistisch auszuwerten.

5.1.1 Intelligenztest und Unterteilung in Intelligenzklassen

Die kognitiven Fähigkeiten der Schüler/innen wurden mit Hilfe des FIGURE REASONING TEST (Daniels 1962) ermittelt. Bei diesem nonverbalen Intelligenztest müssen die Schüler/innen am Ende einer gegebenen Figurenfolge in ein leeres Kästchen die richtige, fehlende Figur einsetzen. Innerhalb einer halben Stunde sind 45 solcher Figurenfolgen zu bearbeiten. Der FIGURE REASONING TEST weist gegenüber anderen Intelligenztests den Vorteil auf, dass die unterschiedliche Sprachkompetenz der Schüler/innen keine Rolle spielt.

Daniels (1962) hebt neben der hohen Reabilität (Zuverlässigkeit) die hohe Validität (Gültigkeit – g-Faktor über 0,8) des Tests hervor. Der FIGURE REASONING TEST weist eine hohe Korrelation zu anderen bekannten Intelligenztests auf.

	Korrelationskoeffizient (Daniels 1962)
FIGURE REASONING TEST zum Alexanders Performance Scale:	0,90
FIGURE REASONING TEST zum Ravens Matrices 1938:	0,93
FIGURE REASONING TEST zum Stanford-Binet Form L.:	0,86
FIGURE REASONING TEST zum Welscher Intelligence Test for Children:	0,87

Die Schüler/innen wurden anhand der ermittelten IQ-Werte in folgende Intelligenz-Klassen eingeteilt:

IQ-Wert	Intelligenz-Klasse	Beispiel: Prozentsatz von Schülern/Schülerinnen einer Grammar School in Amerika (Daniels 1962)
≥ 128	A	5 %
127 – 121	B	25 %
120 – 108	C	40 %
107 – 102	D	25 %
≤ 101	E	5 %

Bei der Auswertung der Lernerfolgstests der hier vorliegenden Arbeit kann die IQ-Gruppen Unterteilung in A, B, C, D und E nicht herangezogen werden, da sonst die Anzahl der Schüler/innen für die einzelnen untersuchten Fälle so gering ist, dass eine statistische Aussage zum Teil nicht mehr möglich ist. Daher wird eine IQ-Gruppen-Unterteilung herangezogen, bei der einzelne IQ-Gruppen zusammengefasst werden..

IQ-Wert	zusammengefasste Intelligenz-Klassen	Beispiel: Prozentsatz von Schülern/Schülerinnen einer Grammar School in Amerika (Daniels 1962)	Schüler/in
≥ 121	A,B	30 %	überdurchschnittlich intelligent
120 – 108	C	40 %	durchschnittlich intelligent
≤ 107	D,E	30 %	unterdurchschnittlich intelligent

5.1.2 Statistische Prüfverfahren

Die ausgewählten Testverfahren beruhen auf der Annahme, dass bei den durchgeführten Tests die Versuchsgruppe und die Kontrollgruppe voneinander statistisch unabhängige Stichproben sind. Da alle Schulklassen zufällig ausgewählt wurden, ist diese Annahme sicherlich zulässig. Die Verteilungsform der Stichproben muss bei den ausgewählten Testverfahren nicht bekannt sein. Die verwendeten Prüfverfahren werden darin unterschieden, wie die Testergebnisse, die man beim IQ-Test, beim Vortest und bei den beiden Lernerfolgstests erhalten hat, skaliert wurden.

Nominal skalierte Testergebnisse:

Bei dieser Art der Skalierung werden verschiedene Merkmalsklassen unterschieden. Dabei werden die Merkmale nur aufgezählt, ohne dass eine Rangfolge unter den Merkmalsklassen angegeben wird.

Der χ^2 Test:

Beim χ^2 werden die folgenden Hypothesen überprüft:

Nullhypothese: Keine Unterscheidung in der Verteilung der Grundgesamtheiten.

Alternativhypothese: Beobachtete und erwartete Häufigkeiten der Grundgesamtheiten unterscheiden sich.

Ordinal skalierte Testergebnisse:

Bei dieser Art der Skalierung wird eine Rangfolge unter den Merkmalsklassen aufgestellt. Beurteilt wird, ob eine Merkmalsklasse kleiner, gleich oder größer als eine andere Merkmalsklasse ist. Maßeinheiten sind hier nicht gegeben.

Der U-Test von Mann und Withney:

Beim U-Test von Mann und Withney werden die folgenden Hypothesen überprüft:

Nullhypothese: Die Zufallsvariable hat in beiden Grundgesamtheiten die gleiche Verteilung.

Alternativhypothese: Die Zufallsvariable ist in einer Grundgesamtheit stochastisch höher als in der anderen Grundgesamtheit. (Das heißt z.B., dass der Lernerfolg der einen Gruppe höher ist als von der anderen.)

Der Kolmogorov-Smirnov-Test:

Der Test unterscheidet sich vom U-Test von Mann und Withney in der Alternativhypothese.

Nullhypothese: Die Zufallsvariable hat in beiden Grundgesamtheiten die gleiche Verteilung.

Alternativhypothese: Die Zufallsvariablen in beiden Grundgesamtheiten sind verschieden verteilt. (Das bedeutet z.B., dass in der einen Gruppe alle Schüler genau den gleichen Lernerfolg aufweisen, während in der anderen Gruppe ein Teil nichts richtig hat, während der andere Teil alles richtig hat.)

Kruskal-Wallis-Test:

Er entspricht dem Kolmogorov-Smirnov-Test. Bei ihm ist die Anzahl der Grundgesamtheiten jedoch größer oder gleich zwei.

Bei allen Tests wurde das Testniveau von 5 % gewählt. Das bedeutet: Ist das zum Testwert gehörende Signifikanzniveau p % kleiner als 5 %, so wird die Nullhypothese abgelehnt, die Alternativhypothese wird angenommen. Die statistische Sicherheit für die Alternativhypothese ist dann gleich $100\% - p\%$.

5.2 Beschreibung der Versuchs- und Kontrollgruppen

An der Felduntersuchung nahmen elf Klassen aus sechs verschiedenen bayerischen Gymnasien teil. Nur die 202 Schüler/innen, die alle Tests bearbeitet hatten, wurden bei der anschließenden Auswertung der Tests berücksichtigt. Die Versuchsgruppe bestand dabei aus 92 Schülern, die Kontrollgruppe aus 110 Schülern. Bei beiden Gruppen betrug das Durchschnittsalter der Schüler/innen zu Beginn der Untersuchung 14,5 Jahre. Die beiden folgenden Tabellen zeigen die genaue Aufteilung der einzelnen Gruppen.

Versuchsgruppe:

Untergruppe	Klasse	Schule	Ort der Schule	Lehrer	Gesamtzahl der Schüler/innen	Geschlecht
1	9. Klasse	Illertal-Gymnasium	Vöhringen	Herr B. (der Autor)	19	11 Mädchen
						8 Jungen
2	9. Klasse	Illertal-Gymnasium	Vöhringen	Herr B. (der Autor)	15	9 Mädchen
						6 Jungen
3	9. Klasse	Simpert-Krämer-Gymnasium	Krumbach	Herr L.	19	3 Mädchen
						16 Jungen
4	9. Klasse	Nikolaus-Kopernikus-Gymnasium	Weißenhorn	Herr Ke.	17	9 Mädchen
						8 Jungen
5	9. Klasse	Nikolaus-Kopernikus-Gymnasium	Weißenhorn	Herr Kr.	22	8 Mädchen
						14 Jungen

Kontrollgruppe:

Untergruppe	Klasse	Schule	Ort der Schule	Lehrer	Gesamtzahl der Schüler/innen	Geschlecht
6	9. Klasse	Kolleg der Schulbrüder	Illertissen	Herr S.	14	7 Mädchen
						7 Jungen
7	9. Klasse	Kolleg der Schulbrüder	Illertissen	Frau S.	12	0 Mädchen
						12 Jungen
8	9. Klasse	Kolleg der Schulbrüder	Illertissen	Frau S.	27	17 Mädchen
						10 Jungen
9	9. Klasse	Lessing-Gymnasium	Neu-Ulm	Herr Bu.	21	11 Mädchen
						10 Jungen
10	9. Klasse	Lessing-Gymnasium	Neu-Ulm	Herr Si.	21	11 Mädchen
						10 Jungen
11	9. Klasse	Bertha-von-Suttner-Gymnasium	Neu-Ulm	Herr F.	15	6 Mädchen
						9 Jungen

Sämtliche Lehrkräfte sind dem Autor persönlich bekannt. Sie machten alle einen kompetenten Eindruck und waren stets engagiert bei der Sache. Alle Kollegen/innen sind erfahrene Pädagogen, die nach eigenen Aussagen auf Grund ihrer langjährigen Berufserfahrung wissen, bei welchen physikalischen Begriffen die Schüler/innen Schwierigkeiten haben. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass beide Gruppen von gleich qualifizierten Lehrkräften unterrichtet wurden.

5.3 Untersuchungen zur Vergleichbarkeit von Versuchsgruppe und Kontrollgruppe

Grundsätzlich ist festzustellen, dass Lehrer/innen, Schüler/innen und das zu Grunde liegende Unterrichtskonzept Einfluss auf den Lernerfolg ausüben.

Die Lehrer/innen beeinflussen durch die Qualität ihres Unterrichts, ihren Einsatz und ihre Persönlichkeit etc. den Lernerfolg der Schüler/innen. Den Einfluss der einzelnen Lehrkräfte zu bestimmen setzt eine detaillierte Untersuchung der Lehrerpersönlichkeit, ihres Verhaltens im Unterricht und ihrer fachlichen Kompetenz voraus. Davon wurde jedoch Abstand genommen, da zu befürchten war, dass sich sonst keine Lehrkräfte für die Untersuchung zur Verfügung gestellt hätten. Der Einfluss der Lehrer/innen auf das Lernverhalten der einzelnen Gruppen kann bei dieser Felduntersuchung als in etwa gleich groß angenommen werden, da beide Gruppen, wie bereits oben beschrieben, von gleich guten und gleich motivierten Lehrkräften unterrichtet wurden.

Der Lernerfolg der Schüler/innen wird nicht nur durch deren kognitive Fähigkeiten, sondern auch durch deren Motivation und physikalische Vorkenntnisse beeinflusst. Der Faktor Schülermotivation wurde nicht untersucht. Es kann aber angenommen werden, dass die Schüler/innen der beiden Versuchsgruppen, die alle zufällig

ausgewählt wurden, im Durchschnitt gleich motiviert waren. Sowohl die kognitiven Voraussetzungen, als auch die physikalischen Vorkenntnisse der Schüler/innen wurden anhand zweier separater Tests genauer betrachtet. Diese Tests und ihre Ergebnisse werden in den beiden folgenden Kapiteln vorgestellt.

5.3.1 Vergleich der kognitiven Fähigkeiten von Versuchsgruppe und Kontrollgruppe

Um die kognitiven Fähigkeiten beider Gruppen vergleichen zu können, wurde von allen Schülern/Schülerinnen der Intelligenzquotient (IQ-Wert) mit Hilfe des FIGURE-REASONING-TESTS ermittelt. Dabei wurde neben dem Vergleich der IQ-Mittelwerte (im folgenden mit \overline{IQ} abgekürzt) der beiden Gruppen auch noch untersucht, inwieweit die \overline{IQ} vom Geschlecht und von der Einteilung in die IQ-Klassen (AB, C und DE) abhängen.

\overline{IQ} Vergleich von Versuchs- und Kontrollgruppe:

	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
\overline{IQ}	118,5	117,9
Standardabweichung	8,24	8,00
N	92	110

Der U-Test von Mann-Whitney zeigt, dass die IQ-Werte der Versuchsgruppe nicht signifikant höher sind als die der Kontrollgruppe¹. Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt, dass keine Signifikanz bezüglich der Verteilung der IQ-Werte vorliegt².

Folgerung: Sowohl der \overline{IQ} als auch die IQ-Verteilung bei beiden Gruppen unterscheiden sich nicht wesentlich.

Geschlechtsspezifischer \overline{IQ} Vergleich von Versuchs- und Kontrollgruppe:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	Mädchen	Jungen	Mädchen	Jungen
\overline{IQ}	119,7	117,6	119,2	116,7
Standardabweichung	7,03	9,03	6,00	9,33
N	40	52	52	58

Vergleicht man die IQ-Werte von Mädchen und Jungen innerhalb der Versuchsgruppe, ergibt der U-Test von Mann-Whitney³ und der Kolmogorov-Smirnov-Test⁴ keine Signifikanz. Das gleiche Bild ergibt sich bei der

¹ p = 0,475

² p = 0,480

³ p = 0,321

⁴ p = 0,720

Kontrollgruppe⁵. Der Vergleich der Mädchen-IQ-Werte zwischen Versuchsgruppe und Kontrollgruppe ergibt sowohl nach dem U-Test von Mann-Withney⁶ als auch nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test⁷ keine Signifikanz. Auch die Jungen-IQ-Werte beider Gruppen sind nicht signifikant unterschiedlich⁸.

Folgerung: Es gibt weder beim \overline{IQ} noch bei der IQ-Verteilung einen geschlechtsspezifischen Unterschied.

Verteilung der Schüler/innen von Versuchs- und Kontrollgruppe auf die zusammengefassten Intelligenz-Klassen:

Bei der Auswertung der Lernerfolgstests konnte die IQ-Klassen Unterteilung in A, B, C, D, und E nicht herangezogen werden. Grund dafür war, dass bei den notwendigen Differenzierungen die Anzahl der zu betrachtenden Schüler/innen so gering wurden, dass statistisch gesicherte Aussagen nicht mehr möglich sind. Daher wurde die zusammengefasste IQ-Klassen-Unterteilung herangezogen.

zusammengefasste IQ-Klassen:	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
AC	47,8%	44	46,4%	51
C	43,5%	40	43,6%	48
DE	8,7%	8	10,0%	11

Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergibt, dass zwischen den beiden Gruppen keine Signifikanz in der Verteilung der IQ-Werte auf die einzelnen Intelligenz-Klassen vorliegt⁹.

Folgerung: Bei der IQ-Verteilung besteht bezüglich der zusammengefassten IQ-Klassen zwischen beiden Gruppen kein wesentlicher Unterschied.

⁵ U-Test von Mann-Withney: $p = 0,347$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,218$

⁶ $p = 0,441$

⁷ $p = 0,437$

⁸ Mann-Withney: $p = 0,659$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,830$

⁹ $p = 1,000$

Geschlechtsspezifische Verteilung der Schüler/innen von Versuchs- und Kontrollgruppe auf die zusammengefassten Intelligenz-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen:	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
AB	52,5%	21	44,2%	23	48,1%	25	44,8%	26
C	45,0%	18	42,3%	22	48,1%	25	39,7%	23
DE	2,5%	1	13,5%	7	3,8%	2	15,5%	9

Vergleicht man die IQ-Verteilungen von Mädchen und Jungen innerhalb der Versuchsgruppe mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests, so zeigt sich, dass keine Signifikanz vorliegt¹⁰. Das Gleiche gilt für die Kontrollgruppe¹¹.

Bei dem Vergleich der IQ-Verteilungen der Mädchen beider Gruppen ergibt sich nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test¹² keine Signifikanz. Das gilt auch für den Vergleich der IQ-Verteilung der Jungen¹³.

Folgerung: Die Aufteilung der IQ-Werte auf die einzelnen zusammengefassten IQ-Klassen hängt nicht signifikant vom Geschlecht ab.

Zusammenfassung der Auswertung zu den kognitiven Fähigkeiten der Schüler/innen:

Sowohl bei den IQ-Mittelwerten als auch bei der Verteilung der IQ-Werte auf die zusammengefassten IQ-Klassen treten zwischen Versuchsgruppe und Kontrollgruppe keine signifikanten Unterschiede auf. Das gilt auch, wenn man die IQ-Werte geschlechtsspezifisch betrachtet.

Diskussion:

Bezogen auf den IQ-Wert bringen beide Gruppen die gleichen Voraussetzungen mit. Die unterschiedlichen Lernerfolge von Versuchsgruppe und Kontrollgruppe können daher nicht auf die IQ-Werte der Schüler/innen bzw. auf deren IQ-Mittelwerte zurückgeführt werden

¹⁰ p = 0,949

¹¹ Kolmogorov-Smirnov-Test: p = 0,849

¹² p = 1,000

¹³ Kolmogorov-Smirnov-Test: p = 1,000

5.3.2 Physikalische Vorkenntnisse der Schüler/innen

Die relevanten physikalischen Vorkenntnisse der Schüler/innen wurden mit Hilfe eines Vortests ermittelt, der zu Beginn des Schuljahrs 1997/98 durchgeführt wurde.

Der Vortest bestand aus 7 Items zu den Themenbereichen „mechanische Energie“ und „Wärmelehre“. Die Schüler/innen hatten maximal 40 Minuten Zeit um den Test zu bearbeiten.

Vortest

Klasse: _____

Name: _____

1. Wie erklärst du einem Freund was man in der Physik unter dem Begriff „Kraft“ versteht?

2. Wenn man einen Gummiball auf den Boden fallen lässt, springt er einige Zeit hoch und runter. Die ersten paar Mal erreicht er dabei fast die gleiche Höhe, aus der er losgelassen wurde. Versuche zu erklären, warum der Gummiball zu Beginn fast wieder die gleiche Höhe erreicht.

3. Bleiben wir bei dem Beispiel mit dem Gummiball. Nach einiger Zeit hüpfte der Gummiball immer weniger hoch. Woran könnte das liegen?

4. Man liest in der Zeitung oft etwas über den Energieverbrauch. Was ist deiner Meinung nach darunter zu verstehen?

5. Wenn man ein Loch in die Wand bohrt, wird der Bohrer sehr warm. Wie kannst du das erklären?

6. Es ist dir sicher schon Folgendes aufgefallen: Nimmt man eine Wurstdose (aus Metall) und einen Joghurtbecher (aus Plastik) aus dem Kühlschrank, fühlt sich die Dose aus Metall kälter an als der Becher aus Plastik. Woran könnte das liegen?

7. Du möchtest ein Stückchen Eis so schnell wie möglich schmelzen. Kreuze an, welche Möglichkeit deiner Meinung nach am Besten ist.

Ich stelle das Eis auf einen Metallblock (Temperatur 20 °C)

Ich wickle das Eis in einen dicken Wollpullover.

Begründe kurz deine Wahl.

Ergebnisse des Vortests:

Die Darstellung der Ergebnisse des Vortests wurde bewusst sehr kurz gehalten, da nicht die Präkonzepte der Schüler/innen, sondern nur ihre fachspezifischen Voraussetzungen untersucht werden sollten.

Item 1:

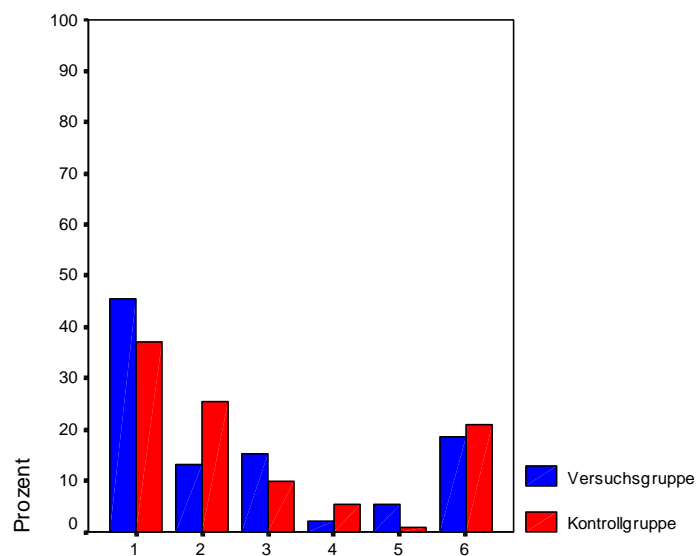
Wie erklärst du einem Freund, was man in der Physik unter dem Begriff "Kraft" versteht?

Intention: Mit diesem Item sollte untersucht werden, welche Vorstellung die Schüler/innen von der Kraft haben. Nur wenn die Schüler/innen den Kraftbegriff richtig verstanden haben, ist es ihnen möglich den physikalischen Arbeitsbegriff zu verstehen.

Antwortkategorien (im Folgenden mit Ak. abgekürzt):

1. Kraft als Ursache für Bewegungsänderung und / oder Verformung
2. Kraft bewegt einen Körper
3. Ausschließliche Nennung von Beispielen
4. Kraft charakterisiert durch Angriffspunkt, Betrag und Richtung
5. Kraft ist Energie
6. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant¹⁴. Innerhalb der einzelnen Gruppen weist die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf¹⁵.

¹⁴ $\chi^2 = 10,821$, $p = 0,055$

¹⁵ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 2,618$, $p = 0,758$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 4,508$, $p = 0,479$

Zusammenfassung und Diskussion:

Die Antwortkategorie 1 entspricht den Lerninhalten aus der 8. Jahrgangsstufe. 44,6 % der Versuchsgruppe und 37,3 % der Schüler/innen der Kontrollgruppe beantworten die Frage in diesem Sinne. Über ein Fünftel der Schüler/innen beider Gruppen kann sich unter der Kraft nichts vorstellen oder hat ein völlig falsches Bild von der Kraft¹⁶.

Item 2:

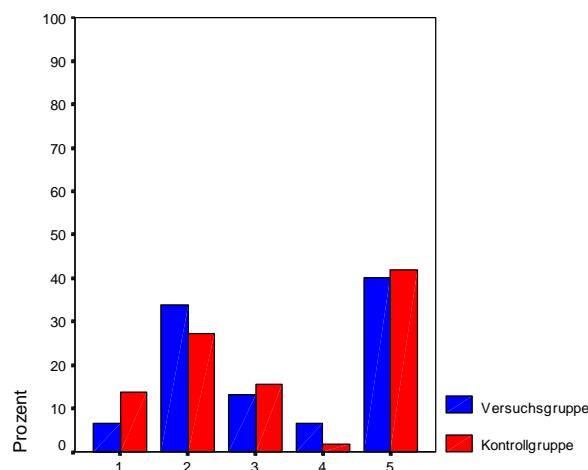
Wenn man einen Gummiball auf den Boden fallen lässt, springt er einige Zeit hoch und runter. Die ersten paar Mal erreicht er dabei fast die gleiche Höhe, aus der er losgelassen wurde. Versuche zu erklären, warum der Gummiball zu Beginn fast wieder die gleiche Höhe erreicht.

Intention: Mit diesem Item sollte untersucht werden, ob bei den Schülern/Schülerinnen eine (Energie-) Erhaltungsvorstellung ausgeprägt ist.

Antwortkategorien:

1. Wegen der Energie / des Schwungs
2. Weil der Ball elastisch ist
3. Wegen der Kraft / Schwerkraft
4. Wegen der Geschwindigkeit
5. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant¹⁷. Innerhalb der einzelnen Gruppen weist die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf¹⁸.

¹⁶ Ak. 5 und 6: Versuchsgruppe: 23,9 %, Kontrollgruppe: 21,9 %

¹⁷ $\chi^2 = 6,156$, $p = 0,188$

¹⁸ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 0,703$, $p = 0,951$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 7,540$, $p = 0,110$

Zusammenfassung und Diskussion:

In beiden Gruppen bringt nur eine geringe Anzahl von Schülern/Schülerinnen dieses Beispiel mit dem Erhaltungsgedanken in Zusammenhang¹⁹. 33,7 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe und 27,3 % der Schüler/innen der Kontrollgruppe sehen als Grund die Elastizität des Balls an. Damit ist zwar die Frage beantwortet, warum der Gummiball überhaupt nach oben hüpft, nicht jedoch warum er nahezu die gleiche Höhe wie zu Beginn erreicht. Mehr als ein Zehntel der Schüler/innen beider Unterrichtskonzepte sehen als Ursache für die gleichbleibende Bewegung die Kraft oder die Schwerkraft an²⁰.

Item 3:

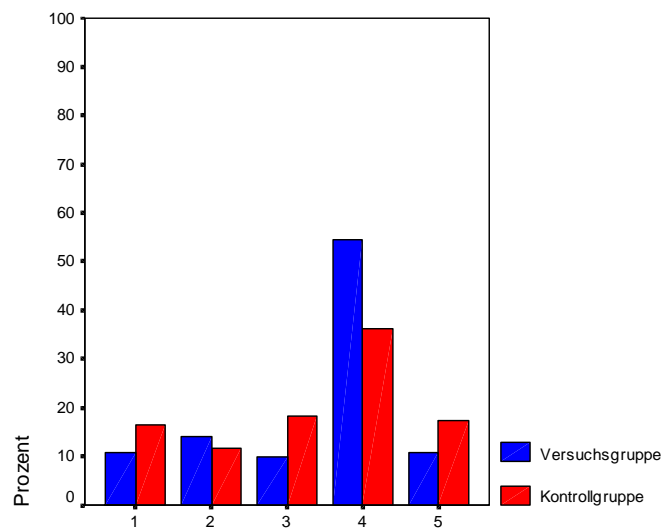
Bleiben wir bei dem Beispiel mit dem Gummiball. Nach einiger Zeit hüpft der Gummiball immer weniger hoch. Woran könnte das liegen?

Intention: Mit diesem Item sollte untersucht werden, wie sich die Schüler/innen die Abnahme der maximalen Höhe und damit der mechanischen Energie des Balls erklären.

Antwortkategorien:

1. Der Ball verliert Energie / Schwung
2. Wegen des Luftwiderstands und / oder der Reibung
3. Der Ball verliert Kraft
4. Wegen der Schwerkraft
5. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

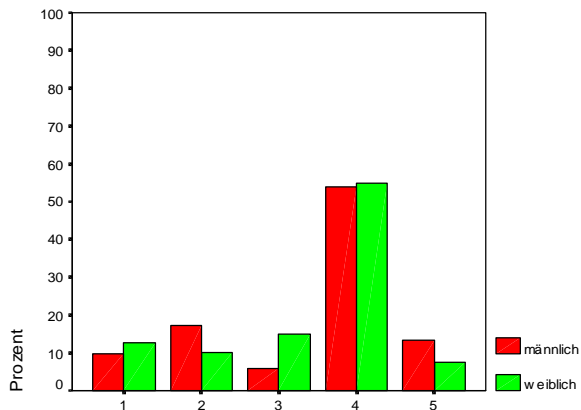


¹⁹ Ak. 1: Versuchsgruppe: 6,5 %, Kontrollgruppe: 13,6 %

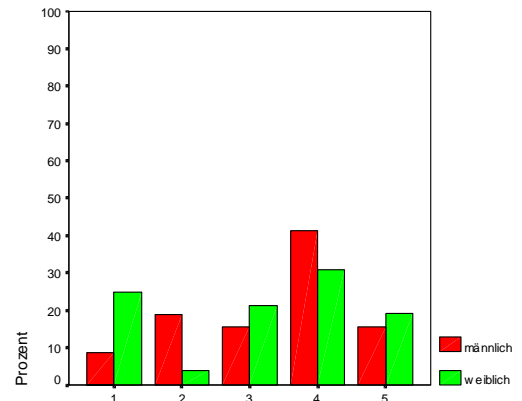
²⁰ Ak. 3: Versuchsgruppe: 13,0 %, Kontrollgruppe: 15,5 %

Da sich in der Kontrollgruppe ein signifikanter geschlechtsspezifischer Unterschied ergibt, wird in der untenstehenden Grafik das Antwortverhalten der Versuchsgruppe und der Kontrollgruppe nach Mädchen und Jungen differenziert angegeben.

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant²¹. Innerhalb der Versuchsgruppe weist die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf²². Die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der Kontrollgruppe unterschied sich signifikant²³.

Zusammenfassung und Diskussion:

Mehr als die Hälfte der Schüler/innen beider Gruppen sieht als Ursache für die Verringerung der von dem Ball erreichten Höhe die Kraft oder die Schwerkraft²⁴. Mehr Schüler/innen als nach dem Item 2 zu erwarten führen die Abnahme der von dem Ball erreichten Höhe auf den Verlust von Energie bzw. Schwung zurück²⁵.

Ein Grund für den signifikanten Unterschied der geschlechtsspezifischen Antwortverteilung der Kontrollgruppe kann wohl darin gesehen werden, dass die Mädchen bei diesem Beispiel auf einer abstrakteren Ebene dachten und daher den Energie- bzw. Schwungverlust als Ursache für die kontinuierliche Verringerung der vom Ball erreichten Höhe angaben. Die Jungen haben dafür sehr viel häufiger eine konkrete Vorstellung des Vorgangs, indem sie den Luftwiderstand bzw. die Reibung als Grund für das Abnehmen der Ballhöhe nannten. Dieser Unterschied deutet sich beim Item 2 bereits an. Dort argumentieren mehr als doppelt so viele Mädchen wie Jungen der Kontrollgruppe mit dem Erhaltungsgedanken²⁶.

²¹ $\chi^2 = 8,828$, $p = 0,066$

²² $\chi^2 = 3,742$, $p = 0,442$

²³ $\chi^2 = 11,345$; $p = 0,023$

²⁴ Ak. 3 und 4: Versuchsgruppe: 64,1 %, Kontrollgruppe: 54,6 %

²⁵ Item 2: Ak. 1: Versuchsgruppe: 6,5 %, Kontrollgruppe: 13,6% im Vergleich:

Item 3: Ak 1: Versuchsgruppe: 10,9 %, Kontrollgruppe: 16,3 %

²⁶ Mädchen: 19,2 %; Jungen: 8,6 %

Item 4:

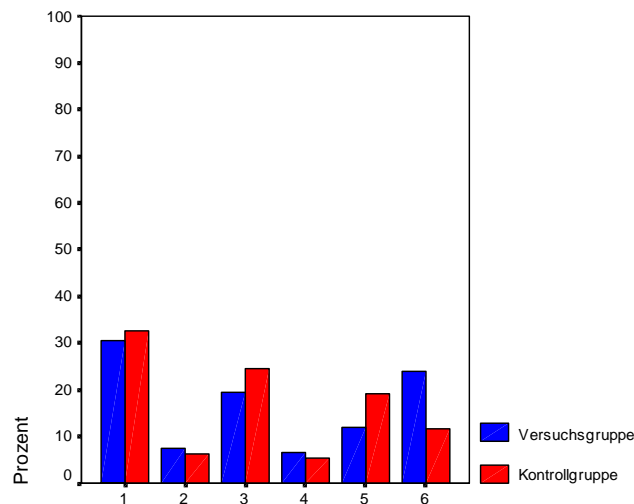
Man liest in der Zeitung oft etwas über den Energieverbrauch. Was ist deiner Meinung nach darunter zu verstehen?

Intention: Mit diesem Item sollte untersucht werden, was die Schüler/innen mit dem in den Medien verbreiteten Begriffs des „Energieverbrauchs“ verbinden.

Antwortkategorien:

1. Stromverbrauch
2. Stromverbrauch und Energieverbrauch bei der Bewegung eines Lebewesens
3. Stromverbrauch und andere Beispiele für den Energieverbrauch
4. Energieverbrauch bei der Bewegung eines Lebewesens
5. Andere Beispiele für den Energieverbrauch
6. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant²⁷. Innerhalb der einzelnen Gruppen weist die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf²⁸.

Zusammenfassung und Diskussion:

Die meisten Schüler/innen verbanden mit dem Energieverbrauch den Begriff „Stromverbrauch“²⁹. Das am zweit häufigsten genannte Beispiel für den Energieverbrauch war der Energieverbrauch bei der Bewegung eines Lebewesens³⁰.

²⁷ $\chi^2 = 6,688$, $p = 0,245$

²⁸ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 0,871$, $p = 0,927$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 9,890$, $p = 0,078$

²⁹ Ak. 1, 2 und 3: Versuchsgruppe: 57,6 %, Kontrollgruppe: 63,6 %

³⁰ Ak. 2 und 4: Versuchsgruppe: 14,1 %, Kontrollgruppe: 11,9 %

Auffallend ist, dass alle Schüler/innen nur Beispiele des Energieverbrauchs angaben. Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Begriff „Energieverbrauch“ fand bei keinem der Schüler/innen statt.

Item 5:

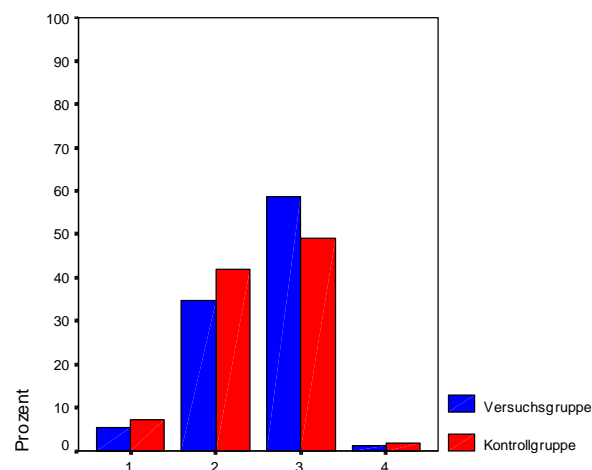
Wenn man ein Loch in die Wand bohrt, wird der Bohrer sehr warm. Wie kannst du das erklären?

Intention: Mit diesem Item sollte untersucht werden, ob die Schüler/innen die beim Bohren stattfindenden Energieumwandlungen erkennen.

Antwortkategorien:

1. Der Bohrer wird wegen der Energieumwandlung heiß
2. Reibung erzeugt Hitze / Wärme
3. Der Bohrer wird wegen der Reibung warm
4. Sonstige und keine Antworten

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant³¹. Innerhalb der einzelnen Gruppen weist die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf³².

Zusammenfassung und Diskussion:

Während nur wenige Schüler/innen den abstrakten Begriff der Energieumwandlung als Ursache für die Erwärmung des Bohrers angaben³³, argumentierten die meisten Schüler/Schülerinnen mit dem konkreter zu fassenden Argument, dass bei der

³¹ $\chi^2 = 1,950$, $p = 0,583$

³² Versuchsgruppe: $\chi^2 = 2,808$, $p = 0,422$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 5,988$, $p = 0,122$

³³ Versuchsgruppe: 5,4 %, Kontrollgruppe: 7,2 %

Reibung Hitze / Wärme entsteht, oder damit, dass sich der Bohrer aufgrund der Reibung erwärmt³⁴.

Item 6:

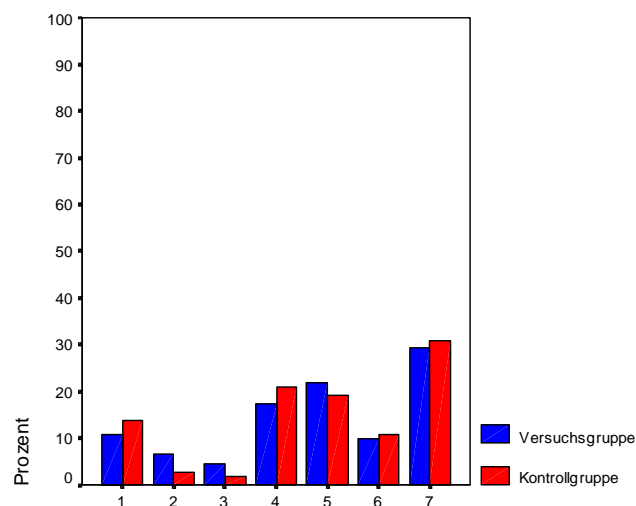
Es ist dir sicher schon Folgendes aufgefallen: Nimmt man eine Wurstdose (aus Metall) und einen Joghurtbecher (aus Plastik) aus dem Kühlschrank, fühlt sich die Dose aus Metall kälter an als der Becher aus Plastik. Woran könnte das liegen?

Intention: Mit diesem Item sollte untersucht werden, wie die Schüler/innen diese physiologische Erfahrung begründen.

Antwortkategorien:

1. Metall leitet besser
2. Metall nimmt Wärme besser (schneller) auf / gibt Kälte besser ab
3. Metall wird schneller kälter
4. Metall nimmt Kälte schneller (besser) auf
5. Metall speichert Kälte besser
6. Metall speichert Kälte besser und ist daher kälter
7. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant³⁵. Innerhalb der einzelnen Gruppen weist die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen ebenfalls keine signifikanten Unterschiede auf³⁶.

³⁴ Ak. 2 und 3: Versuchsgruppe: 93,5 %; Kontrollgruppe: 90,9 %

³⁵ $\chi^2 = 3,604$, $p = 0,730$

³⁶ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 10,207$, $p = 0,116$; Kontrollgruppe: $\chi^2 = 9,009$, $p = 0,173$

Zusammenfassung und Diskussion:

Erstaunlich ist, dass bei beiden Gruppen mehr als 10% der Schüler/innen den Begriff „Wärmeleitung“ nannten, ohne jemals davon im Unterricht gehört zu haben³⁷. Mehr als die Hälfte aller Schüler/innen beider Gruppen schrieben dem Metall die Eigenschaft zu Kälte (schneller) besser aufzunehmen bzw. zu speichern³⁸. Es ist anzunehmen, dass viele dieser Schüler/innen das Metall auch wirklich für kälter halten als das Plastik. Bei beiden Gruppen geben fast 10 % explizit an, dass ihrer Meinung nach das Metall auch real kälter als das Plastik ist³⁹.

Item 7:

Du möchtest ein Stückchen Eis so schnell wie möglich schmelzen. Kreuze an, welche Möglichkeit deiner Meinung nach am besten ist.

Ich stelle das Eis auf einen Metallblock (Temperatur 20 °C)

Ich wickle das Eis in einen dicken Wollpullover.

Begründe kurz deine Wahl.

Intention: Mit diesem Item sollte untersucht werden, ob die Schüler/innen mit dem Wollpullover den Begriff „Wärme“ und mit dem Metall den Begriff „Kälte“ verbinden.

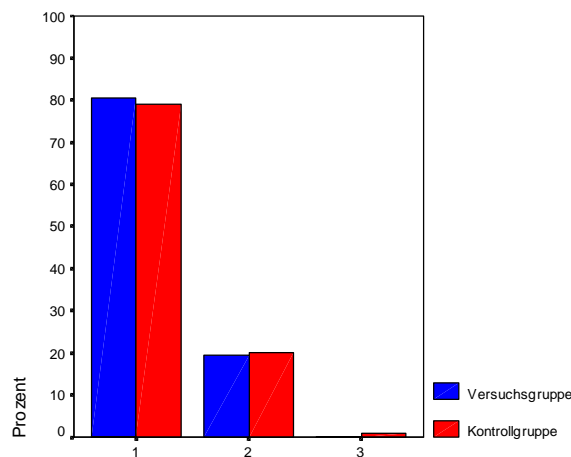
Erster Teil der Auswertung:

Hier wurde nur untersucht, ob die Schüler/innen das Metall oder die Wolle ausgewählt haben.

Antwortkategorien:

1. Ich stelle das Eis auf den Metallblock
2. Ich wickle das Eis in einen dicken Wollpullover
3. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



³⁷ Ak. 1: Versuchsgruppe: 10,9 %, Kontrollgruppe: p = 13,6 %

³⁸ Ak. 3, 4, 5 und 6: Versuchsgruppe: 53,2 %; Kontrollgruppe: p = 52,7 %

³⁹ Ak. 6: Versuchsgruppe: 9,8 %, Kontrollgruppe: 10,9 %

Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt, dass die Antwortverteilung der beiden Gruppen nicht signifikant unterschiedlich ist⁴⁰. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz⁴¹.

Zusammenfassung und Diskussion:

Die meisten Schüler/innen hätten das Eis auf den Metallblock gelegt⁴². Bezogen auf das Durchschnittsalter der Schüler/innen von 14,5 Jahren ist die Anzahl der Schüler/innen, die den Eisklotz in den Pullover wickeln würden, noch erstaunlich hoch⁴³. Diese Schüler/innen haben die bekannte Fehlvorstellung, dass Wolle stets warm ist.

Zweiter Teil der Auswertung:

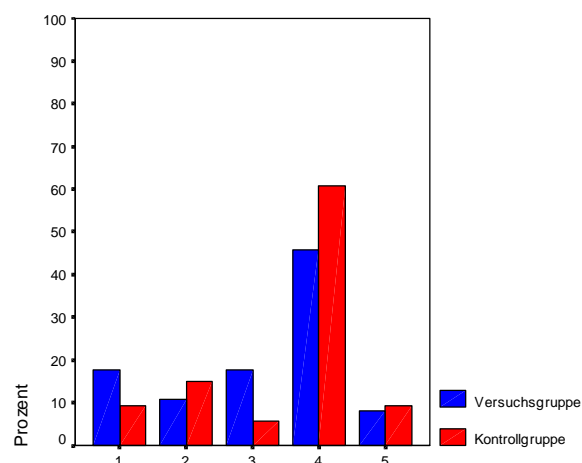
Neben der Auswahl Metall, Wolle, wird nun auch die Begründung für die Auswahl betrachtet.

Die unten stehende Grafik zeigt, wie die Schüler/innen ihre Wahl des Metalls begründen. Dazu wurden folgende Antwortkategorien unterschieden:

Antwortkategorien:

1. Metall gibt Wärme ab, Wolle isoliert
2. Wolle isoliert
3. Metall hat Wärme gespeichert
4. Der Metallblock hält seine Temperatur länger
5. Sonstige oder keine Begründung

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen, bei der Wahl des Metalls:



⁴⁰ $p = 1,000$

⁴¹ Versuchsgruppe: $p = 0,764$, Kontrollgruppe: $p = 0,352$

⁴² Versuchsgruppe: 80,4 %, Kontrollgruppe: 79,1 %

⁴³ Versuchsgruppe: 19,6 %, Kontrollgruppe: 20,0 %

Die Unterschiede der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant⁴⁴. Der Vergleich der Antwortverteilung differenziert, nach Mädchen und Jungen innerhalb der einzelnen Gruppen, konnte nicht vorgenommen werden, da zu viele Werte der Vielfeldertafel unter der 5 %-Schwelle lagen.

Zusammenfassung und Diskussion:

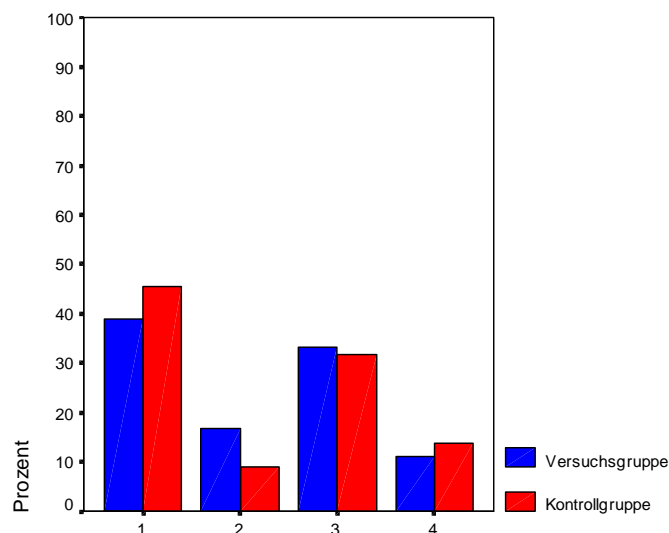
Bei beiden Gruppen gibt jeweils mehr als ein Drittel der Schüler/innen, die das Metall angekreuzt hat, eine physikalisch richtige Teilantwort⁴⁵. Ungefähr die Hälfte der Schüler/innen beider Gruppen gibt an, dass das Metall die Temperatur länger hält⁴⁶. Die Schüler nehmen wahrscheinlich an, dass das Metall die Eigenschaft hat kalt zu sein und es somit durch das Eis gar nicht abgekühlt werden kann.

Die unten stehende Grafik zeigt, wie die Schüler/innen ihre Wahl des Wollpullovers begründet haben. Dazu wurden folgende Antwortkategorien unterschieden:

Antwortkategorien:

1. Wolle macht es rund herum warm
2. Wolle hat Wärme gespeichert
3. Metall wird schneller kalt als Wolle
4. Wolle, sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen, bei der Wahl der Wolle:



⁴⁴ $\chi^2 = 9,383$, $p = 0,052$

⁴⁵ Ak. 1,2 und 3: Versuchsgruppe: 36,0 %, Kontrollgruppe: 34,4 %

⁴⁶ Versuchsgruppe: 45,9 %, Kontrollgruppe: 60,9 %

Die Unterschiede der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant⁴⁷. Der Vergleich der Antwortverteilung zwischen Mädchen und Jungen innerhalb der einzelnen Gruppen konnte nicht vorgenommen werden, da zu viele Werte der Vielfeldertafel unter der 5 %-Schwelle lagen.

Zusammenfassung und Diskussion:

Von den Schülern/Schülerinnen, die die Wolle angekreuzt haben, verknüpfen bei beiden Gruppen mehr als 50 % der Schüler/innen die Wolle mit der Eigenschaft „Wärme“⁴⁸.

Zusammenfassung der Auswertung des Vortestes:

Bei keinem der Items des Vortests war das Antwortverhalten der beiden Gruppen signifikant unterschiedlich.

Bei der geschlechtsspezifischen Betrachtung des Antwortverhaltens ergab sich nur beim Item 3, und dort auch nur bei der Kontrollgruppe, ein signifikanter Unterschied. Am Auffallendsten ist bei diesem Item, dass die Mädchen eine abstraktere Begründungsebene als die Jungen wählen. Sie argumentieren häufiger mit dem Erhaltungsgedanken, während die Jungen öfters die Reibung als Grund für die geringer werdende Höhe des Gummiballs nennen.

Die Voruntersuchung hat auch gezeigt, dass bei beiden Gruppen nahezu keine physikalischen Vorkenntnisse zu den Themenbereichen „mechanische Energie“ und „Wärmelehre“ vorhanden sind.

Diskussion:

Bezogen auf das physikalische Vorwissen bringen beide Gruppen die gleichen Voraussetzungen mit. Unterschiede im Lernerfolg liegen daher nicht im physikalischen Vorwissen der einzelnen Gruppen begründet.

⁴⁷ $\chi^2 = 0,621$, $p = 0,894$

⁴⁸ Ak. 1. und 2: Versuchsgruppe: 55,6 %, Kontrollgruppe: 54,6 %

5.3.3 Abschließende Bewertung der Vergleichbarkeit der Versuchsgruppe und der Kontrollgruppe

Zusammenfassung der Auswertung zur Vergleichbarkeit der Lehr- und Lernvoraussetzung:

Vergleich der unterrichtenden Lehrkräfte:

Die Lehrkräfte beider Gruppen werden als gleich qualifiziert angesehen.

Vergleich der beiden Schülergruppen:

Die Motivation kann bei beiden Gruppen zu Beginn der Untersuchung als gleich groß angenommen werden.

Bei den kognitiven Fähigkeiten traten bei den Gruppen keine signifikanten Unterschiede auf.

Die Gruppen wiesen bei den physikalischen Vorkenntnissen keine signifikanten Unterschiede auf. Innerhalb der beiden Gruppen war nur einmal bei der Kontrollgruppe ein geschlechtsspezifischer Unterschied erkennbar. Hier zeigte sich, dass die Schülerinnen mit dem Erhaltungsgedanken vertrauter waren als ihre Mitschüler.

Die physikalischen Voraussetzungen bezüglich der Themenbereiche "mechanische Energie" und "Wärmelehre" sind als sehr gering einzustufen.

Diskussion:

Die beiden Gruppen brachten die gleichen Lehr- und Lernvoraussetzungen mit. Unterschiede im Lernerfolg sind daher nicht auf das Gruppen-Design zurückzuführen.

5.4 Untersuchung des Lernerfolgs von Versuchsgruppe und Kontrollgruppe

Wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt, sind bei beiden Gruppen von Seiten der Schüler/innen und der Lehrer/innen die gleichen Lehr- und Lernvoraussetzungen gegeben. Unterschiede im Lernerfolg können daher nur im unterschiedlichen didaktischen Ansatz begründet liegen. Damit der Lernerfolg der Schüler/innen qualitativ und quantitativ bestimmt werden konnte, hatten alle Schüler/innen nach den Unterrichtseinheiten „Mechanische Energie“ und „Wärmelehre“ die Lernerfolgstests I bzw. II zu bearbeiten.

Die Auswertung der Lernerfolgstests erfolgte in zwei Abschnitten:

1. Bestimmung des globalen Lernerfolgs

Zur Bestimmung des globalen Lernerfolgs werden den Antwortkategorien der einzelnen Items beider Lernerfolgstests Punkte zugeordnet. Die daraus resultierende Gesamtpunktzahl gibt Aufschluss über den globalen Lernerfolg der Schüler/innen. Der globale Lernerfolg und die Lernerfolge zu den Unterrichtseinheiten „Mechanische Energie“ und „Wärmelehre“ werden im Kapitel 5.4.2 beschreiben.

2. Detaillierte Auswertung der einzelnen Items

Die detaillierte Auswertung wird im Kapitel 5.4.3 vorgestellt. Diese Auswertung gibt einen genauen Aufschluss darüber, in welchen Bereichen die Lernerfolge der beiden Gruppen differieren.

5.4.1 Vorstellung der Lernerfolgstests

Der Lernerfolgstest I wurde nach Abschluss der Unterrichtseinheit „Mechanische Energie“ durchgeführt. Der Lernerfolgstest II erfolgte nach Beendigung der Unterrichtseinheit „Wärmelehre“. Dabei wurde mit dem Lernerfolgstest II zum einen der Lernerfolg bezogen auf die „Wärmelehre“ untersucht, zum andern wurde mit ihm überprüft, inwieweit die Schüler/innen die Zusammenhänge der „mechanischen Energie“ und der „Wärmelehre“ erfasst haben. Die Items der Lernerfolgstests sind zum Teil aus der bestehenden Physik-Didaktik-Literatur entnommen, zum Teil aber auch selbst entworfen. Die Aufgaben beider Lernerfolgstest wurden so ausgewählt, dass für beide Gruppen der Anteil an Reproduktions- und Transferaufgaben gleich groß war. Da bei der Kontrollgruppen im Unterricht keine schwierigeren Aufgaben zum Energieerhaltungssatz der Mechanik besprochen wurden, wurden die dafür vorgesehenen Items des Lernerfolgstest I bei der Auswertung nicht mit herangezogen. Die Schüler/innen hatten maximal 40 Minuten Zeit, um die einzelnen Lernerfolgstests zu bearbeiten.

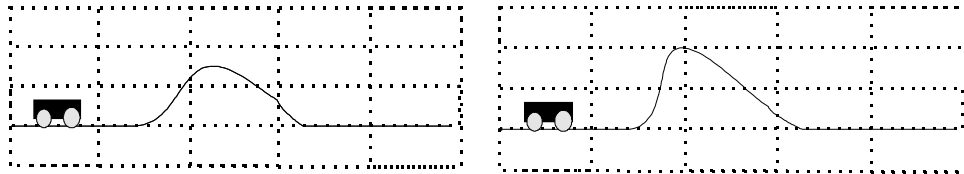
Lernerfolgstest I

Klasse: _____

Name: _____

Anmerkung: Bei allen Rechnungen ist nur der Ansatz hinzuschreiben. Ein **Ausrechnen der gesuchten Größe ist nicht notwendig!**

1. Bei den untenstehenden Zeichnungen fährt ein Wagen reibungsfrei mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 10m/s. Er ist so schnell, dass er auf jeden Fall den Berg überwinden kann.



Was gilt jeweils für die Geschwindigkeit des Wagens, wenn er den Berg überwunden hat und wieder auf der Waagrechten fährt?

- a. $v > 10\text{m/s}$
 $v = 10\text{m/s}$
 $v < 10\text{m/s}$

- b. $v > 10\text{m/s}$
 $v = 10\text{m/s}$
 $v < 10\text{m/s}$

Begründe deine Entscheidung:

Begründe deine Entscheidung:

2. Welchen Zusammenhang gibt es zwischen Energie und Arbeit?

3. Eine Kugel ($m = 100\text{g}$) rollt reibungsfrei mit der Anfangsgeschwindigkeit $v = 5\text{m/s}$ eine schiefe Ebene so weit hinauf, bis sie ruht. Wie groß ist die gesamte Abbremsarbeit W , wenn die Hangabtriebskraft $F_H = 7,2\text{N}$ beträgt?

4. Eine schwere Kiste ($G = 0,50\text{kN}$) wird mit Hilfe eines Flaschenzugs reibungsfrei hochgehoben. Dazu muß man das Seil des Flaschenzugs mit einer Kraft von $F = 50\text{N}$ auf einer Länge von $l = 4,3\text{m}$ ziehen.

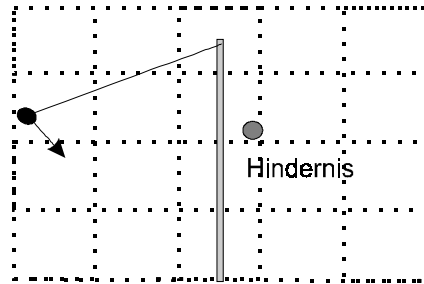
- a. Berechne die dabei verrichtete Arbeit W .
b. Wie hoch wurde die Kiste gehoben?

Aufgabe a:

Aufgabe b:

5. An einem Fadenpendel (siehe untenstehende Zeichnung) ist ein Massenstück angebracht. Lässt man das Pendel auf der linken Seite los, so beginnt es zu schwingen. Wenn der Faden auf der rechten Seite auf ein Hindernis trifft, knickt der Faden an der Stelle ein. Es bewegt sich dort nur noch der untere Teil des Fadens weiter.

a. Zeichne ein, wie weit das Massenstück auf der rechten Seite hoch kommt.



b. Begründe deine Entscheidung:

6. Was verstehst du unter dem Begriff „Energie“?

7. Was verstehst du unter dem Begriff „Arbeit“?

8. Ein Ball der Masse $m = 200\text{g}$ wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $5,2\text{m/s}$ nach oben geworfen.

Welchen Wert hat die Höhenenergie am höchsten Punkt?

9. Was sagt der Energieerhaltungssatz aus?

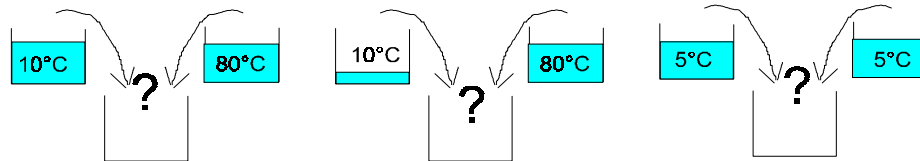
Lernerfolgstest II:

Klasse: _____

Name: _____

Anmerkung: Bis auf die Aufgabe 13 ist bei allen Rechnungen nur der Ansatz hinzuschreiben. Ein Ausrechnen der gesuchten Größe ist nicht notwendig!

10. In den unten stehenden Zeichnungen wird aus zwei verschiedenen Behältern Wasser zusammen geschüttet. Schreibe in die noch leeren Mischbehälter, welche Mischtemperatur sich einer Meinung nach ungefähr ergibt. Eine Rechnung ist nicht notwendig!



11. Ein Holzquader (200g, $c = 2,5 \text{ kJ}/(\text{kg K})$) gleitet auf einer waagrechten Fläche auf einer Länge von 20cm, dann ist er zur Ruhe gekommen. Die Reibungskraft betrug 0,03N.

a. Berechne die Temperaturänderung des Holzquaders.

b. Warum ist die gemessene Temperaturerhöhung geringer als die berechnete?

12. Was verstehst du unter dem Begriff „Wärme“?

13. Man gibt einen Körper der Temperatur 22°C in eine geeignete Kühlapparatur, die dem Körper in den ersten 10 Minuten so viel innere Energie entzogen hat, dass der Körper nur noch eine Temperatur von 2°C hat. Welche Temperatur hat der Körper nach 5 Stunden? (Es wird – sofern möglich – dem Körper pro Zeiteinheit immer die gleiche Wärme entzogen.) (Diese Aufgabe ist zu berechnen!)

14. Ein Metalllöffel und ein Plastiklöffel werden zum Umrühren beim Puddingkochen ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$) benutzt.

Werden beide Löffel so heiß, dass du sie nicht mehr berühren kannst? (Begründung)

15. Eine Rakete setzt einen Satelliten (Temperatur beim Aussetzen: $12\text{ }^{\circ}\text{C}$) im Weltraum aus. Die Umgebungstemperatur beträgt zirka 3 K . Welche Temperatur hat der Satellit nach einiger Zeit, wenn er von der Sonne gerade nicht beschienen wird?

a. Die Temperatur des Satelliten ist höher als $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die Temperatur des Satelliten beträgt $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die Temperatur des Satelliten ist geringer als $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, aber größer als 3 K .

Die Temperatur des Satelliten beträgt zirka 3 K .

b. Begründe deine Entscheidung:

16. Was verstehst du unter dem Begriff „innere Energie“?

17. In einem Styroporbehälter befinden sich $m_k = 400\text{ g}$ kaltes Wasser der Temperatur $\vartheta_k = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine kleine Bleikugel ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Nun gießt man in diesen Styroporbehälter zusätzlich $m_w = 300\text{ g}$ Wasser der Temperatur $\vartheta_w = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Mischtemperatur beträgt $\vartheta_M = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Berechne die Änderung der inneren Energie der Bleikugel.

18. Ein Spielzeugauto wird angeschoben, so dass es eine Anfangsgeschwindigkeit von $0,2\text{ m/s}$ hat. Aufgrund der Reibung kommt es nach einiger Zeit wieder zur Ruhe. Bei diesem Vorgang wurde mechanische Energie in innere Energie umgewandelt.

Warum setzt sich das Auto nicht irgendwann wieder von selbst in Bewegung? Nach dem Energieerhaltungssatz könnte sich die innere Energie ja wieder in mechanische Energie umwandeln.

19. An einem kalten Wintertag berührst du gleichzeitig die Kufen (Metall) und die Sitzfläche deines Schlittens (Holz).

a. Beschreibe, was du fühlen wirst. Bitte begründe deine Antwort auch.

b. Was ergibt sich, wenn du die Temperaturen der Kufen (Metall) und der Sitzfläche (Holz) mit einem Thermometer mißt?

- Die Temperatur der Kufen ist höher als die Temperatur der Sitzfläche.
- Die Temperatur der Kufen ist gleich der Temperatur der Sitzfläche.
- Die Temperatur der Kufen ist geringer als die Temperatur der Sitzfläche.

c. Begründe deine Entscheidung.

20. Ein heißes Gas ($m = 10 \text{ g}$, $c = 0,1 \text{ kJ / (kg K)}$) drückt den Kolben (30 g) eines Kolbenprobers (sieht aus wie eine Spritze) um $4,2 \text{ cm}$ nach oben.

Berechne, um wieviel sich die Temperatur des Gases dabei verringert hat.

21. Um die Temperatur eines Körpers zu messen hält man ein Thermometer an diesen Körper. Nach einiger Zeit kann man an diesem Thermometer die Temperatur des Körpers ablesen. Erkläre bitte genau, warum man am Thermometer nach einiger Zeit die Temperatur des Körpers ablesen kann.

5.4.2 Globaler Lernerfolg von Versuchsgruppe und Kontrollgruppe im Vergleich

5.4.2.1 Messverfahren zur Bestimmung des globalen Lernerfolgs

Um den globalen Lernerfolg der beiden Gruppen miteinander vergleichen zu können ordnet man den Antwortkategorien der einzelnen Items Punkte zu. Dabei werden nur Items berücksichtigt, die nicht der Erklärung eines Begriffs dienen und die gemeinsamen Lerninhalte beider Unterrichtskonzepte abfragen. Die aus den einzelnen Punkten resultierende Gesamtpunktzahl dient als Maß für den globalen Lernerfolg der Schüler/innen.

Im Folgenden sind die einzelnen für die Auswertung herangezogenen Items und ihre Antwortkategorien mit den zugehörigen Punkten aufgelistet:

Lernerfolgstest I.:

Item 1a:

Ein Wagen fährt über einen symmetrischen Berg (Energieerhaltung)

Kategorie 1: Die Geschwindigkeit ist gleich groß, 2 P
 a. wegen des Energieerhaltungssatzes
 b. da die Anfangs- und Endhöhe gleich ist

Kategorie 2: Die Geschwindigkeit ist gleich groß 1 P
 mit sonstiger oder fehlender Begründung

Item 1b:

Ein Wagen fährt über einen asymmetrischen Berg (Energieerhaltung)

Kategorie 1: Die Geschwindigkeit ist gleich groß, 2 P
 a. wegen des Energieerhaltungssatzes
 b. da die Anfangs- und Endhöhe gleich ist

Kategorie 2: Die Geschwindigkeit ist gleich groß 1 P
 mit sonstiger oder fehlender Begründung

Item 3:

Eine Kugel rollt eine schiefe Ebene hinauf (Zusammenhang von Arbeit und Energie)

Kategorie 1: $W = \Delta E = \frac{1}{2} mv^2$ 2 P

Item 4a:

Flaschenzug (Anwendung der Formel $W = F \cdot s$)

Kategorie 1: $W = F \cdot s$ 2 P

Item 4b:

Flaschenzug (Zusammenhang von Energie und Arbeit)

Kategorie 1: $\Delta E = G \cdot h = W = F \cdot s$ 2 P

Kategorie 2: Zuerst Berechnung der Flaschenanzahl ($n = G / (2 \cdot F)$) und anschließende Berechnung der Höhe ($h = s / (2 \cdot n)$) 1 P

Item 5:

Fadenpendel mit Hindernis (Energieerhaltung)

Kategorie 1: Das Pendel kommt auf der anderen Seite gleich hoch wegen des Energieerhaltungssatzes 2 P

Kategorie 2: Das Pendel kommt auf der anderen Seite gleich hoch mit sonstiger oder fehlender Begründung 1 P

Item 8:

Hochwerfen eines Balls (Energieumwandlung)

Kategorie 1: $\Delta E_h = \Delta E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$ 2 P

.....
Maximal zu erreichende Punktzahl bei der mechanischen Energie: 14 P
.....

Lernerfolgstest II:

Item 10:

Mischungsversuche:

Die Mischungstemperaturen bei den Aufgaben mit unterschiedlichen Anfangstemperaturen werden nur dann als richtig angenommen, wenn die von den Schülern/Schülerinnen angegebenen Temperaturen von den vom Autor berechneten Temperaturen höchstens um drei Grad abweichen.

Kategorie 1: Alle drei Mischungstemperaturen richtig 3 P

Kategorie 2: Zwei Mischungstemperaturen richtig 2 P

Kategorie 3: Eine Mischungstemperatur richtig 1 P

Item 11:

Reiben eines Klotzes auf einer Unterlage. (Erhöhung der inneren Energie durch Arbeit)

Kategorie 1: $\Delta E_i = W$, mit folgender Begründung für den Unterschied von berechneter und gemessener Temperatur: 2 P
 a. die Umgebung wurde vernachlässigt (Item 11b)
 b. der Körper gab Wärme ab. (Item 11b)

Kategorie 2: $\Delta E_i = W$, wobei für den Unterschied zwischen der berechneten und der gemessenen Temperatur eine falsche oder gar keine Erklärung gegeben wurde. 1 P

Item 13:

Abkühlen eines Körpers (0 K ist der absolute Nullpunkt)

Kategorie 1: Der Körper hat am Schluss eine Temperatur von 0 K 2 P

Item 17:

Kalte Bleikugel und warmes Wasser (Komplexe Anwendung des Energieerhaltungssatzes.)

Kategorie 1: Richtiger Ansatz 2 P

Item 18:

Ein Spielzeugauto kommt zur Ruhe (Betrachtung eines irreversiblen Prozesses)

Kategorie 1: Das Auto fährt nicht wieder von alleine los, da der Vorgang irreversibel ist 2 P

Kategorie 2: Das Auto fährt nicht wieder von alleine los, da das Auto selbst nicht die erzeugte innere Energie in mechanische Energie umwandeln kann 1 P

Item 20:

Expansion eines Gases bei gleichzeitigem Hochdrücken eines Kolbenprobers (Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie.)

Kategorie 1: Richtiger Ansatz 2 P

.....
 Maximal zu erreichende Punktzahl bei der Wärmelehre 13 P

Maximal erreichbare Gesamtpunktzahl: 27 P

5.4.2.2 Gegenüberstellung des globalen Lernerfolgs von Versuchsgruppe und Kontrollgruppe

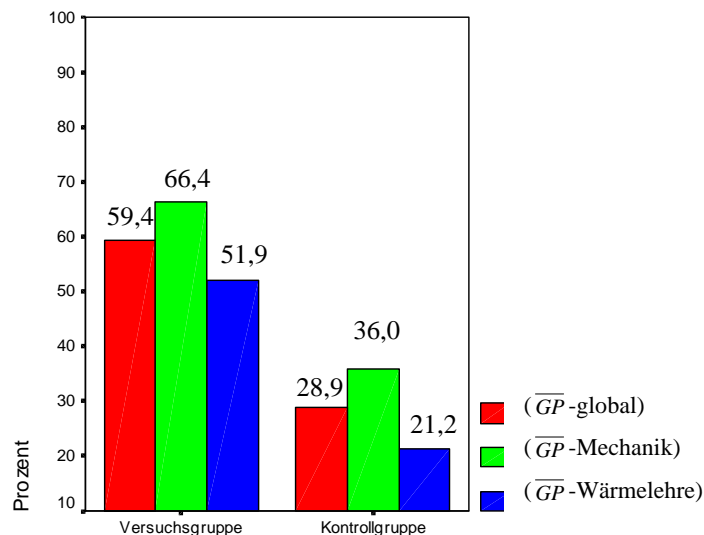
Nach dem oben beschriebenen Schema werden für jede(n) Schüler/in die erreichte Gesamtpunktzahl (GP-Wert) berechnet. Auf der Grundlage dieser GP-Werte können für die beiden Gruppen die Mittelwerte der Gesamtpunktzahlen (\overline{GP} -global), die Mittelwerte der Punktzahlen zur Unterrichtseinheit „Mechanische Energie“ (\overline{GP} -Mechanik) und die Mittelwerte zur Unterrichtseinheit „Wärmelehre“ (\overline{GP} -Wärmelehre) berechnet werden. Diese \overline{GP} -Werte sind ein Maß für den Lernerfolg beider Gruppen.

Um ein differenziertes Bild vom Lernerfolg zu erhalten, werden nun die folgenden Zusammenhänge dargestellt:

- direkter Vergleich der \overline{GP} -Werte beider Gruppen
- Abhängigkeit der \overline{GP} -Werte beider Gruppen von den unterrichtenden Lehrkräften
- Abhängigkeit der \overline{GP} -Werte beider Gruppen von den zusammengefassten IQ-Gruppen
- Abhängigkeit der \overline{GP} -Werte beider Gruppen vom Geschlecht der Schüler

Damit alle drei \overline{GP} -Werte direkt miteinander verglichen werden können, werden die \overline{GP} -Werte nicht als absolute Größen, sondern als Prozentsätze angegeben.

Vergleich der \overline{GP} Werte beider Gruppen:



Der U-Test von Mann-Whitney zeigt, dass alle drei \overline{GP} -Werte beider Gruppen hoch signifikant unterschiedlich sind⁴⁹. Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergibt, dass sich die Verteilungen bei allen drei \overline{GP} -Werten beider Gruppen signifikant unterscheiden⁵⁰.

⁴⁹ für alle drei \overline{GP} -Werte gilt: $p = 0,000$

⁵⁰ für alle drei \overline{GP} -Werte gilt: $p = 0,000$

Der globale Lernerfolg der Versuchsgruppe ist mehr als doppelt so hoch wie bei der Kontrollgruppe! Dabei ist der \overline{GP} -Wert beim Themenbereich „mechanische Energie“ 1,84-mal und beim Themenbereich „Wärmelehre“ 2,45-mal so hoch wie bei der Kontrollgruppe.

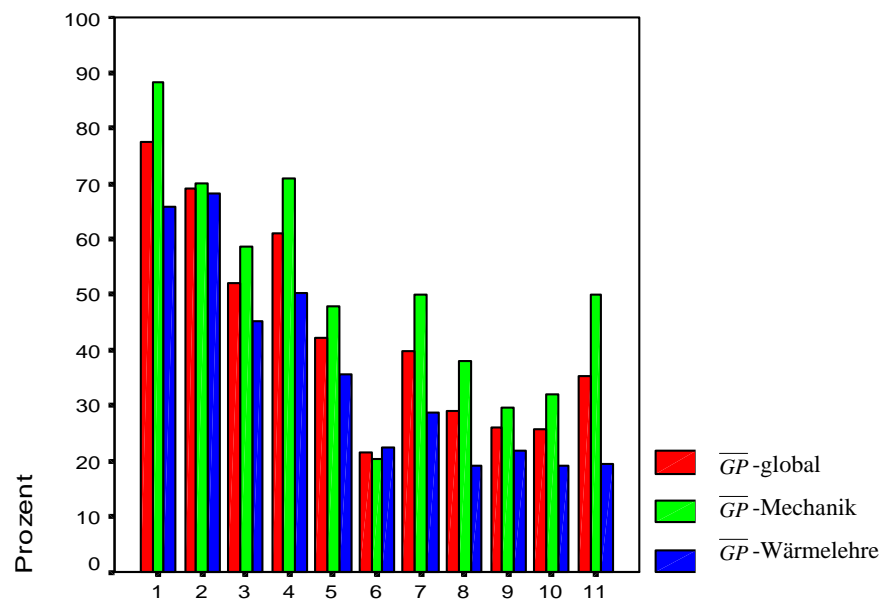
Beide Gruppen haben gemeinsam, dass der Lernerfolg beim Themenbereich „Mechanische Energie“ größer ist als beim Themenbereich „Wärmelehre“.

Die relative Standardabweichung (σ / \overline{GP}) aller drei \overline{GP} -Werte war bei der Versuchsgruppe geringer als bei der Kontrollgruppe. Daraus ist abzulesen, dass der Lernerfolg der Versuchsgruppe homogener verteilt ist als bei der Kontrollgruppe⁵¹.

Vergleich der \overline{GP} -Werte der beiden Gruppen unterschieden nach den unterrichtenden Lehrern:

Kategorie:

1. Herr B. (Versuchsgruppe)
2. Herr B. (Versuchsgruppe)
3. Herr L. (Versuchsgruppe)
4. Herr Ke. (Versuchsgruppe)
5. Herr Kr. (Versuchsgruppe)
6. Herr S. (Kontrollgruppe)
7. Frau S. (Kontrollgruppe)
8. Frau S. (Kontrollgruppe)
9. Herr Bu. (Kontrollgruppe)
10. Herr Si. (Kontrollgruppe)
11. Herr F. (Kontrollgruppe)



⁵¹ Bsp.: globaler Lernerfolg: Versuchsgruppe: $\sigma / \overline{GP} = 32,4 \%$, Kontrollgruppe: $\sigma / \overline{GP} = 52,5 \%$

Alle Schulklassen der Versuchsgruppe (Klassen 1 bis 5), haben einen höheren \overline{GP} -global-Wert als die Schulklassen der Kontrollgruppe (Klassen 6 bis 11). Der \overline{GP} -Mechanik-Wert ist bei den beiden besten Schulklassen der Kontrollgruppe etwas höher als der \overline{GP} -Mechanik-Wert bei der schlechtesten Versuchsgruppe. Beim Themenbereich „Wärmelehre“ weisen alle Schulklassen der Versuchsgruppe einen höheren Lernerfolg als die Schulklassen der Kontrollgruppe auf. Dies weist darauf hin, dass der Lernerfolg nicht auf die unterrichtenden Lehrer, sondern auf die Unterschiede in den Unterrichtskonzepten zurückzuführen ist.

Vergleich der \overline{GP} -Werte der beiden Gruppen unterteilt nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

Bei der Auswertung der Lernerfolgstests kann die IQ-Gruppen Unterteilung A, B, C, D und E nicht herangezogen werden, da sonst die Anzahl der Schüler für die einzelnen Fälle so gering ist, dass eine statistische Aussage nicht mehr möglich ist. Hier wird die zusammengefasste IQ-Klassen-Unterteilung herangezogen.

Kategorie:

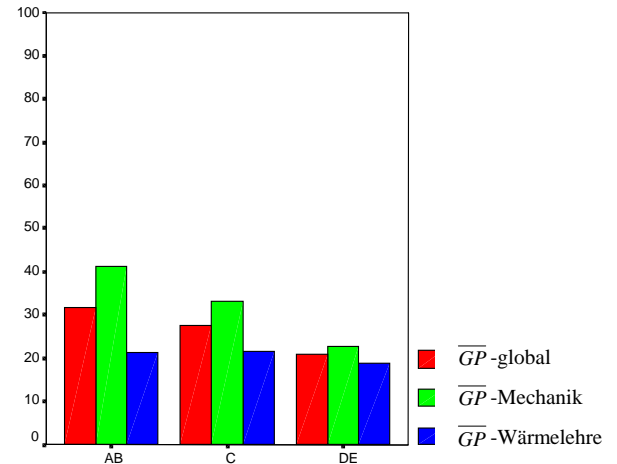
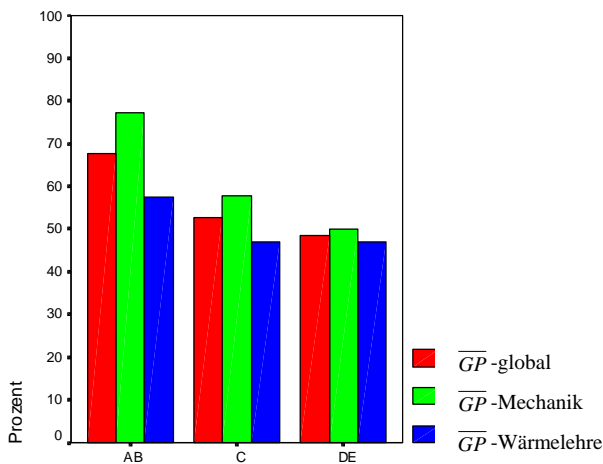
AB: IQ-Wert größer gleich 121

C: IQ-Wert zwischen 120 und 108

DE: IQ-Wert kleiner gleich 107

Versuchsgruppe:

Kontrollgruppe:



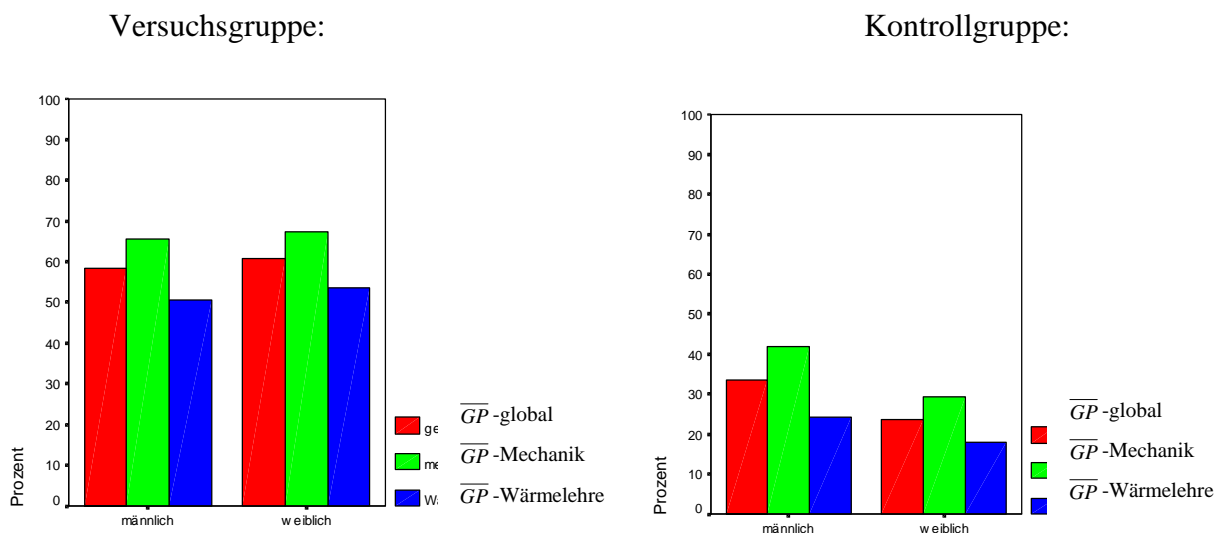
Der Kruskal-Wallis-Test zeigt, dass bei beiden Gruppen zwischen den \overline{GP} -Mechanik-Werten und den IQ-Gruppen ein signifikanter Zusammenhang besteht⁵². Das bedeutet, dass bei beiden Gruppen die Verteilung der \overline{GP} -Mechanik-Werte innerhalb der einzelnen IQ-Klassen signifikant unterschiedlich sind.

⁵² Versuchsgruppe: Mechanik: 0,01; Kontrollgruppe: Mechanik: p = 0,026

Bei der Versuchsgruppe gibt es zusätzlich noch einen signifikanten Zusammenhang zwischen den \overline{GP} -gesamt-Werten und den IQ-Gruppen. Weitere signifikante Zusammenhänge zwischen den \overline{GP} -Werten und den IQ-Gruppen tauchen bei beiden Gruppen nicht mehr auf⁵³.

Es zeigt sich also bei beiden Gruppen in etwa das gleiche Bild. Die \overline{GP} -Mechanik-Werte nehmen mit abnehmender Intelligenz signifikant ab. Dagegen sind die \overline{GP} -Wärmelehre-Werte sehr viel weniger von der Intelligenz der Schüler abhängig. Die \overline{GP} -gesamt-Werte sind bei der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe bei der Intelligenz-Klasse AB um den Faktor 2,12, bei der Intelligenz-Klasse C um den Faktor 1,90 und bei der Intelligenz-Klasse DE um den Faktor 2,33 höher. Das bedeutet, dass die unterdurchschnittlich intelligenten Schüler/innen bei dem Münchner Unterrichtskonzept eine überproportionale Förderung erfahren.

Vergleich der \overline{GP} -Werte der beiden Gruppen unterteilt nach dem Geschlecht:



Vergleicht man die \overline{GP} -Werte der Mädchen und der Jungen der Versuchsgruppe, zeigt sowohl der U-Test von Mann-Whitney⁵⁴ als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test⁵⁵, dass für keinen der drei \overline{GP} -Werte ein signifikanter Unterschied gegeben ist. Vergleicht man die \overline{GP} -Werte der Mädchen und der Jungen der Kontrollgruppe, ergibt sowohl der U-Test von Mann-Whitney⁵⁶ als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test⁵⁷, dass die \overline{GP} -global-Werte und die \overline{GP} -Mechanik-Werte signifikant unterschiedlich sind.

Beim \overline{GP} -Wert zur Wärmelehre ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Während der U-Test von Mann-Whitney⁵⁸ zeigt, dass sich die Mittelwerte der GP-Werte

⁵³ Versuchsgruppe: Wärmelehre: $p = 0,098$; Kontrollgruppe: global: $p = 0,109$, Wärmelehre: $p = 0,065$

⁵⁴ global: $p = 0,492$, Mechanik: $p = 0,766$, Wärmelehre: $p = 0,506$

⁵⁵ global: $p = 0,566$, Mechanik: $p = 1,000$, Wärmelehre: $p = 0,627$

⁵⁶ global: $p = 0,001$, Mechanik: $p = 0,012$

⁵⁷ global: $p = 0,004$, Mechanik: $p = 0,002$

⁵⁸ Wärmelehre: $p = 0,003$

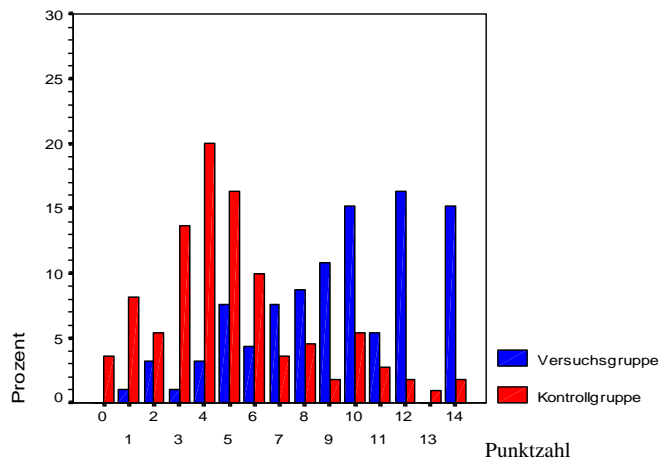
signifikant unterscheiden, ergibt der Kolmogorov-Smirnov-Test⁵⁹, dass sich die Verteilung der \overline{GP} -Werte nicht signifikant unterscheidet.

Bei der Versuchsgruppe sind die Mädchen leicht, aber nicht signifikant den Jungen überlegen. Im Gegensatz dazu sind die Mädchen der Kontrollgruppe sowohl bei der Mechanik, als auch bei der Wärmelehre signifikant schlechter als ihre Mitschüler.

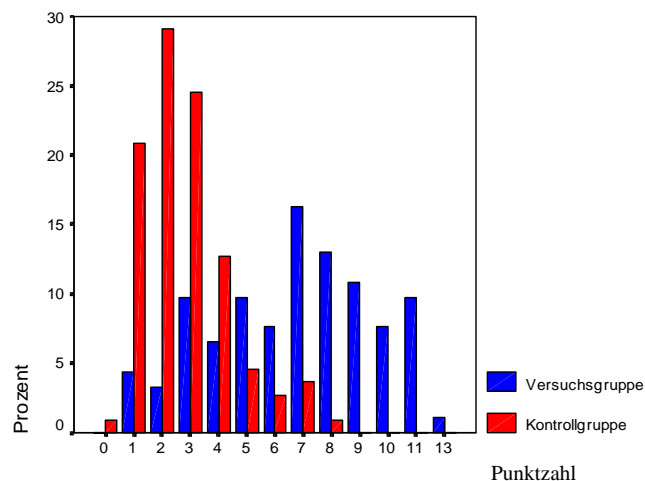
Aufteilung der GP-Werte beider Gruppen nach Lösungshäufigkeit

In den folgenden drei Grafiken sind die GP-Werte gegen die Prozentzahl der Schüler angetragen, die den entsprechenden GP-Wert erreicht haben.

GP-Werte der Mechanik (maximale Punktzahl: 14):

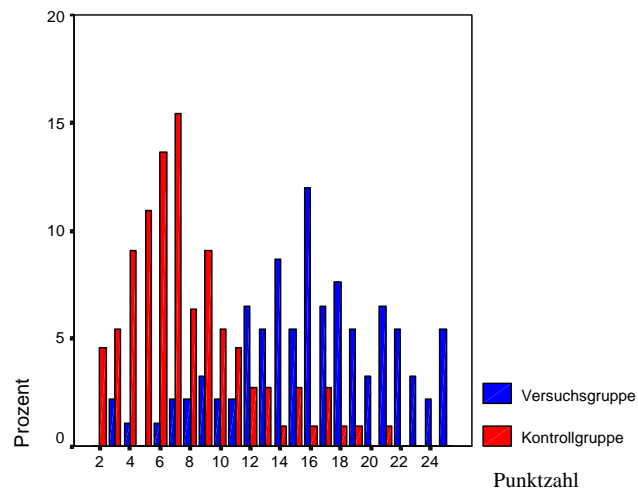


GP-Werte der Wärmelehre (maximale Punktzahl 13):



⁵⁹ Wärmelehre: p = 0,089

Gp-Werte global:



Diese drei Graphen zeigen, welcher Prozentsatz von Schülern/innen bei den Tests mehr als 70 % der Punkte erreicht hat und damit die Note zwei oder besser bekommen hätte.

Bei der Mechanik haben von der Versuchsgruppe 52,1 % und bei der Kontrollgruppe nur 11,8 % der Schüler 10 oder mehr Punkte erreicht. Die Wärmelehre haben 29,4 % der Schüler/innen von der Versuchsgruppe und 5 % der Schüler/innen von der Kontrollgruppe mit 9 oder mehr Punkten bearbeitet. Fasst man die beiden Tests zusammen, so haben von der Versuchsgruppe 31,5 % und von der Kontrollgruppe 1,8 % der Schüler/innen 19 oder mehr Punkte erreicht. Diese Schüler/innen hätten bei einer Schulaufgabe die Note zwei oder eins erhalten.

Zusammenfassung der Auswertung des globalen Lernerfolg:

Der globale Lernerfolg der Versuchsgruppe ist 2,06 mal höher als der Lernerfolg der Kontrollgruppe. Dabei treten Unterschiede in der Steigerung des Lernerfolgs bezogen auf die einzelnen Unterrichtseinheiten auf. So ist der Lernerfolg der Versuchsgruppe bei der Unterrichtseinheit „Wärmelehre“ 2,45 mal höher und bei der Unterrichtseinheit „mechanische Energie“ 1,84 mal höher als bei der Kontrollgruppe.

Unterteilt man die Gruppen nach den unterrichtenden Lehrkräften, so ist der globale Lernerfolg der schlechtesten Gruppe, die nach dem Münchner Unterrichtskonzept unterrichtet wurde, immer noch größer als der Lernerfolg der besten Gruppe, die nach dem konventionellen Unterrichtskonzept unterrichtet wurde. Dies weist darauf hin, dass der Unterschied im Lernerfolg beider Gruppen nicht auf die unterrichtenden Lehrkräfte zurückgeführt werden kann.

Bei der Betrachtung des Zusammenhangs von Intelligenz und Lernerfolg zeigen beide Gruppen das gleiche Bild. In der Mechanik nimmt der Lernerfolg mit zunehmender Intelligenz signifikant zu. Der Lernerfolg, der sich bei dem Kapitel

„Wärmelehre“ einstellt, zeigt zwar die gleiche Tendenz, der Effekt ist aber deutlich geringer ausgeprägt. Bei der Versuchsgruppe haben die überdurchschnittlich intelligenten Schüler/innen einen 2,12, die durchschnittlich intelligenten Schüler/innen einen 1,90 und die unterdurchschnittlich intelligenten Schüler/innen einen 2,33 mal größeren Lernerfolg als die Schüler/innen der Kontrollgruppe.

Vergleicht man den globalen Lernerfolg von Jungen und Mädchen, stellt man fest, dass bei der Versuchsgruppe die Schülerinnen etwas besser als die Mitschüler sind. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. Bei der Kontrollgruppe kehrt sich dieser Effekt um. Die Schülerinnen weisen einen signifikant geringeren Lernerfolg als ihre Mitschüler auf.

Würde man die Punktzahlen in Noten umrechnen, so hätten bei der „Mechanischen Energie“ etwas mehr als die Hälfte der Schüler/innen der Versuchsgruppe und bei der Kontrollgruppe etwas mehr als ein Zehntel der Schüler/innen eine 2 oder eine 1. Bei der „Wärmelehre“ ist der Unterschied noch stärker ausgeprägt. Hier hätten zirka ein Drittel der Schüler/innen von der Versuchsgruppe und kein(e) Schüler/in der Kontrollgruppe die Note 2 oder 1.

Diskussion:

Wie im Kapitel 5.2 gezeigt, sind die beiden Gruppen hinsichtlich der Schüler- und Lehrervoraussetzungen gleichwertig. Der signifikant höhere globale Lernerfolg der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe liegt daher im unterschiedlichen didaktischen Vorgehen begründet.

Dass der Lernerfolg der Versuchsgruppe bei der „Wärmelehre“ stärker zugenommen hat als bei der „mechanischen Energie“ könnte daran liegen, dass die meisten Schüler der Kontrollgruppe keinen Zusammenhang zwischen der Mechanik und der Wärmelehre erkennen konnten

Im Allgemeinen nimmt der Lernerfolg mit zunehmender Intelligenz zu. So ist es nicht verwunderlich, dass beim Kapitel „Mechanische Energie“ bei beiden Gruppen der Lernerfolg mit zunehmendem Intelligenzquotienten signifikant ansteigt. Erstaunlich ist dagegen, dass dieser Effekt beim Kapitel „Wärmelehre“ deutlich geringer ausgeprägt ist. Grund dafür könnte sein, dass die Aufgaben in diesem Kapitel anschaulicher sind und somit keine so hohe Abstraktionsebene erfordern. Der höchste relative Zuwachs des Lernerfolgs der unterdurchschnittlich intelligenten Schüler/innen der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe zeigt auf, dass diese Schüler/innen beim Münchner Unterrichtskonzept eine überdurchschnittliche Förderung erfahren.

Im Vergleich zur Kontrollgruppe haben sehr viel mehr Schüler/innen der Versuchsgruppe die beiden Themenbereiche „Mechanische Energie“ und „Wärmelehre“ gut oder sogar sehr gut verstanden. Besonders stark ist der unterschiedliche Lernerfolg der Mädchen beider Gruppen. Es zeigt sich, dass das

Münchener Unterrichtskonzept die Mädchen deutlich besser fördert als das traditionelle Unterrichtskonzept. Die bessere Förderung der Mädchen könnte mit der starken Einbindung der Biologie beim Münchener Unterrichtskonzepts erklärt werden. Wie bereits erwähnt, ist das Interesse und damit die Motivation der Mädchen bei biologischen Fragestellungen deutlich höher als bei technischen Fragestellungen. Genauen Aufschluss darüber, in welchen Bereichen sich die Leistung der Mädchen verbessert haben, ist bei der detaillierten Untersuchung des Lernerfolgs möglich.

5.4.3 Detaillierte Untersuchung des Lernerfolgs

Der Vergleich des globalen Lernerfolgs beider Gruppen hat gezeigt, dass das Münchener Unterrichtskonzept im Vergleich zum konventionellen Unterrichtskonzept zu einer Verdoppelung des Lernerfolgs geführt hat. Dieses Ergebnis hinsichtlich des Lernerfolgs deckt jedoch nicht auf, wo die eigentlichen Stärken und Schwächen des Münchener Unterrichtskonzepts liegen. Dazu ist eine Analyse der einzelnen Items der Lernerfolgstests I und II notwendig.

Ein wesentlicher Aspekt sind die geschlechtsspezifischen Unterschiede beim Lernerfolg der Mädchen und Jungen beider Gruppen. Während bei der Versuchsgruppe Mädchen und Jungen fast gleich gut abschneiden, sind die Mädchen der Kontrollgruppe signifikant schlechter als ihre Mitschüler. Um diesen Effekt interpretieren zu können ist eine detaillierte, geschlechtsspezifische Untersuchung der Schülerantworten notwendig. Daher wurde bei allen Items das Antwortverhalten auch geschlechtsspezifisch ausgewertet. Dies geschah auch dann, wenn die Unterschiede im Antwortverhalten von Jungen und Mädchen nicht signifikant unterschiedlich waren.

Die Abhängigkeit des Lernerfolgs von der IQ-Gruppe wird nur dann genauer untersucht, wenn signifikante Unterschiede zwischen beiden Gruppen auftreten. Im Anhang sind die Zusammenhänge zwischen Lernerfolg und IQ-Gruppe für jedes Item angegeben (siehe Anhang 4 und 5).

Weiterhin lässt die genaue Betrachtung der Bearbeitung der einzelnen Items durch die Schüler/innen auch einen Vergleich mit bisher durchgeführten Untersuchungen zu.

Um didaktisch relevante Zusammenhänge besser darstellen zu können, werden die Items der Lernerfolgstests I und II zu folgenden Themenbereichen zusammengefasst:

Mechanische Energie und Energieerhaltungssatz der Mechanik
Item 1, 5, 6, 8 und 9 des Lernerfolgstests I

Arbeit

Item 3, 4a und 7 des Lernerfolgstests I

Zusammenhang von mechanischer Energie und Arbeit

Item 2, 3 und 4b des Lernerfolgstests I

Nullter Hauptsatz der Wärmelehre und Temperatur

Item 13, 19b, 19c und 21 des Lernerfolgstests II

innere Energie und erster Hauptsatz der Wärmelehre;

Zusammenhang der Themenbereiche „mechanische Energie,
Arbeit“ und „innere Energie“

Items 10, 11a, 11b, 16, 17 und 20 des Lernerfolgstests

Wärme

Item 12 des Lernerfolgstests II

Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre

Item 18 des Lernerfolgstests II

Wärmeleitung und Wärmestrahlung

Item 14,15a und 15b des Lernerfolgstests II

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Themenbereiche vorgestellt. Am Ende jedes Themenbereichs erfolgt eine Zusammenfassung und Diskussion der jeweiligen Versuchsergebnisse.

5.4.3.1 Items zur mechanischen Energie und zum Energieerhaltungssatz der Mechanik

Die Items 1, 5, 6, 8 und 9 des Lernerfolgstests I können dem Themenbereich „mechanische Energie und Energieerhaltungssatz der Mechanik“ zugeordnet werden. Anhand dieser Items wurde untersucht, welche Energievorstellung die Schüler/innen haben, was sie unter dem Energieerhaltungssatz verstehen und inwieweit sie den Energieerhaltungssatz anwenden können.

Item 6:

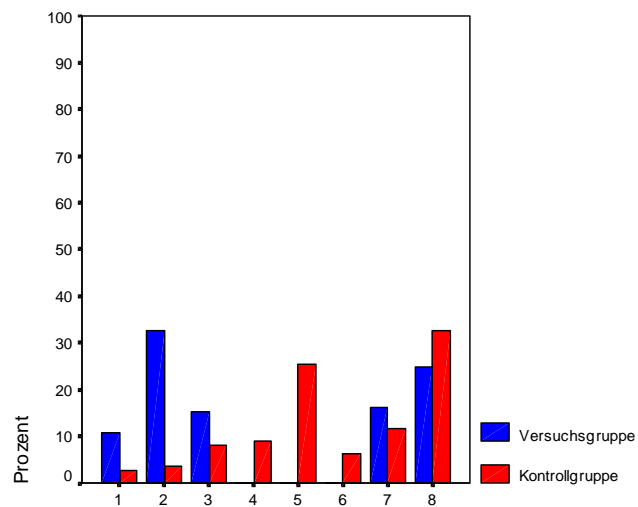
Was verstehst du unter dem Begriff „Energie“?

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, welches Bild die Schüler/innen von der Energie haben.

Antwortkategorien:

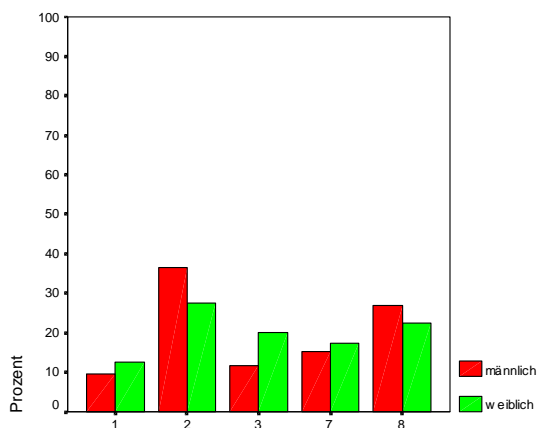
1. Nennung des Energieerhaltungssatzes
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers vorhanden und /oder Energie hat ein Körper, wenn er eine bestimmte Höhe hat
3. Nur Nennung von Energiearten
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit
5. Energie ist gespeicherte Arbeit
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten
7. Energie ist Kraft
8. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

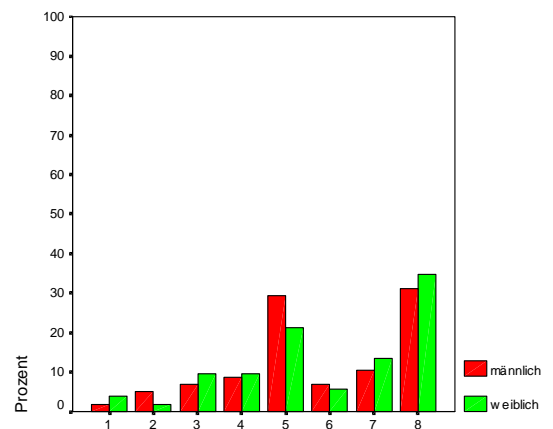


Vergleich des Antwortverhaltens differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten beider Gruppen sind nach der Vielfeldertafel signifikant⁶⁰. Leider konnte der Zusammenhang zwischen den Antwortkategorien und den zusammengefassten IQ-Gruppen nicht ermittelt werden, da bei der Vielfeldertafel zu viele Kategorien unter 5 % lagen und damit der χ^2 -Test nicht durchgeführt werden konnte.

Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der einzelnen Gruppen, ergibt sich nach der Vielfeldertafel bei beiden Unterrichtskonzepten keine Signifikanz⁶¹.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

58,7 % der Schüler/innen verbinden mit der Energie den Energieerhaltungssatz, verschiedene Energiearten oder anschauliche Beispiele wie die Bewegung und/oder die Höhe eines Körpers (Ak. 1, 2 und 3). Ein erschreckend hoher Anteil von 16,3% der Schülern/innen versteht unter der Energie die Kraft. Zum Vergleich: Zu Beginn des Schuljahres hatten 5,4 % der Schüler/innen Energie und Kraft als Synonyme gesetzt (Vortest Item 1, Ak. 6). Unter diesen Schülern/Schülerinnen ist nur ein Schüler, der bereits im Vortest Energie und Kraft gleichgesetzt hat (siehe Kapitel 4.2.2). 41,3 % der Schüler/innen haben nach Beendigung der Unterrichtseinheit „Mechanische Energie“ eine falsche oder keine Vorstellung von der Energie (Ak. 7 und 8).

Während die Jungen häufiger als Mädchen konkrete Beispiele mit der Energie verknüpfen⁶², begeben sich mehr Mädchen auf eine abstraktere Ebene, indem sie mit der Energie den Energieerhaltungssatz oder Energiearten verbinden⁶³.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

41,0 % der Schüler/innen verbinden mit der Energie den Arbeitsbegriff (Ak. 4, 5 und 6). Dabei beschreibt fast ein Drittel der Schüler/innen die Energie so, wie sie in der Schule definiert wurde, nämlich als „Fähigkeit Arbeit zu verrichten“ oder als „gespeicherte Arbeit“⁶⁴. 11,8 % der Schüler/innen gehen so weit Energie und Kraft als Synonyme anzusehen (Ak. 7). Zum Vergleich: 0,9 % der Schüler/innen haben zu Beginn des Schuljahres Energie und Kraft gleichgesetzt (Vortest Item 1, Ak. 6). Der einzige Schüler, der im Vortest Energie und Kraft gleichgesetzt hat tut dies auch nach der Behandlung der Unterrichtseinheit „Mechanische Energie“.

Auch hier verknüpfen Jungen häufiger als Mädchen Energie mit konkreten Beispielen⁶⁵. Die Mädchen begeben sich dafür häufiger auf eine abstraktere Ebene,

⁶⁰ $\chi^2 = 71,711$, $p = 0,000$

⁶¹ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 2,042$, $p = 0,728$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 2,630$, $p = 0,917$

⁶² Ak. 2: Mädchen 27,5 %, Jungen 36,5 %

⁶³ Ak. 1 und 3: Mädchen 32,5 %, Jungen 21,1 %

⁶⁴ Ak. 5 und 6: 31, 9%

⁶⁵ Ak. 2: Mädchen 1,9 %, Jungen 5,2 %

indem sie mit der Energie den Energieerhaltungssatz oder Energiearten verbinden (Ak. 1 und 3: Mädchen 13,4 %, Jungen 8,6 %).

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Wie von den unterschiedlichen didaktischen Ansätzen her nicht anders zu erwarten, nennen die Schüler/innen der Versuchsgruppe die Antwortkategorien 1, 2 und 3 und die Schüler/innen der Kontrollgruppe die Antwortkategorien 4, 5 und 6 am häufigsten⁶⁶. Bei beiden Gruppen hat sich der Anteil der Schüler/innen, die Energie und Kraft als Synonyme ansehen, gegenüber dem Vortest erhöht. Das ist nicht weiter verwunderlich, denn erst im Laufe des Schuljahres wurde erstmals im Physikunterricht der Zusammenhang zwischen Kraft, Arbeit und Energie besprochen.

Beide Gruppen haben gemeinsam, dass bei den Schülern/Schülerinnen, die die Energie über die Energieerhaltung, über Beispiele oder Energiearten beschreiben, ein geschlechtsspezifisches Antwortverhalten auftritt. Dabei bevorzugen die Mädchen eine Erklärung mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes oder unterschiedlicher Energiearten, die Jungen nennen häufiger konkrete Beispiele. Das bedeutet, dass die Mädchen eine höhere Abstraktionsebene zur Erklärung des Energiebegriffs benutzen als ihre Mitschüler.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Die Ergebnisse können direkt mit den Untersuchungsergebnissen von Duit (1984) verglichen werden.

Definiere den Begriff Energie:	aktuelle Untersuchung		Untersuchung von Duit (1984)	
	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe	deutsche Schüler/innen	philippinische Schüler/innen
benutzter Begriff: Arbeit	0 %	41,0 %	42 %	60 %
benutzter Begriff: Kraft	16,3 %	11,8 %	14 %	6 %
Energieformen genannt	15,2 %	8,2 %	12 %	3 %
Energieerhaltung	10,9 %	2,7 %	11 %	0 %

Der deutlichste Unterschied ergibt sich bei der Nennung des Begriffs „Arbeit“ als Definition der Energie. Die Werte der Kontrollgruppe stimmen mit den von Duit für die deutschen Schüler/innen ermittelten Werte gut überein. Bei der Benutzung des Kraftbegriffs und der Nennung von Energieformen stimmen die von Duit für die deutschen Schüler/innen ermittelten Werte tendenziell mit den beiden Gruppen der vorliegenden Untersuchung überein. Bei der Definition der Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes stimmen die Werte der deutschen Schüler/innen von Duit

⁶⁶ Ak. 1,2 und 3: Versuchsgruppe: 58,7 %, Kontrollgruppe: 14,5 %;
Ak. 4,5 und 6: Versuchsgruppe: 0 %, Kontrollgruppe: 41,0 %

gut mit der Versuchsgruppe überein. Die Kontrollgruppe stimmt hier am ehesten mit den Werten der philippinischen Schüler/innen überein.

Item 9:

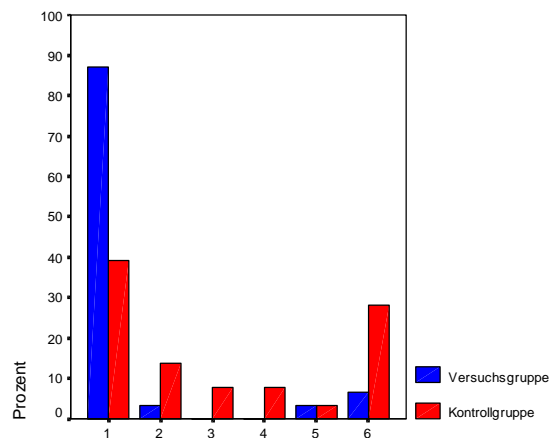
Was sagt der Energieerhaltungssatz aus?

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, welche Vorstellung die Schüler/innen von der Erhaltung der Energie in einem abgeschlossenen mechanischen System haben.

Antwortkategorien:

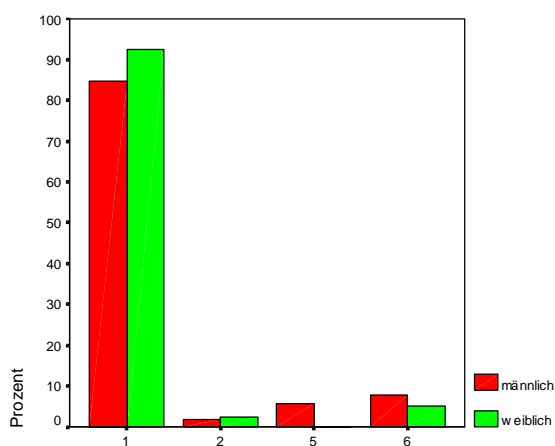
1. Die Gesamtenergie ist konstant
2. Die Energie ist konstant
3. Die Gesamtenergie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
4. Die Energie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
5. Energieumwandlungen sind möglich
6. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

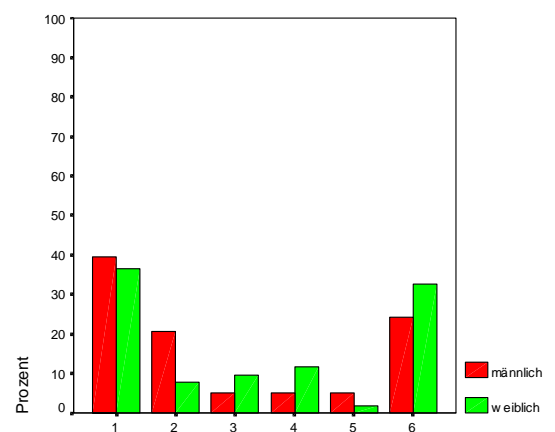


Vergleich des Antwortverhaltens differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel signifikant⁶⁷.

Leider kann der Zusammenhang zwischen den oberen Antwortkategorien und den zusammengefassten IQ-Gruppen nicht ermittelt werden, da bei der Vielfeldertafel zu viele Kategorien unter 5 % lagen und damit der χ^2 -Test nicht durchführbar ist.

Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich bei beiden Gruppen keine Signifikanz⁶⁸.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Fast alle Schüler/innen sehen in der Konstanz der Gesamtenergie die Kernaussage des Energieerhaltungssatzes⁶⁹. Darunter sind alle 6 Schüler/innen, die beim Vortest (Item 2) die konstante Hüpfhöhe des Balls mit der Energie oder dem Schwung begründet hatten. Etwas mehr Mädchen als Jungen konnten den Energieerhaltungssatz richtig beschreiben (Ak. 1).

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

38,2 % der Schüler/innen sehen in der Konstanz der Gesamtenergie die Kernaussage des Energieerhaltungssatzes. 5 der 15 Schüler/innen, die beim Item 2 des Vortests die Konstanz der Hüpfhöhe des Balls mit dem Schwung oder der Energie begründet hatten, beschreiben nun auch den Energieerhaltungssatz richtig. Mehr als ein Viertel der Schüler/innen geben keine oder eine so diffuse Antwort, dass sie in keine Antwortkategorie passt⁷⁰. Mehr Jungen als Mädchen haben den Energieerhaltungssatz ganz oder wenigstens teilweise richtig wiedergeben können⁷¹. Dafür orientieren sich die Mädchen bei der Erklärung der Energieerhaltung häufiger als die Jungen am Arbeitsbegriff⁷².

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Während bei der Versuchsgruppe fast alle Schüler/innen die Konstanz der Gesamtenergie als Kernaussage ansehen, sind es bei der Kontrollgruppe nur 38,2 % der Schüler/innen. Fast die Hälfte aller Schüler/innen der Kontrollgruppe hat eine völlig falsche Vorstellung vom Energieerhaltungssatz⁷³.

Während bei der Versuchsgruppe die Mädchen den Energieerhaltungssatz häufiger als ihre Mitschüler mit der Erhaltungsvorstellung verknüpfen, verbinden bei der Kontrollgruppe mehr Mädchen als Jungen die Energieerhaltung mit dem Arbeitsbegriff. Daraus ergibt sich, dass die Mädchen stärker als die Jungen daran

⁶⁷ $\chi^2 = 56,131$, $p = 0,000$

⁶⁸ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 2,753$, $p = 0,431$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 6,864$, $p = 0,231$

⁶⁹ Ak. 1: 88 %

⁷⁰ Ak. 6: 28,2 %

⁷¹ Ak. 1 und 2: Mädchen: 44,2 %, Jungen: 60,4 %

⁷² Ak. 3 und 4: Mädchen: 21,1 %, Jungen: 10,4 %

⁷³ Ak. 3,4,5 und 6: 47,3 %

gebunden sind, wie man im Kapitel „Mechanische Energie“ den Energieerhaltungssatz einführt.

Item 5a:

Der Faden eines Pendelkörpers prallt gegen ein Hindernis. Wie hoch kommt der Pendelkörper?

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen den Energieerhaltungssatz anwenden können.

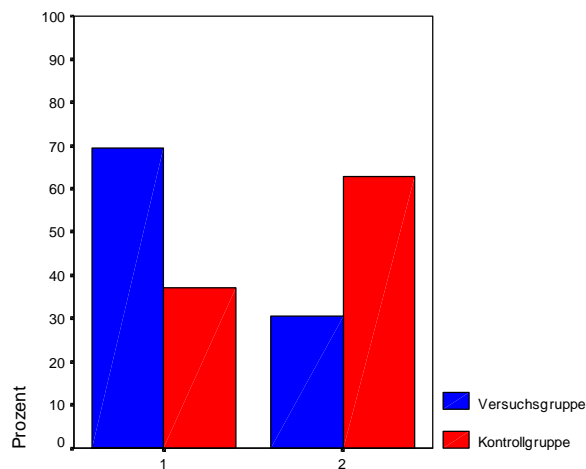
Erster Teil der Auswertung:

Bei diesem Teil der Auswertung wurde betrachtet, wie hoch der Pendelkörper nach Aussage der Schüler/innen kommt. Die Begründung für die Entscheidung wurde noch nicht betrachtet.

Antwortkategorien:

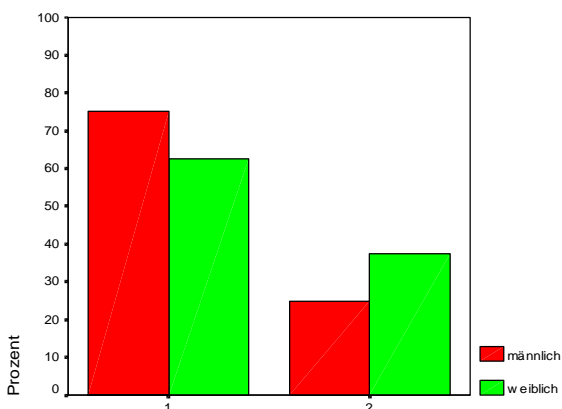
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch
2. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

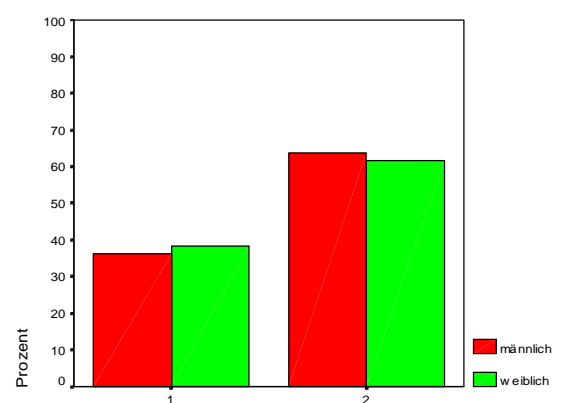


Vergleich des Antwortverhaltens differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Der U-Test von Mann-Whitney und der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben eine Signifikanz im Antwortverhalten der beiden Gruppen⁷⁴. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz⁷⁵.

Der Kruskal-Wallis-Test ergibt, dass sich die zu erreichenden Punktzahlen (richtige Höhe 1 Punkt, falsche Höhe 0 Punkte) für beide Gruppen im Bezug auf die IQ-Klassen nicht signifikant unterschieden⁷⁶.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

69,6 % der Schüler/innen haben diese Aufgabe richtig gelöst. Dabei bearbeiten etwas mehr Jungen als Mädchen die Aufgabe richtig⁷⁷.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

37,3 % der Schüler/innen haben diese Aufgabe richtig. Jungen und Mädchen bearbeiten die Aufgabe in etwa gleich oft richtig⁷⁸.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Verglichen mit den Antworten der Kontrollgruppe haben fast doppelt so viele Schüler/innen der Versuchsgruppe diese Aufgabe richtig. Im Gegensatz zum Gesamttrend schneiden hier die Mädchen der Versuchsgruppe schlechter ab als ihre Mitschüler. Dagegen sind die Mädchen und die Jungen der Kontrollgruppe etwa gleich gut.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Dieses Item kann mit dem Test von Duit (siehe Kapitel 3.1.1/Seite 18) verglichen werden, bei dem eine Kugel ein asymmetrischen Berg herunter rollt, einen kleinen Hügel überwindet und anschließend wieder nach oben rollt. Laut Duit hatten 33 % der deutschen Schüler/innen die richtige Endhöhe angegeben. Dieser Prozentsatz stimmt recht gut mit den 37,9 % der Schüler/innen der Kontrollgruppe überein, die die richtige Endhöhe der Pendelmasse angegeben haben. Bei der Versuchsgruppe waren es 69,6 %. Die Übereinstimmung der Werte von Duit und den Werten der Kontrollgruppe darf nicht weiter verwundern, denn bei beiden untersuchten Schülergruppen wurde nach dem Kraft-Arbeit-Energiekonzept unterrichtet.

⁷⁴ $p = 0,000$ bei beiden Tests

⁷⁵ Versuchsgruppe: $p = 0,872$, Kontrollgruppe: $p = 1,000$

⁷⁶ Versuchsgruppe: $p = 0,139$, Kontrollgruppe: $p = 0,476$

⁷⁷ Jungen: 75,0 %, Mädchen 62,5 %

⁷⁸ Jungen: 36,2 %, Mädchen: 38,5 %

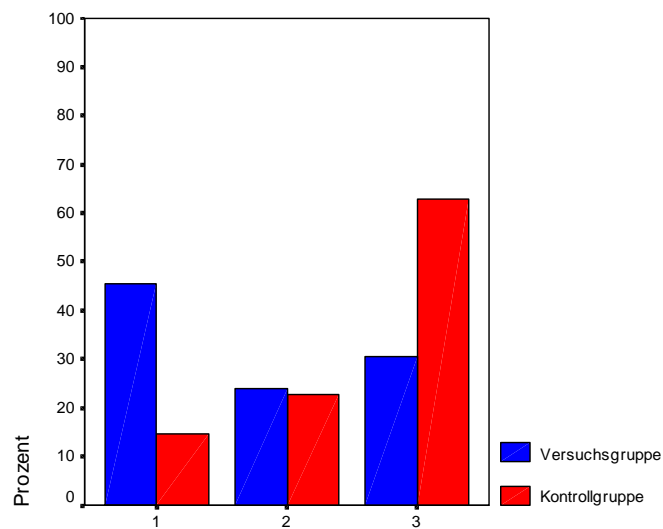
Zweiter Teil der Auswertung:

Neben der richtigen Höhe wurde nun auch berücksichtigt ob die zugehörige Begründung richtig war.

Antwortkategorien:

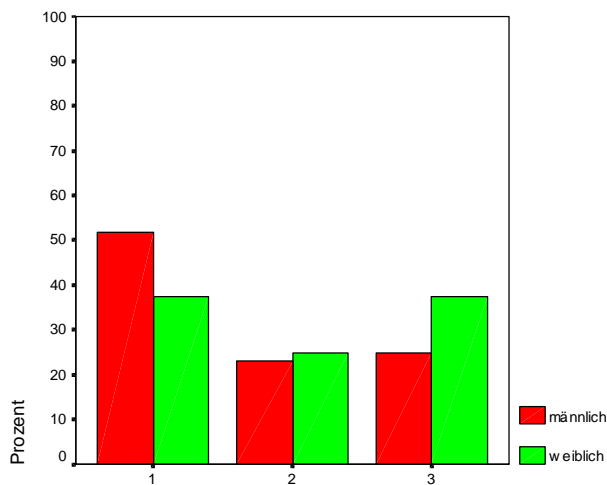
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch wegen des Energieerhaltungssatzes
2. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch mit sonstiger oder keiner Begründung
3. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

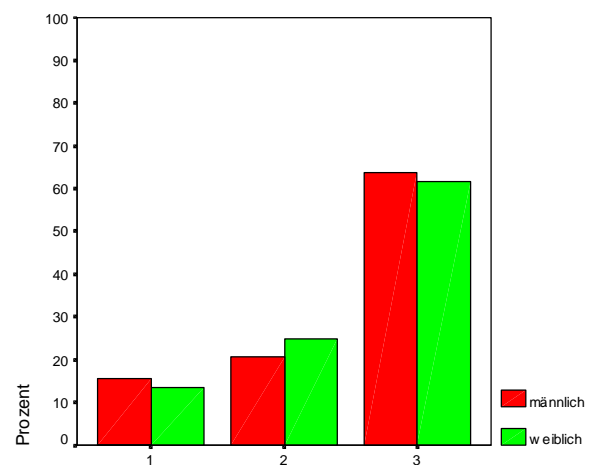


Vergleich des Antwortverhaltens differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



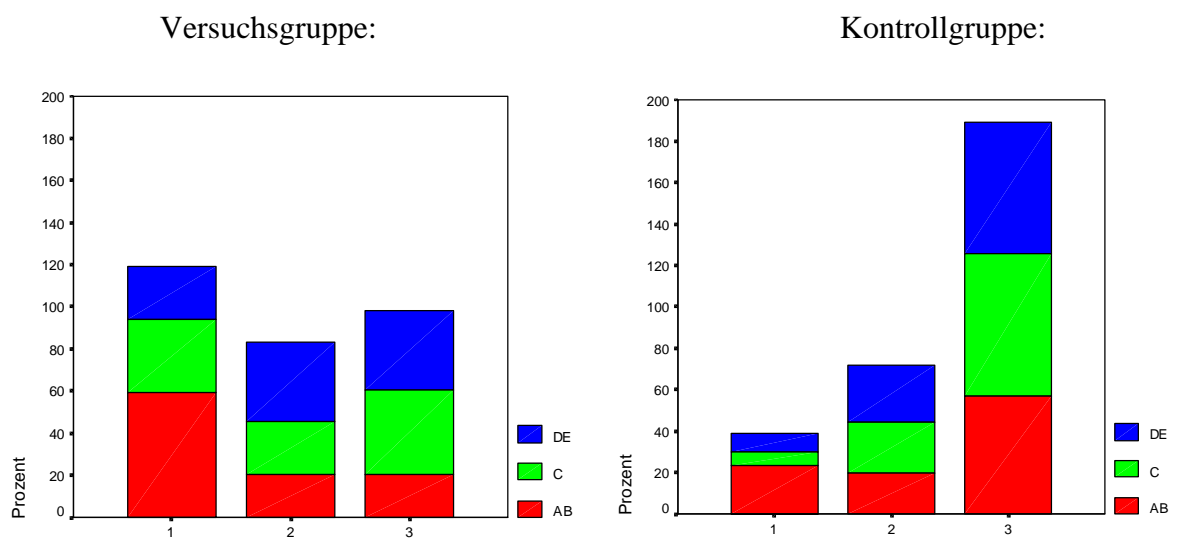
Kontrollgruppe:



Der U-Test von Mann-Whitney und der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben für die Antwortverteilung der beiden Gruppen Signifikanz⁷⁹. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz⁸⁰.

Der Kruskal-Wallis-Test ergibt, dass bei der Versuchsgruppe ein signifikanter Zusammenhang zwischen den zu erreichenden Punktzahlen (siehe Bestimmung des \overline{GP} Werts) und den zusammengesetzten IQ-Klassen besteht⁸¹. Bei der Kontrollgruppe ist der Zusammenhang nicht signifikant⁸².

Antwortverhalten differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:



Alle Schüler/innen der IQ-Klassen AB, C oder DE ergeben zusammen jeweils 100%.

Die folgenden Grafiken geben die genaue Betrachtung der Begründungen wieder:

Antwortkategorien für die Begründung:

1. Wegen Energieerhaltungssatz
2. Das kürzere Seil hat mehr Energie (Schwung)
3. Da nur das untere Stück des Seils schwingen kann
4. Sonstige oder keine Begründung

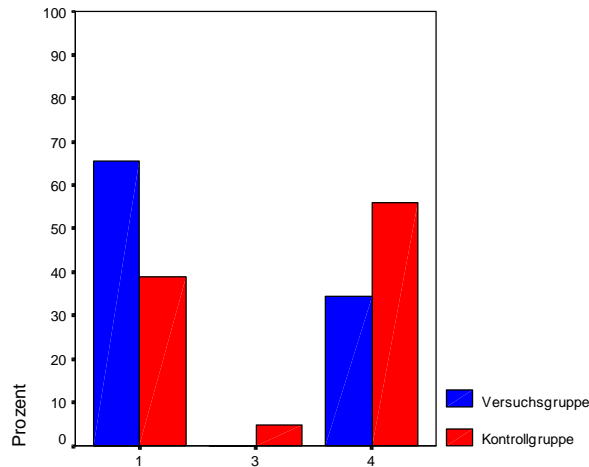
⁷⁹ $p = 0,000$ bei beiden Tests

⁸⁰ Versuchsgruppe: $p = 0,735$, Kontrollgruppe: $p = 1,000$

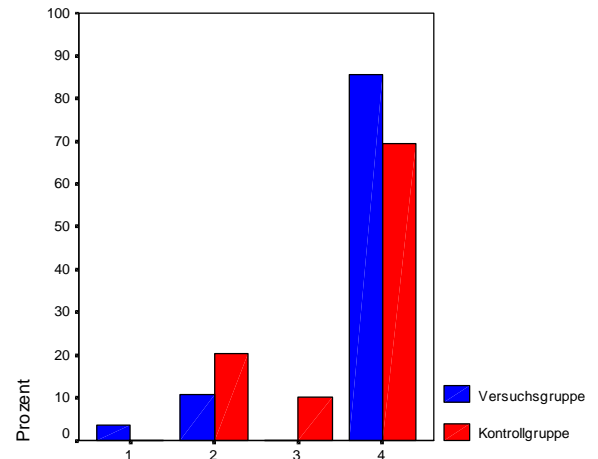
⁸¹ $p = 0,041$

⁸² $p = 0,249$

Schülerantworten bei Angabe der richtigen Höhe:



Schülerantworten bei Angabe der falschen Höhe:



Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

45,7 % der Schüler/innen können die Aufgabe mit der richtigen Begründung lösen. Das ist etwa die Hälfte aller Schüler/innen, die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergegeben hatten⁸³. Es geben 65,7 % der Schüler/innen, die die Aufgabe 5a richtig beantwortet hatten, auch die richtige Begründung.

Während 59,1 % der intelligentesten Schüler/innen die Aufgabe samt richtiger Begründung gelöst haben, sind es bei den weniger intelligenten Schülern/Schülerinnen 25 %. Fast alle Schüler/innen, die die Aufgabe falsch beantwortet hatten, konnten keine oder keine physikalisch sinnvoll einzuordnende Antwort geben. Im Vergleich zum Item 5a ist hier der Trend, dass die Mädchen etwas schlechter abschneiden als die Jungen, noch deutlicher ausgeprägt⁸⁴.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Nur 14,5 % der Schüler/innen können die Aufgabe samt Begründung richtig lösen. Das sind zirka ein Viertel aller Schüler/innen, die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergegeben haben⁸⁵. 23,5 % der intelligentesten Schüler/innen haben die Aufgabe richtig gelöst, bei den durchschnittlich und weniger intelligenten Schüler/innen lösten jeweils weniger als 10 % die Aufgabe richtig⁸⁶. Auch hier schneiden die Mädchen etwas schlechter ab als die Jungen⁸⁷.

⁸³ Lernerfolgstest I, Item 9; Ak. 1 und 2: 90,2 %

⁸⁴ Ak. 1: Jungen: 51,9 %, Mädchen: 37,5 %

⁸⁵ Lernerfolgstests I, Item 9; Ak. 1 und 2: 52,7 %

⁸⁶ C: 6,9 %, DE: 9,1 %

⁸⁷ Ak. 1: Jungen: 15,5 %, Mädchen: 13,5 %

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Im Vergleich zur Kontrollgruppe lösen mehr als dreimal soviel Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgabe mit der richtigen Begründung. Bei beiden Gruppen schneiden die Mädchen schlechter ab als die Jungen, wobei der Unterschied bei der Versuchsgruppe etwas deutlicher ist als bei der Kontrollgruppe.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Auch dieser Teil des Items kann mit dem Test von Duit (siehe Kapitel 3.1.1/Seite 18) verglichen werden, bei dem eine Kugel einen asymmetrischen Berg herunter rollt, einen kleinen Hügel überwindet und anschließend wieder nach oben rollt. Laut Duit hatten 15 % der deutschen Schüler/innen nicht nur die richtige Endhöhe angegeben, sondern zur Begründung auch den Energieerhaltungssatz herangezogen. Zum Vergleich: 14,5 % der Schüler/innen von der Kontrollgruppe und 45,7 % der Schüler von der Versuchsgruppe gaben nicht nur die richtige Endhöhe der Pendelmasse an, sondern begründeten dies mit dem Energieerhaltungssatz. Genau so wie beim Item 5a. stimmen die Werte von Duit gut mit den Werten der Kontrollgruppe gut überein.

Item 1 a und b:

Ein Fahrzeug fährt über einen symmetrischen bzw. asymmetrischen Berg.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen den Energieerhaltungssatz anwenden können, ohne dass dazu ein mathematischer Ansatz benötigt wird. Die unterschiedliche Form der Berge sollte Aufschluss darüber geben, inwieweit Symmetrieeigenschaften der Versuchsanordnung die Wahl der Geschwindigkeit beeinflussen.

Erster Teil der Auswertung:

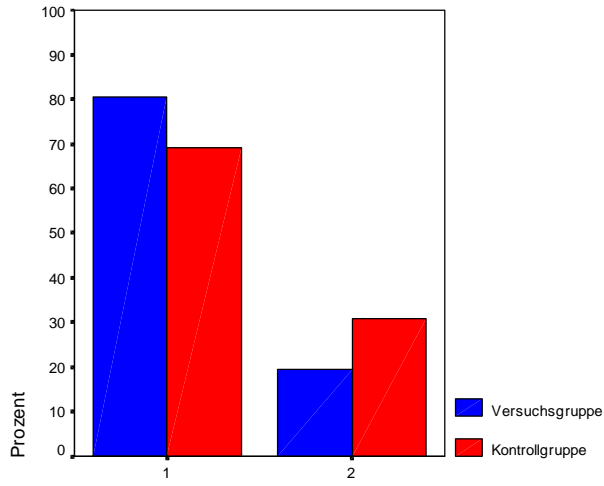
In dem ersten Teil wird nur die von den Schülern/Schülerinnen angegebene Geschwindigkeit des Autos nach dem Berg untersucht. Die Begründung für die Entscheidung wird nicht betrachtet.

Antwortkategorien:

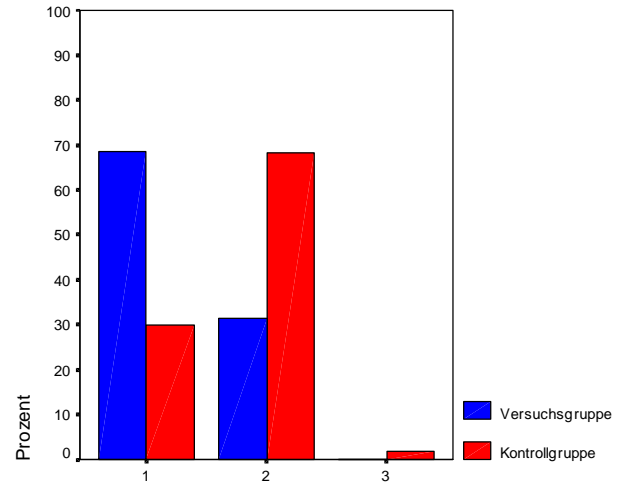
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit
3. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

symmetrischer Berg:

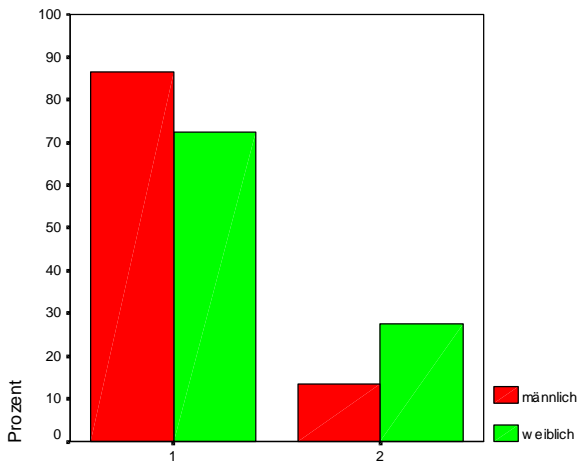


asymmetrischer Berg:

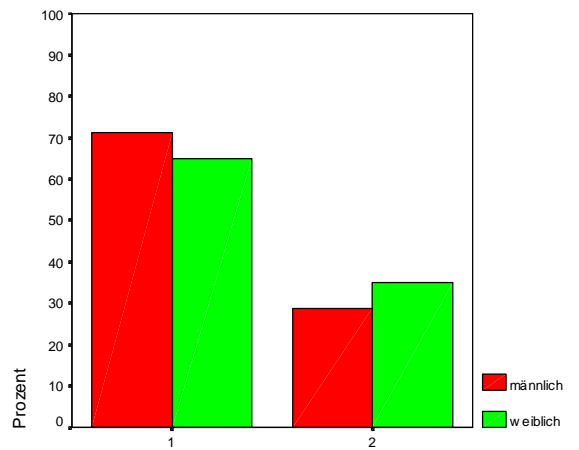


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

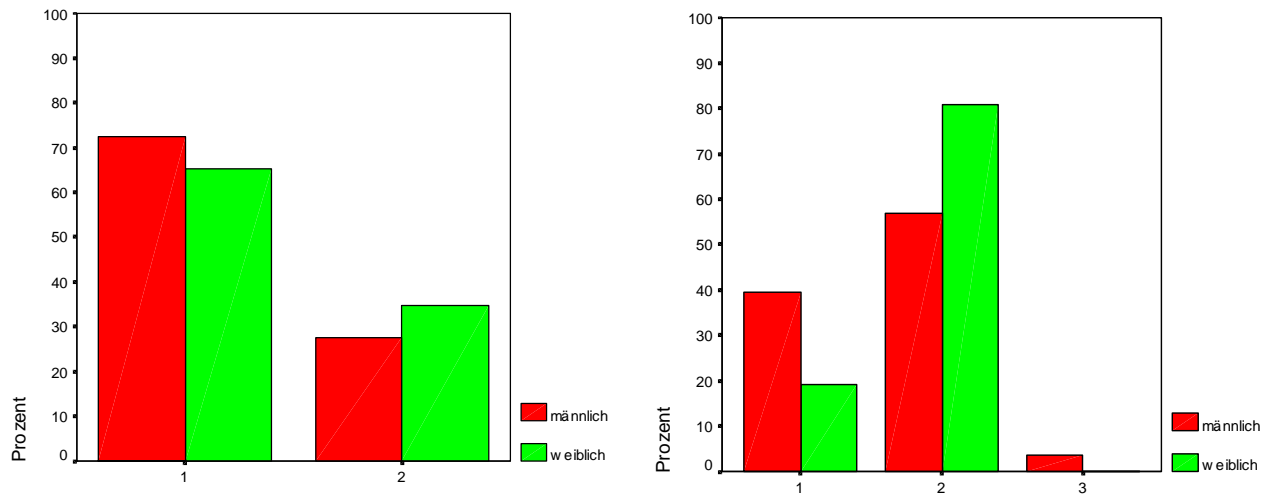
symmetrischer Berg:



asymmetrischer Berg:



Kontrollgruppe:



Zum symmetrischen Berg (Item 1a):

Sowohl der U-Test von Mann-Whitney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass bei den beiden Gruppen keine signifikanten Unterschiede vorliegen⁸⁸. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach dem U-Test von Mann-Whitney und dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz⁸⁹.

Zum asymmetrischen Berg (Item 1b):

Der U-Test von Mann-Whitney und der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigen, dass sich das Antwortverhalten der beiden Gruppen signifikant unterscheidet⁹⁰. Vergleicht man die Qualität der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt der U-Test von Mann-Whitney für die Versuchsgruppe keine Signifikanz⁹¹ und für die Kontrollgruppe Signifikanz⁹². Die Anzahl der richtigen Lösungen von Mädchen und Jungen unterscheiden sich bei der Kontrollgruppe also signifikant. Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt, dass bezogen auf die Antwortverteilung bei beiden Gruppen keine Signifikanz vorliegt⁹³.

⁸⁸ U-Test von Mann-Whitney: $p = 0,067$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,539$

⁸⁹ Versuchsgruppe: Mann-Whitney: $p = 0,094$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,764$;

Kontrollgruppe: Mann-Whitney: $p = 0,428$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,999$

⁹⁰ bei beiden Tests: $p = 0,000$

⁹¹ $p = 0,531$

⁹² $p = 0,020$

⁹³ Versuchsgruppe: $p = 1,000$, Kontrollgruppe: $p = 0,203$

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Die Form des Berges beeinflusst das Antwortverhalten der Schüler/innen. So geben beim symmetrischen Berg mehr Schüler/innen die richtige Antwort als beim asymmetrischen⁹⁴. Bei beiden Aufgaben geben etwas mehr Jungen als Mädchen die richtige Antwort, die Unterschiede sind jedoch nicht signifikant.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Auch hier beeinflusst die Form des Berges das Antwortverhalten der Schüler/innen. Die Aufgabe mit dem symmetrischen Berg haben im Vergleich zu der mit dem asymmetrischen Berg mehr als doppelt so viele Schüler/innen gelöst⁹⁵. Beim asymmetrischen Berg unterscheidet sich das Antwortverhalten von Jungen und Mädchen signifikant. Etwa doppelt so viele Jungen wie Mädchen beantworten diese Aufgabe richtig.

Zusammenfassung und Diskussion:

Beim symmetrischen Berg weist das Antwortverhalten beider Gruppen keinen signifikanten Unterschied auf. Im Gegensatz dazu unterscheiden sich Versuchsgruppe und Kontrollgruppe beim asymmetrischen Berg signifikant. Hier haben die Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgabe mehr als doppelt so häufig richtig als die Schüler/innen der Kontrollgruppe⁹⁶. Dabei ist anzumerken, dass die Prozentzahlen der richtigen Antworten zum asymmetrischen Berg bei beiden Versuchsgruppen recht gut mit den Prozentzahlen der richtigen Antworten bei der Pendelaufgabe (Item 5a) übereinstimmen⁹⁷.

Bei beiden Gruppen ist die Tendenz zu erkennen, dass mehr Jungen als Mädchen die Aufgaben richtig beantworten. Ein signifikanter Unterschied ergibt sich aber nur bei der Kontrollgruppe beim asymmetrischen Berg.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Dieses Item stimmt in Teilen mit einem Test von Duit, der im Kapitel 3.1.1 (Seite 19) vorgestellt wurde, überein. Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse von Duit den hier gewonnenen Ergebnissen gegenüber.

⁹⁴ symmetrischer Berg: 80,4 %, asymmetrischer Berg: 69,1 %

⁹⁵ symmetrischer Berg: 69,1 %, asymmetrischer Berg: 30,0 %

⁹⁶ Versuchsgruppe : 68,5 %, Kontrollgruppe: 30,0 %

⁹⁷ Versuchsgruppe: Item 1b:68,5 % ↔ Item 5a: 69,6 %;
Kontrollgruppe: Item 1b: 30,0 % ↔ Item 5a: 37,3 %

	Aufgabe	Schüler/innen der Versuchsgruppe	Schüler/innen der Kontrollgruppe	deutsche Schüler/innen bei der Untersuchung von Duit
Vorhersage der richtigen Geschwindigkeit	symmetrischer Berg	80,4 %	69,1 %	75 %
Vorhersage der richtigen Geschwindigkeit	asymmetrischer Berg	68,5 %	30,0 %	35 %

Beim symmetrischen Berg stimmen die Werte aller drei Gruppen relativ gut miteinander überein. Auffallend ist der Unterschied beim asymmetrischen Berg. Hier sind nur noch der von Duit gewonnene Wert und der Wert der Kontrollgruppe annähernd gleich groß.

Zweiter Teil der Auswertung:

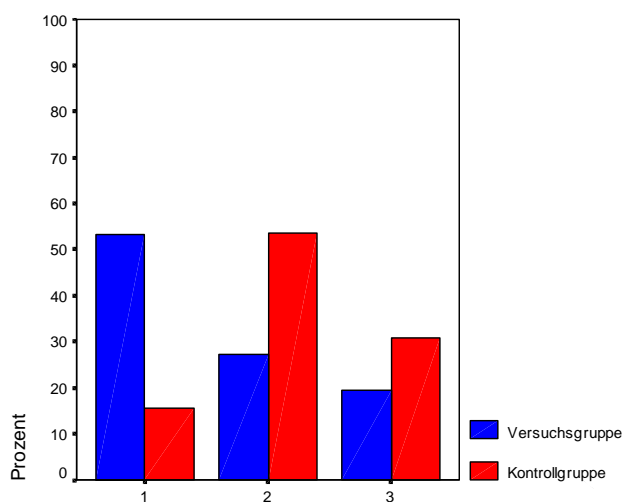
Neben der Angabe der richtigen Geschwindigkeit nach dem Berg wurde auch berücksichtigt, ob die Begründung richtig war.

Antwortkategorien:

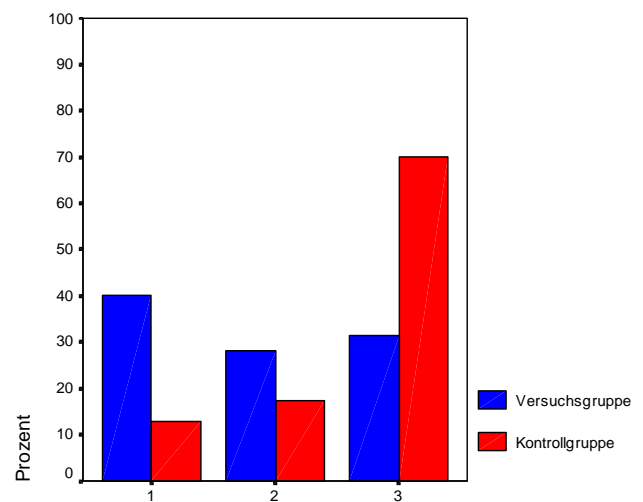
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder „das Auto ist nachher wieder gleich hoch“.
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung
3. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

symmetrischer Berg:



asymmetrischer Berg:

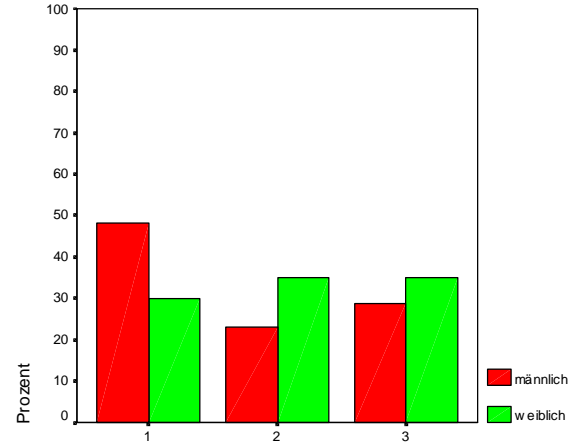
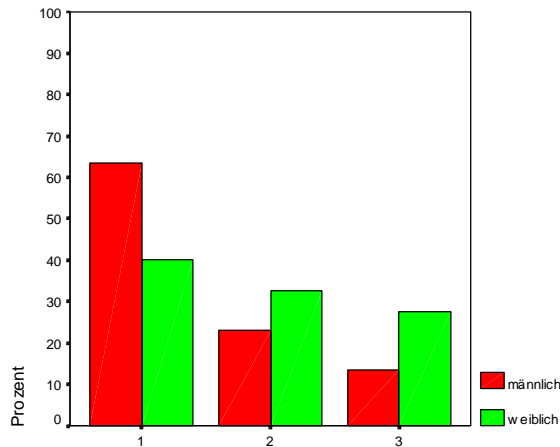


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

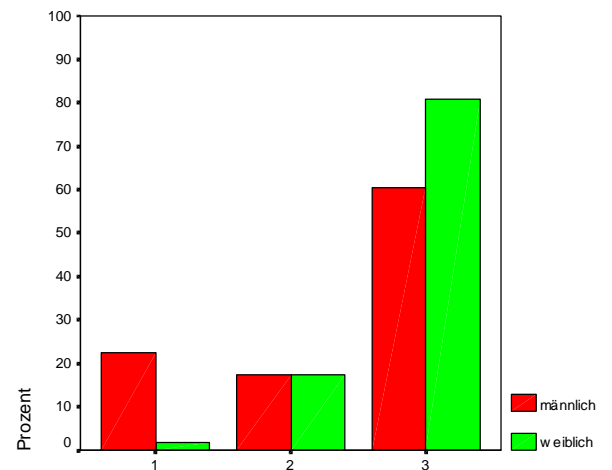
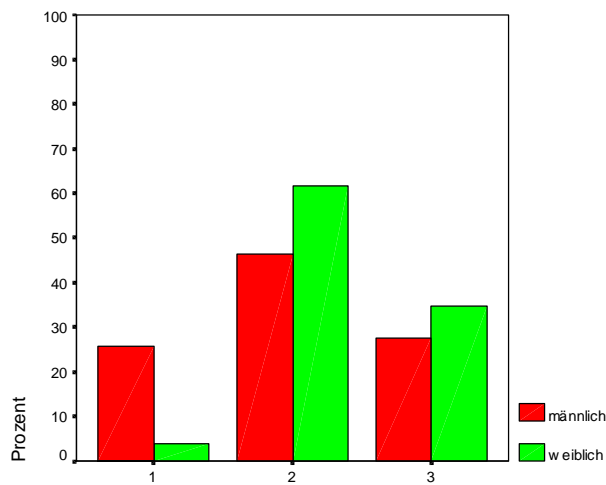
symmetrischer Berg:

asymmetrischer Berg:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Zum symmetrischen Berg (Item 1a):

Sowohl der U-Test von Mann-Whitney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass zwischen den beiden Gruppen signifikante Unterschiede vorliegen⁹⁸. Der U-Test von Mann und Whitney zeigt, dass bei beiden Gruppen die Jungen signifikant besser waren als die Mädchen⁹⁹. Dabei weist die Verteilung der Antworten differenziert nach Mädchen und Jungen nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz auf¹⁰⁰.

⁹⁸ bei beiden Tests. $p = 0,000$

⁹⁹ Versuchsgruppe: 0,022, Kontrollgruppe: 0,034

¹⁰⁰ Versuchsgruppe: $p = 0,166$, Kontrollgruppe: $p = 0,140$

Zum asymmetrischen Berg (Item 1b):

Sowohl der U-Test von Mann-Whitney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass zwischen den beiden Gruppen signifikante Unterschiede vorliegen¹⁰¹. Der U-Test von Mann und Withney belegt, dass bei der Kontrollgruppe die Jungen signifikant besser waren als die Mädchen. Bei der Versuchsgruppe ist dies nicht der Fall¹⁰². Die Antwortverteilung differenziert nach dem Geschlecht weist, wie der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigt, keine Signifikanz auf¹⁰³.

Die folgenden Grafiken geben das genaue Antwortverhalten an.

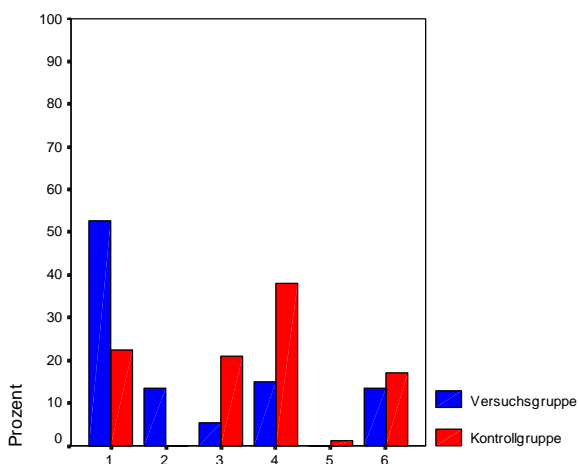
Antwortkategorien für die Begründung:

1. Wegen Energieerhaltungssatz
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn
5. Wegen der Hangabtriebskraft
6. Sonstige oder keine Begründung

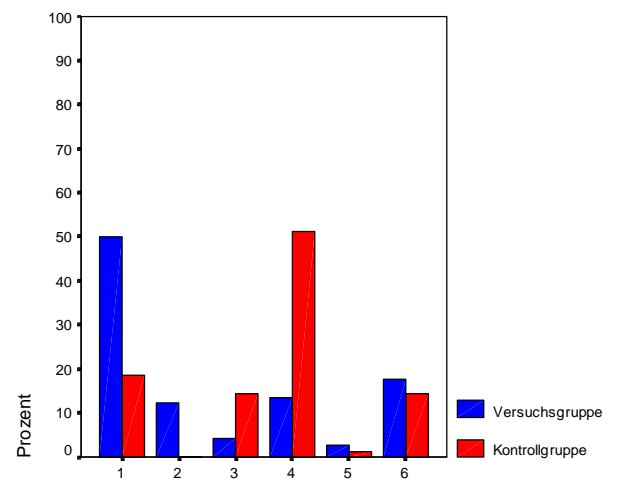
Betrachtung der Schülerbegründungen, die die richtige Geschwindigkeit gewählt haben:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

symmetrischer Berg:



asymmetrischer Berg:



¹⁰¹ bei beiden Tests. $p = 0,000$

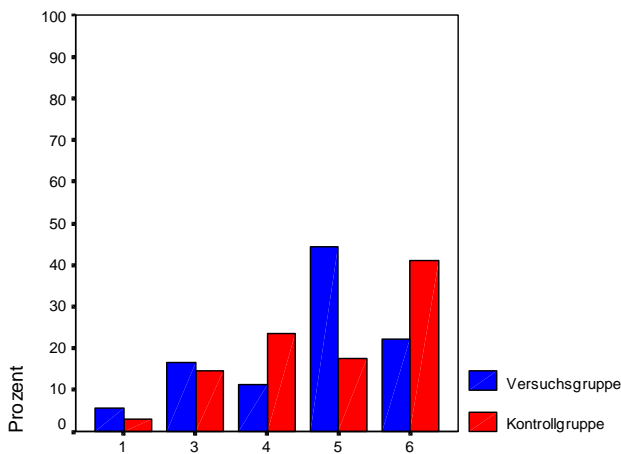
¹⁰² Versuchsgruppe: $p = 0,161$, Kontrollgruppe: $p = 0,007$

¹⁰³ Versuchsgruppe: $p = 0,451$, Kontrollgruppe: $p = 0,200$

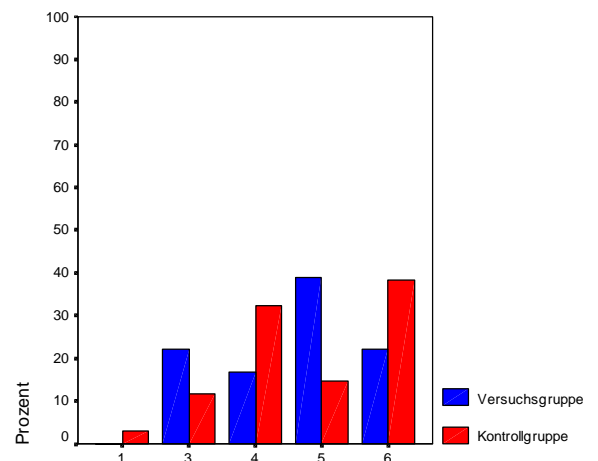
Betrachtung der Schülerbegründungen, die die falsche Geschwindigkeit gewählt haben:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

symmetrischer Berg:



asymmetrischer Berg:



Eine Unterscheidung nach dem Geschlecht ist hier nicht sinnvoll, da bei dieser starken Differenzierung keine statistisch gesicherte Aussage mehr möglich ist.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten Versuchsgruppe:

Beim symmetrischen Berg geben mehr Schüler/innen als beim asymmetrischen Berg neben der richtigen Geschwindigkeit auch die richtige Begründung an¹⁰⁴. Es sind jeweils ca. 60% der Schüler/innen, die die richtige Geschwindigkeit angeben¹⁰⁵. Zum Vergleich: Beim Pendelversuch geben 65,7 % der Schüler/innen, die die richtige Höhe gewählt hatten, auch die richtige Begründung an.

Die Jungen geben bei beiden Bergen ca. 1,6 mal so häufig die richtige Begründung wie die Mädchen. Der Unterschied ist jedoch nur beim symmetrischen Berg auf dem 5 %- Niveau signifikant.

Die meisten Schüler/innen, die sich für eine falsche Geschwindigkeit entscheiden, geben als Grund für ihre Entscheidung die Hangabtriebskraft an¹⁰⁶. Das zeigt, dass diese Schüler/innen den in der 8. Klasse eingeführten Kraftbegriff nicht vollständig verstanden haben.

¹⁰⁴ Ak. 1 und 2.:symmetrischen Berg: 53,3 %, asymmetrischen Berg: 40, 2 %

¹⁰⁵ Item 1a: Ak. 1: symmetrischer Berg: 62,3 %; asymmetrischer Berg: 58,7 %

¹⁰⁶ Ak. 5: symmetrischen Berg: 44,4 %, asymmetrischen Berg: 38,9 %

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Beim symmetrischen Berg geben 15,7 % der Schüler/innen sowohl die richtige Geschwindigkeit, als auch die richtige Begründung an. Beim asymmetrischen Berg sind es 12,7 %. Dabei geben beim symmetrischen Berg 22,4 % der Schüler/innen, die die richtige Geschwindigkeit angegeben hatten, auch die richtige Begründung an. Beim asymmetrischen Berg sind es 42,3 %. Von den Schülern/Schülerinnen, die die falsche Geschwindigkeit gewählt haben, geben fast 40 % keine oder keine kategorisierbare Antwort¹⁰⁷. Etwa ein Viertel der Schüler/innen, die eine falsche Geschwindigkeit angeben, nennen als Begründung die Steilheit oder die Länge der Bahn¹⁰⁸.

Das Antwortverhalten von Jungen und Mädchen ist signifikant unterschiedlich. Fast kein Mädchen hat diese Aufgabe mit der zugehörigen Begründung richtig gelöst!¹⁰⁹

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe geben bei beiden Aufgaben mehr als dreimal so häufig sowohl die richtige Geschwindigkeit als auch die richtige Begründung an¹¹⁰.

Bei beiden Gruppen schneiden die Mädchen schlechter ab als die Jungen. Der geschlechtsspezifische Leistungsunterschied ist bei der Versuchsgruppe wesentlich geringer ausgeprägt als bei der Kontrollgruppe. Hier hat fast kein Mädchen die Aufgabe richtig gelöst.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Auch dieses Item stimmt in Teilen mit einem Test von Duit, der im Kapitel 3.1.1 (Seite 19) vorgestellt wurde, überein.

Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse von Duit den hier gewonnenen Ergebnissen gegenüber.

¹⁰⁷ Ak. 6: symmetrischer Berg: 41,2 %, asymmetrischer Berg: 38,2 %

¹⁰⁸ Ak. 4: symmetrischer Berg: 32,4 %, asymmetrischer Berg: 23,5 %

¹⁰⁹ Ak. 1 und 2: symmetrischer Berg: Mädchen: 3,8 %, Jungen: 25,9 %;
asymmetrischer Berg: Mädchen 1,9 % , Jungen: 22,4 %

¹¹⁰ symmetrischer Berg: 3,4 mal so oft; asymmetrischer Berg: 3,2 mal so oft

	Aufgabe	Schüler/innen der Versuchsgruppe	Schüler/innen der Kontrollgruppe	deutsche Schüler/innen bei der Untersuchung von Duit
Vorhersage der richtigen Geschwindigkeit mit dem Energieerhaltungssatz begründet	symmetrischer Berg	53,3 %	15,5 %	22 %
Vorhersage der richtigen Geschwindigkeit	asymmetrischer Berg	40,2 %	12,7 %	17 %

Die Werte, die Duit gewonnen hat, sind etwas höher als die Werte der Kontrollgruppe und sehr viel geringer als die Werte der Versuchsgruppe.

Item 8:

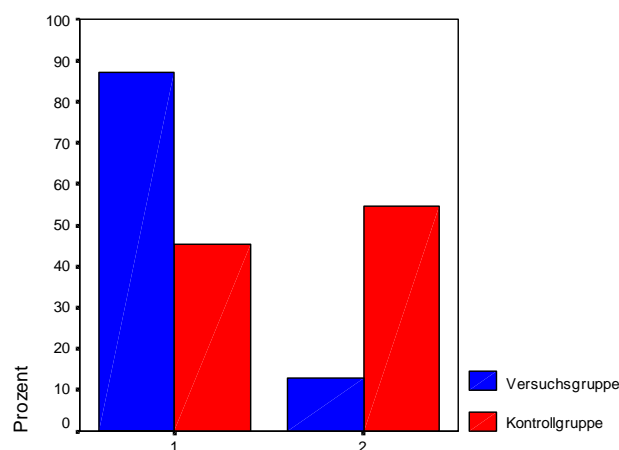
Ein Ball der Masse $m = 200 \text{ g}$ wird mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $5,2 \text{ m/s}$ nach oben geworfen. Welchen Wert hat die Höhenenergie am höchsten Punkt?

Intention: Mit diesem Item wird untersucht, inwieweit die Schüler/innen Energieumwandlungen beherrschen.

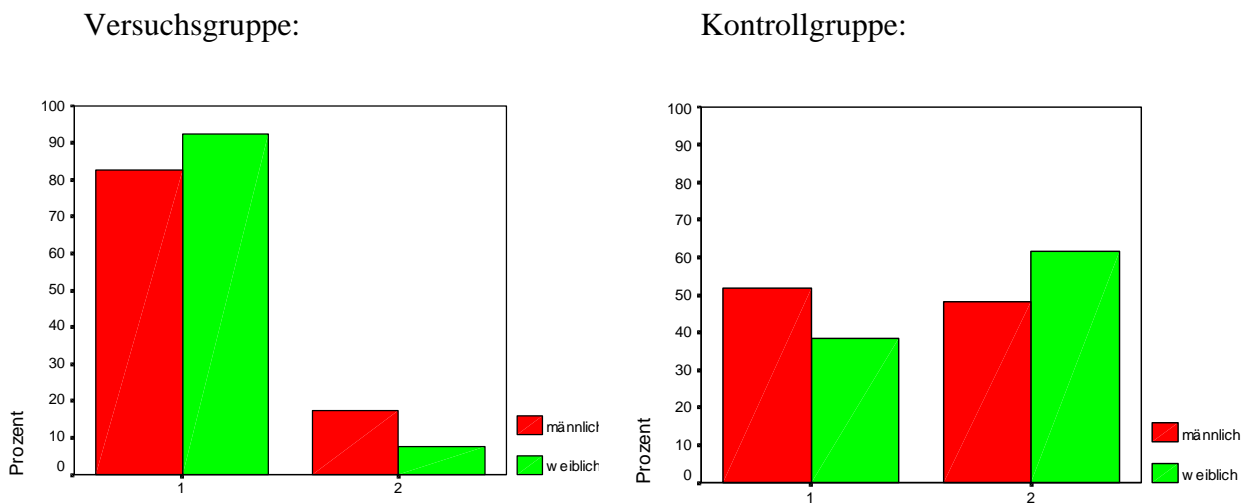
Antwortkategorien:

1. Richtige Antwort ($\Delta E_h = \Delta E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} mv^2$)
2. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:



Sowohl der U-Test von Mann-Whitney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass sich die Antwortverteilung beider Gruppen signifikant unterscheidet¹¹¹. Der U-Test von Mann und Withney und der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass sich die Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der einzelnen Gruppen nicht unterscheiden¹¹².

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Die meisten Schüler/innen können diese Aufgabe richtig lösen¹¹³. Dabei lösen fast alle Mädchen die Aufgabe richtig¹¹⁴.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Etwas weniger als die Hälfte der Schüler/innen löst die Aufgabe richtig¹¹⁵. Hier lösen deutlich mehr Jungen als Mädchen die Aufgabe richtig¹¹⁶.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe schneiden fast doppelt so gut ab wie die Schüler/innen der Kontrollgruppe¹¹⁷. Während bei der Versuchsgruppe die Mädchen besser sind als die Jungen, ist dies bei der Kontrollgruppe genau anders herum. Die geschlechtsspezifischen Unterschiede sind innerhalb der einzelnen Gruppen jedoch nicht signifikant.

Statistischer Zusammenhang der Items 1a, 1b, 5, 8 und 9:

Die folgende Tabelle stellt den statistischen Zusammenhang der in diesem Kapitel besprochenen Items mit Hilfe des χ^2 -Tests dar. Bei den Items 1a, 1b und 5 wurde die

¹¹¹ bei beiden Tests: $p = 0,000$

¹¹² Versuchsgruppe: U-Test von Mann-Whitney: 0,168 ,Kolmogorov-Smirnov-Test: 0,982;

Kontrollgruppe: U-Test von Mann-Whitney: 0,165 ,Kolmogorov-Smirnov-Test: 0,720

¹¹³ 87 %

¹¹⁴ Mädchen: 92,5 % ,Jungen: 82,7 %

¹¹⁵ 45,5 %

¹¹⁶ Mädchen: 38,5 % ,Jungen: 51,7 %

¹¹⁷ Versuchsgruppe: 87,1 % , Kontrollgruppe: 44,4 %

Antwortkategorie mit der Begründung für die statistische Auswertung herangezogen. In der Tabelle sind die asymptotischen Signifikanzen p eingetragen.

Versuchsgruppe:

Item	1a	1b	5	6	8	9
1a		0,000	0,000	0,609	0,201	0,119
1b	0,000		0,000	0,227	0,257	0,518
5a	0,000	0,000		0,024	0,489	0,272
6	0,609	0,227	0,024		0,125	0,224
8	0,201	0,257	0,489	0,125		0,397
9	0,119	0,518	0,272	0,224	0,397	

Kontrollgruppe:

Item	1a	1b	5	6	8	9
1a		0,000	0,008	0,691	0,011	0,170
1b	0,000		0,005	0,020	0,014	0,310
5	0,008	0,005		0,508	0,034	0,144
6	0,691	0,020	0,508		0,003	0,448
8	0,011	0,014	0,034	0,003		0,495
9	0,170	0,310	0,144	0,448	0,495	

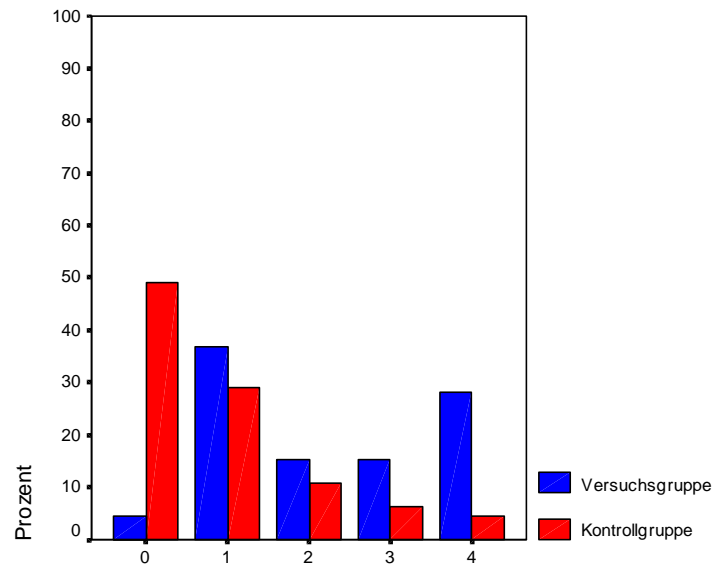
Während bei der Versuchsgruppe zwischen den Antworten zu den Items 1a, 1b und 5 ein signifikanter Zusammenhang besteht, sind bei der Kontrollgruppe die Antworten bei fast allen Übungsaufgaben signifikant voneinander abhängig.

Um diese Diskrepanz zwischen den beiden Gruppen besser verstehen zu können, werden die Ergebnisse der Items 1a, 1b, 5 und 8 zusammengefasst. Für die richtige Lösung der Aufgabe mit zugehöriger Begründung gibt es einen Punkt, ansonsten null Punkte.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen bei den Items 1a, 1b, 5 und 10:

Antwortkategorien:

- 0: Keine Aufgabe richtig gelöst
- 1: Eine Aufgabe richtig gelöst
- 2: Zwei Aufgaben richtig gelöst
- 3: Drei Aufgaben richtig gelöst
- 4: Alle Aufgaben richtig gelöst



Anhand der Grafik erkennt man deutlich den Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Bei der Kontrollgruppe nimmt die Anzahl der Schüler/innen, die mehrere Aufgaben auch mit der zugehörigen Begründung richtig haben, mit zunehmender Anzahl der richtig bearbeiteten Aufgaben sehr stark ab. Das ist bei der Versuchsgruppe nicht der Fall.

Zusammenfassung der Auswertung zur Mechanischen Energie:

Energiebegriff:

Die unterschiedlichen didaktischen Ansätze spiegeln sich im unterschiedlichen Verständnis der beiden Gruppen im Bezug auf die Energie wieder. Die Schüler/innen der Versuchsgruppe beschreiben die Energie am häufigsten mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, der Nennung von Energiearten und der Bewegung eines Körpers¹¹⁸. Die Schüler/innen der Kontrollgruppe dagegen charakterisieren die Energie meist mit Hilfe der Arbeit¹¹⁹. Bei beiden Gruppen hat sich im Vergleich zum Vortest die Anzahl der Schüler/innen erhöht, die Energie und Kraft als Synonyme verwenden¹²⁰. Das Antwortverhalten von Jungen und Mädchen weist bei beiden Gruppen keinen signifikanten Unterschied auf.

¹¹⁸ 58,7 %

¹¹⁹ 41 %

¹²⁰ Versuchsgruppe: Vortest Item 1: Ak.5: 5,4 %, Lernerfolgstest I Item 6: Ak. 7: 16,3 %;
Kontrollgruppe: Vortest Item 1: Ak.5: 0,9 %, Lernerfolgstests I Item 6: Ak. 7: 11,8 %

Energieerhaltungssatz:

Welche Folgerungen die Vorstellungen von der Energie für das Verständnis des Energieerhaltungssatzes hat, zeigt sich darin, dass bei der Versuchsgruppe 88,0 %, bei der Kontrollgruppe dagegen nur 38,2 % der Schüler/innen den Energieerhaltungssatz fehlerfrei wiedergeben können¹²¹. Während bei der Versuchsgruppe mehr Mädchen als Jungen den Energieerhaltungssatz richtig angeben, ist dies bei der Kontrollgruppe genau anders herum¹²².

Anwendung des Energieerhaltungssatzes mit der Verwendung von Formeln:

Hier ist zu anmerken, dass diese Art von Aufgaben bei beiden Gruppen im Unterricht eingeübt wurden. 87,0 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe haben die gestellte Aufgabe richtig gelöst, bei der Kontrollgruppe sind es mit 45,5 % fast nur halb so viele.

Anwendung des Energieerhaltungssatzes ohne das Verwenden von Formeln:

Hier ist zu berücksichtigen, dass diese Art der Aufgaben – im Gegensatz zu der oben besprochenen Rechenaufgabe - bei beiden Gruppen im Unterricht nicht eingeübt wurden. Es zeigt sich, dass Symmetrie des Bergs bzw. Tals die Wahl der Antwort deutlich beeinflusst. So wird die Aufgabe, bei der ein symmetrischer Berg überwunden werden muss, deutlich öfter richtig beantwortet, als die Aufgaben bei denen keine Symmetrie in der Versuchsanordnung besteht¹²³. Bei der Versuchsgruppe nimmt beim Übergang vom symmetrischen Berg bzw. Tal zum asymmetrischen die Anzahl der richtigen Lösungen nicht so stark ab wie bei der Kontrollgruppe. Innerhalb der beiden Gruppen ist die Anzahl der richtigen Lösungen bei den Aufgaben, die keine Symmetrie im Versuchsaufbau enthalten, in etwa gleich groß¹²⁴. Bei der Versuchsgruppe haben die Jungen die Aufgaben zwischen 10 % und 20 % häufiger richtig gelöst als die Mädchen. Bei der Kontrollgruppe ergibt sich kein einheitliches Bild.

Statistischer Zusammenhang zwischen den einzelnen Items:

Bei der Versuchsgruppe bestehen signifikante Zusammenhänge zwischen den Aufgaben, die ohne das Verwenden einer Formel gelöst werden müssen. Bei der Kontrollgruppe bestehen bezüglich fast allen Übungsaufgaben signifikante Zusammenhänge. Grund für das Verhalten der Kontrollgruppe könnte sein, dass es kaum Schüler/innen gibt, die von den betrachteten Aufgaben mehr als eine Aufgabe mit der zugehörigen Begründung richtig haben.

¹²¹ Item 9, Ak. 1

¹²² Versuchsgruppe: Mädchen: 92,5 %, Jungen: 84,6 %;
Kontrollgruppe: Mädchen: 36,5 %, Jungen: 39,7 %

¹²³ z. Bsp.: Versuchsgruppe: Item 1a Ak. 1: 80,4 %, Item 1b Ak. 1: 68,5 %;
Kontrollgruppe: Item 1a Ak. 1: 69,1 %, Item 1b Ak. 1: 30,0 %

¹²⁴ Versuchsgruppe: Item 1b Ak. 1: 68,5 %, Item 5a Ak. 1: 69,6 %;
Kontrollgruppe: Item 1b Ak. 1: 30,0 %, Item 5a Ak. 1: 37,3 %

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Bei den Aufgaben stimmen die Ergebnisse der Kontrollgruppe meist recht gut mit den Ergebnissen bisher veröffentlichter Untersuchungen überein. Der Lernerfolg der Versuchsgruppe ist stets höher als der Lernerfolg der Gruppen, die bisher untersucht wurden.

Diskussion:

Die Schüler/innen beider Gruppen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Energieverständnis. Entscheidend ist wohl, wie die Energie bei den einzelnen Unterrichtskonzepten eingeführt wurde. Während die Schüler/innen der Versuchsgruppe zur Beschreibung der Energie am häufigsten den Energieerhaltungssatz, die Energiearten oder die Bewegung von Körpern berücksichtigen, beschreiben die Schüler/innen der Kontrollgruppe die Energie meist mit Hilfe der Arbeit. Dieses unterschiedliche Verständnis von der Energie spiegelt sich auch darin wieder, dass deutlich mehr Schüler/innen der Versuchsgruppe im Vergleich zur Kontrollgruppe den Energieerhaltungssatz richtig wiedergeben können. Aber es ist nicht nur die Reproduktion des Energieerhaltungssatzes, die die Schüler/innen der Versuchsgruppe besser beherrschen, sondern auch seine konkrete Anwendung. Dass die bei dieser Arbeit gewonnenen Versuchsergebnisse kaum von der Schülerpopulation und von den unterrichtenden Lehrkräften abhängen, zeigt die Tatsache, dass die Versuchswerte der Kontrollgruppe gut mit den Werten übereinstimmen, die bei den in Kapitel 2 vorgestellten Untersuchungsergebnissen gewonnen wurden.

5.4.3.2 Items zur Arbeit

Die Items 3, 4a und 7 des Lernerfolgstest I können dem Themenkreis Arbeit zugeordnet werden. Mit Hilfe dieser Items wird untersucht, welche Vorstellung die Schüler/innen von der physikalischen Arbeit haben und inwieweit sie den Wert der Arbeit berechnen können.

Item 7:

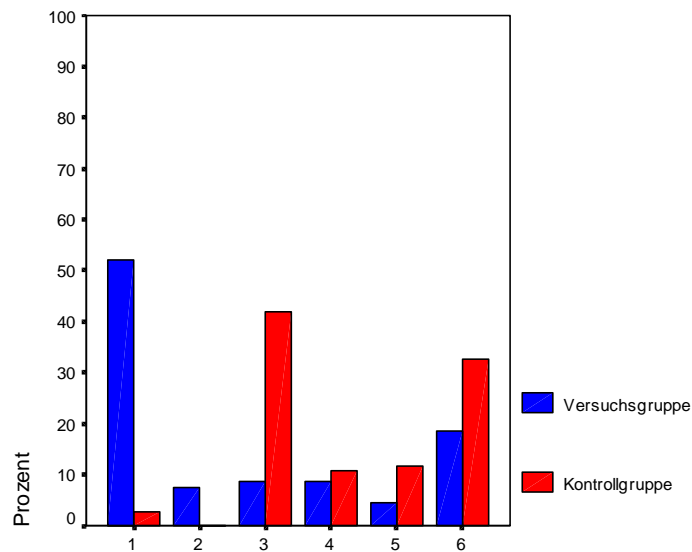
Was verstehst du unter dem Begriff „Arbeit“?

Intention: Mit diesem Item wird untersucht, welche Vorstellung die Schüler/innen von der physikalischen Arbeit haben.

Antwortkategorien:

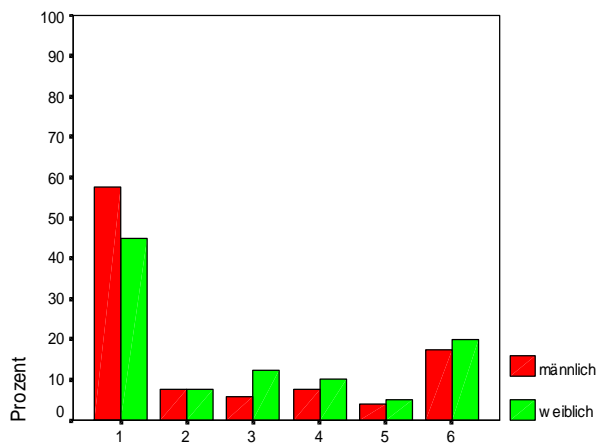
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg
4. Beim Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.
5. Arbeit ist Kraft
6. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

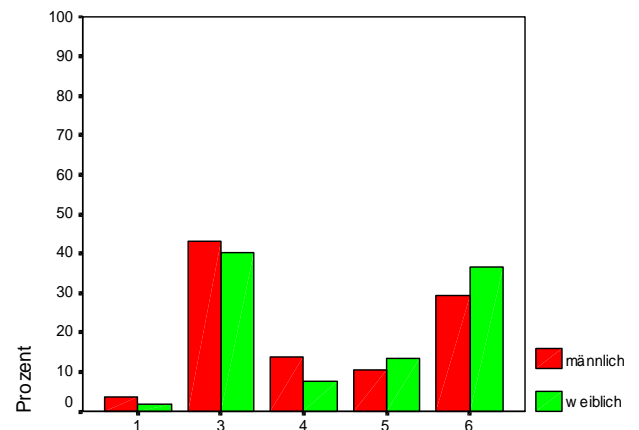


Vergleich des Antwortverhaltens differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel signifikant¹²⁵. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach der Vielfeldertafel bei beiden keine Signifikanz¹²⁶.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Die Mehrzahl der Schüler/innen versteht unter der Arbeit die Ursache für die Energieänderung¹²⁷. Eine erfreulich geringe Anzahl von 4,3 % der Schülern/Schülerinnen benutzt Arbeit und Kraft als Synonyme. Während etwas mehr Jungen unter der Arbeit die Energieänderung verstehen¹²⁸, verbinden etwas mehr Mädchen die Arbeit mit dem Produkt aus Kraft und Weg¹²⁹.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Die am häufigste genannte Antwortkategorie ist mit 41,8 % die Nennung der Formel „Arbeit ist gleich Kraft mal Weg“¹³⁰. Nur 2,7 % der Schüler/innen verstehen unter der Arbeit die Ursache für die Änderung der mechanischen Energie. Diese Definition ist den Schülern/Schülerinnen aber bekannt. Sie wird ihnen am Ende des Themenbereichs „Mechanische Energie und Arbeit“ nahe gebracht. 11,8 % der Schüler/innen setzen die Arbeit gleich der Kraft. Mädchen und Jungen zeigen in etwa das gleiche Antwortverhalten.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Wie von den didaktischen Ansätzen her nicht anders zu erwarten verstehen die Schüler/innen der beiden Gruppen unter der Arbeit etwas grundsätzlich anderes. Während die Mehrzahl der Schüler/innen der Versuchsgruppe in der Arbeit die Ursache für die Energieänderung sehen, steht bei den Schülern/Schülerinnen der Kontrollgruppe die Formel „Arbeit ist gleich Kraft mal Weg“ im Vordergrund. Die Benutzung der Begriffe „Arbeit“ und „Kraft“ als Synonyme tritt bei den Schülern/Schülerinnen der Kontrollgruppe drei mal so häufig auf wie bei den Schülern/Schülerinnen der Versuchsgruppe. Bei beiden Gruppen zeigt sich, dass die Jungen häufiger als ihre Mitschülerinnen die Definition der Arbeit so wiedergaben, wie sie im Unterricht besprochen worden wurde¹³¹.

¹²⁵ $\chi^2 = 84,893$, $p = 0,000$

¹²⁶ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 2,1731$, $p = 0,825$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 1,881$, $p = 0,758$

¹²⁷ Ak. 1 und 2: 59,8 %

¹²⁸ Ak. 1 und 2: Mädchen: 52,5 %, Jungen: 65,4 %

¹²⁹ Ak. 2 und 3: Mädchen: 22,5 %, Jungen: 13,5 %

¹³⁰ Ak. 2 und 3

¹³¹ Versuchsgruppe: Ak. 1 und 2: Mädchen: 52,5 %, Jungen: 65,4 %;
Kontrollgruppe: Ak. 2 und 3: Mädchen: 40,4 %, Jungen: 43,4 %

Item 4a:

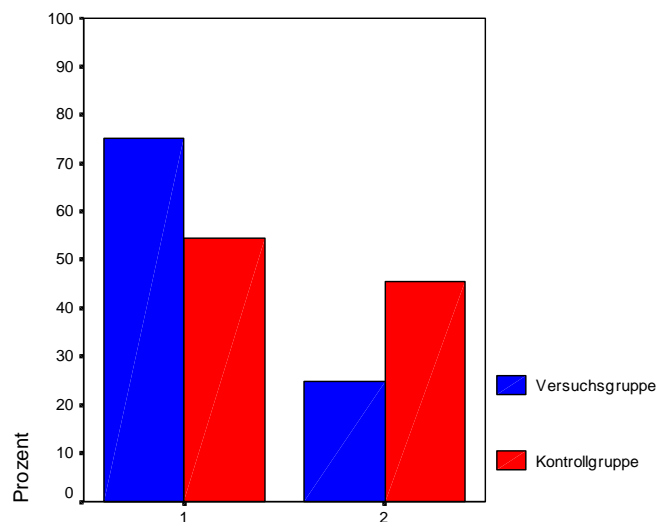
Eine schwere Kiste ($G = 0,50 \text{ kN}$) wird mit Hilfe eines Flaschenzugs reibungsfrei hochgehoben. Dazu muß man das Seil des Flaschenzugs mit einer Kraft von $F = 50 \text{ N}$ auf einer Länge von $l = 4,3 \text{ m}$ ziehen. Berechne die dabei verrichtete Arbeit W .

Intention: Es soll untersucht werden, inwieweit die Schüler/innen die Formel $W = F \cdot s$ für die Berechnung der Arbeit anwenden können.

Antwortkategorien:

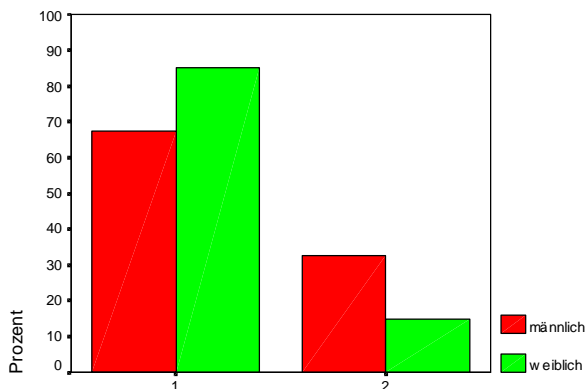
1. Richtige Antwort ($W = F \cdot s$)
2. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

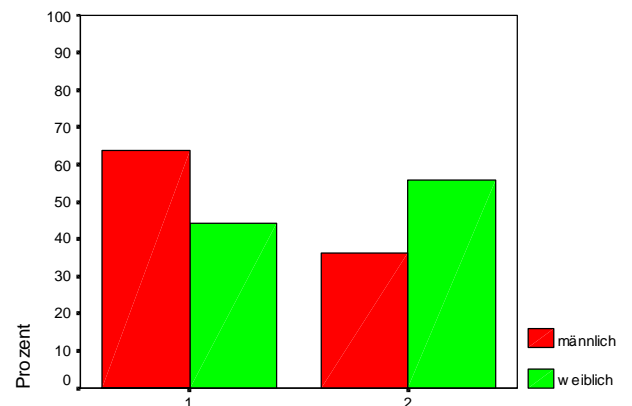


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Sowohl der U-Test von Mann-Withney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass zwischen den beiden Gruppen signifikante Unterschiede vorliegen¹³². Vergleicht man das Antwortverhalten von Mädchen und Jungen der Versuchsgruppe, ergibt sich nach dem U-Test von Mann-Withney und dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz¹³³. Der Vergleich der Anzahl der richtigen Antworten von Mädchen und Jungen der Kontrollgruppe ergibt, dass sich diese signifikant unterscheiden¹³⁴. Die Antwortverteilung unterscheidet sich dabei jedoch nicht signifikant¹³⁵.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Drei Viertel aller Schüler/innen haben diese Aufgabe richtig. Dabei haben deutlich mehr Mädchen als Jungen die Aufgabe richtig gelöst¹³⁶.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Etwas mehr als die Hälfte aller Schüler/innen hat die Aufgabe richtig¹³⁷. Dabei haben signifikant weniger Mädchen als Jungen diese Aufgabe richtig beantwortet¹³⁸.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Versuchsgruppen:

Wider Erwarten haben die Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgabe signifikant häufiger richtig gelöst, als die Schüler/innen der Kontrollgruppe. Und das, obwohl das konventionelle Unterrichtskonzept die Arbeit sehr viel mehr betont als das Münchner Unterrichtskonzept. Das ist auch deswegen erstaunlich, weil nur 16,3% der Schüler/innen der Versuchsgruppe, aber 41,8% der Schüler/innen der Kontrollgruppe die Arbeit über die Formel $W = F \cdot s$ definieren¹³⁹. Bei dieser Aufgabe haben die Jungen beider Gruppen die Aufgabe in etwa gleich häufig richtig gelöst. Grund für das bessere Abschneiden der Versuchsgruppe liegt darin begründet, dass hier die Mädchen deutlich besser waren als die Jungen, während bei der Kontrollgruppe die Mädchen signifikant schlechter waren als die Jungen.

¹³² U-Test von Mann-Withney: $p = 0,003$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,030$

¹³³ U-Test von Mann-Withney: $p = 0,053$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,479$

¹³⁴ U-Test von Mann-Withney: $p = 0,041$

¹³⁵ Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,245$

¹³⁶ Mädchen: 85,0 %, Jungen: 67,3 %

¹³⁷ 54,5 %

¹³⁸ Mädchen: 44,2 %, Jungen: 63,8 %

¹³⁹ siehe Item 7: Ak. 2 und 3

Item 3:

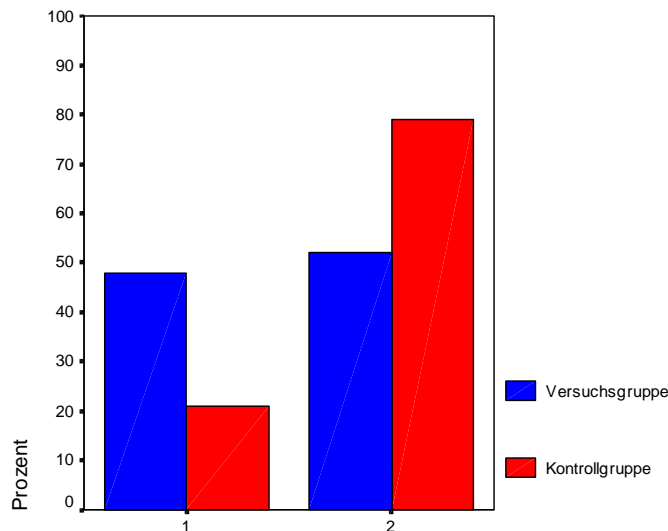
Eine Kugel ($m = 100 \text{ g}$) rollt reibungsfrei mit der Anfangsgeschwindigkeit $v = 5 \text{ m/s}$ eine schiefe Ebene so weit hinauf, bis sie ruht. Wie groß ist die gesamte Abbremsarbeit W , wenn die Hangabtriebskraft $F_H = 7,2 \text{ N}$ beträgt?

Intention: Es soll untersucht werden, inwieweit die Schüler/innen einen Zusammenhang zwischen der mechanischen Energie und der Arbeit herstellen können..

Antwortkategorien:

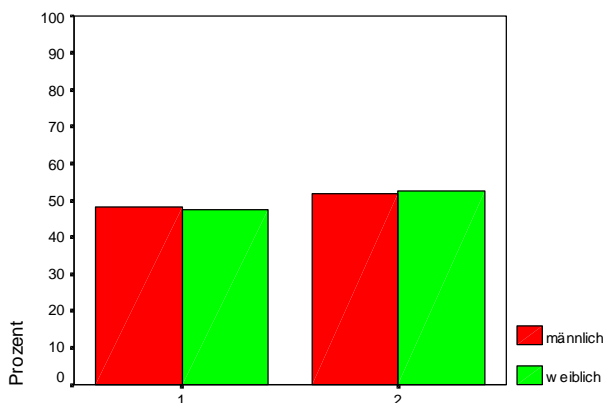
1. Richtige Antwort ($W = \Delta E$)
2. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

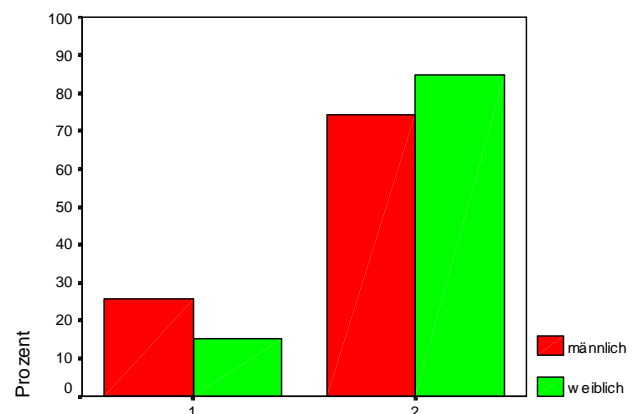


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Sowohl beim U-Test von Mann und Withney als auch beim Kolmogorov-Smirnov-Test ergibt sich, dass das Antwortverhalten beider Gruppen signifikant unterschiedlich ist¹⁴⁰. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach dem U-Test von Mann und Withney und dem Kolmogorov-Smirnov-Test bei keiner der beiden Gruppen Signifikanz¹⁴¹.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

47,8 % der Schüler/innen haben diese Aufgabe richtig. Das Antwortverhalten von Mädchen und Jungen unterscheidet sich nicht.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Etwa ein Fünftel der Schüler/innen hat die Aufgabe richtig gelöst¹⁴². Dabei haben die Mädchen die Aufgabe deutlich seltener richtig als die Jungen¹⁴³.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe haben diese Aufgabe mehr als doppelt so häufig richtig wie die Schüler/innen der Kontrollgruppe. Während bei der Versuchsgruppe Mädchen und Jungen gleich gut abschnitten, waren bei der Kontrollgruppe die Mädchen deutlich schlechter als die Jungen.

Statistischer Zusammenhang der Items 3, 4a und 7:

Die folgende Tabelle stellt den statistischen Zusammenhang der in diesem Kapitel besprochenen Items mit Hilfe des χ^2 -Tests dar. In der Tabelle sind die asymptotischen Signifikanzen p eingetragen.

Versuchsgruppe:

Item	3	4a	7
3		0,630	0,024
4a	0,630		0,143
7	0,024	0,143	

¹⁴⁰ U-Test von Mann und Withney: $p = 0,000$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,001$

¹⁴¹ Versuchsgruppe: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,956$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$,

Kontrollgruppe: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,179$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,924$

¹⁴² Ak. 1:20, 9 %

¹⁴³ Ak. 1 Mädchen: 15,4 %, Jungen: 25,9 %

Kontrollgruppe:

Item	3	4a	7
3		0,831	0,950
4a	0,831		0,126
7	0,950	0,126	

Bei der Versuchsgruppe besteht zwischen den Antworten des Items 3 und des Items 7 ein signifikanter Zusammenhang. Weitere signifikante Zusammenhänge bestehen bei Versuchs- und Kontrollgruppe nicht mehr.

Zusammenfassung der Auswertung zur Arbeit:

Arbeitsbegriff:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe bevorzugen die Definition der Arbeit über die Energieänderung. Dagegen definieren die Schüler/innen der Kontrollgruppe die Arbeit mehrheitlich über das Produkt aus Kraft mal Weg¹⁴⁴. Beim Arbeitsbegriff orientieren sich bei beiden Gruppen die Jungen mehr als die Mädchen an den in der Schule eingeführten Definitionen¹⁴⁵.

Anwendung der Formel „ $W = F \cdot s$ “:

Während bei der Versuchsgruppe drei Viertel aller Schüler/innen die Rechenaufgabe richtig haben, sind es bei der Kontrollgruppe etwas mehr als die Hälfte¹⁴⁶. Dabei haben die Jungen beider Gruppen die Aufgabe fast gleich oft richtig gelöst. Grund dafür, dass die Versuchsgruppe signifikant besser abschneidet, liegt darin, dass die Mädchen dieser Gruppe besser als ihre Mitschüler abschneiden und die Mädchen der Kontrollgruppe signifikant schlechter als ihre Mitschüler sind¹⁴⁷.

Anwendung der Formel „ $W = \Delta E$ “:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe lösen im Vergleich zu den Schülern/Schülerinnen der Kontrollgruppe die gestellte Aufgabe mehr als doppelt so häufig richtig¹⁴⁸. Dabei schneiden die Jungen und Mädchen der Versuchsgruppe

¹⁴⁴ Item 7: Ak. 1 und 2: Versuchsgruppe: 59,8 %, Kontrollgruppe: 2,7 %;
Ak. 2 und 3: Versuchsgruppe: 16,3 %, Kontrollgruppe: 41,8 %

¹⁴⁵ Versuchsgruppe: Ak. 1 und 2: Mädchen: 52,5 %, Jungen: 65,4 %;
Kontrollgruppe: Ak. 2 und 3: Mädchen: 40,4 %, Jungen: 43,4 %

¹⁴⁶ Item 4a: Ak. 1: Versuchsgruppe: 75 %, Kontrollgruppe: 54,5 %

¹⁴⁷ Item 4a: Ak. 1: Versuchsgruppe. Mädchen: 85,0 %, Jungen: 67,3 %;
Kontrollgruppe: Mädchen: 44,2 %, Jungen: 63,8 %

¹⁴⁸ Item 3: Ak. 1: Versuchsgruppe: 47,8 %, Kontrollgruppe 20,9 %

gleich gut ab, bei der Kontrollgruppe sind die Jungen deutlich besser als die Mädchen¹⁴⁹.

Diskussion:

Wie von den didaktischen Ansätzen zu erwarten, haben beide Gruppen eine grundsätzlich unterschiedliche Vorstellung von der Arbeit. Die verschiedenen Auffassungen lehnen sich sehr nahe an die Einführung der Arbeit bei den einzelnen Unterrichtskonzepten an. Nur so ist zu verstehen, warum die Versuchsgruppe unter der Arbeit mehrheitlich die Energieänderung versteht, während die Kontrollgruppe die Arbeit anhand des Terms „Kraft mal Weg“ beschreibt. Die bei der Kontrollgruppe im Unterricht erst sehr spät besprochene Interpretation der Arbeit als Energieänderung wird von den Schülern/Schülerinnen kaum angenommen.

Erstaunlich ist, dass die Versuchsgruppe die Rechenaufgabe, bei der die Arbeit über den Ansatz „Kraft mal Weg“ berechnet werden muss, signifikant häufiger richtig gelöst hat als die Kontrollgruppe. Das war nicht zu erwarten, denn bei der Kontrollgruppe stand der Arbeitsbegriff mit $W = F \cdot s$ lange im Vordergrund. Bemerkenswert ist dieses Ergebnis auch unter dem Gesichtspunkt, dass nur 16,3 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe, aber 41,8 % der Schüler/innen der Kontrollgruppe die Arbeit durch den Term „Kraft mal Weg“ beschrieben haben.

Ursache für das bessere Abschneiden der Versuchsgruppe bei der Rechenaufgabe mit dem Rechenansatz „ $W = F \cdot s$ “ liegt im deutlich besseren Abschneiden der Mädchen der Versuchsgruppe begründet. Damit zeigen die Lösungen der Aufgaben zur Arbeit die gleiche Tendenz wie die Lösungen der Aufgaben zur Energie. Bei beiden Aufgabentypen schneiden die Mädchen der Versuchsgruppe besser als ihre Mitschüler ab, die Mädchen der Kontrollgruppe sind dagegen schlechter als ihre Mitschüler.

Dass die Versuchsgruppe bei der Rechenaufgabe mit dem Ansatz „Arbeit ist gleich Energieänderung“ besser abschneidet als die Kontrollgruppe darf nicht verwundern, denn beim Münchner Unterrichtskonzept wird die Arbeit über die Energieänderung eingeführt. Bemerkenswert ist hier, dass nur 2,7 % der Schüler/innen der Kontrollgruppe die Arbeit anhand der Änderung der Energie beschreiben, die zugehörige Rechenaufgabe aber von 20,9 % dieser Schüler/innen richtig gelöst wurde. Der Grund muss wohl darin gesucht werden, dass die Arbeit bei der Kontrollgruppe über das Produkt aus Kraft und Weg eingeführt wurde und auch so von den Schülern/Schülerinnen verstanden wird.

¹⁴⁹ Item 3: Ak. 1: Versuchsgruppe. Mädchen: 47,5 %, Jungen: 48,1 %;
Kontrollgruppe: Mädchen: 15,4 %, Jungen: 25,9 %)

5.4.3.3 Items zum Zusammenhang von Energie und Arbeit

Anhand der Items 2, 3 und 4b des Lernerfolgstests I wird untersucht, inwieweit die Schüler/innen den Zusammenhang zwischen der Energie und der Arbeit erkennen und zum Lösen von Aufgaben heranziehen können. Die Ergebnisse des Items 3 wurden dabei bereits im vorhergehenden Kapitel „Items zur Arbeit“ dargestellt.

Item 2:

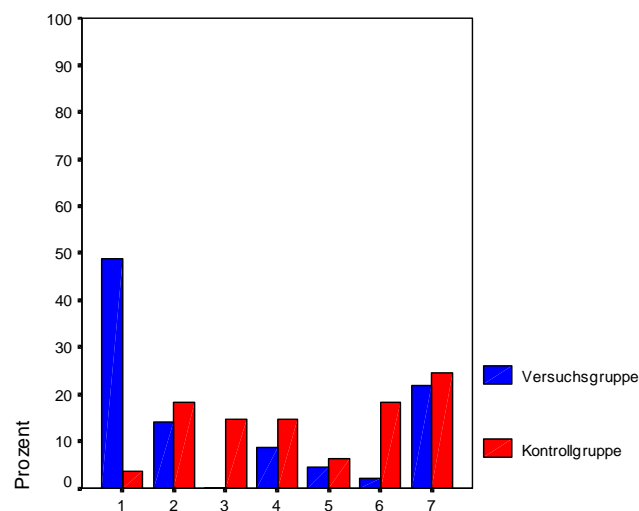
Welchen Zusammenhang gibt es zwischen Energie und Arbeit?

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, in wieweit die Schüler/innen einen Zusammenhang zwischen der Energie und der Arbeit erkennen.

Antwortkategorien:

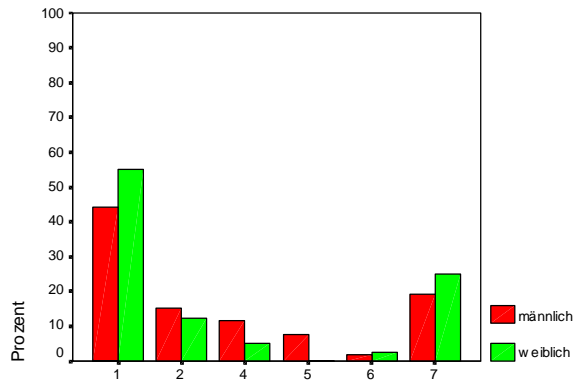
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Die Energie wird durch Arbeit geändert
3. Energie ist gleich gespeicherter Arbeit
4. Um Arbeit zu verrichten braucht man Energie
5. Arbeit und Energie haben die gleichen Formeln
6. Arbeit und Energie ist das Gleiche
7. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

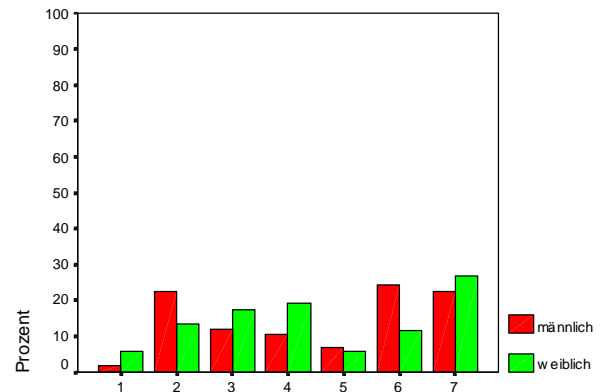


Antwortverhalten differenziert nach Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel signifikant¹⁵⁰. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich bei beiden keine Signifikanz¹⁵¹.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Fast die Hälfte der Schüler/innen gibt den Zusammenhang so wieder, wie sie ihn in der Schule gelernt haben, nämlich, dass die Arbeit gleich der Energieänderung ist¹⁵². Dabei geben mehr Mädchen als Jungen diese Antwort¹⁵³. 21,7 % der Schüler/innen sind gar nicht in der Lage einen Zusammenhang zwischen der Energie und der Arbeit anzugeben¹⁵⁴.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Die Antworten sind fast gleichmäßig auf die Antwortkategorien 2, 3, 4, 6 und 7 verteilt. Das zeigt sehr deutlich, dass die Schüler/innen über kein einheitliches Bild verfügen, das einen Zusammenhang von Energie und Arbeit beschreibt. 18,2 % der Schüler/innen verwenden Arbeit und Energie sogar als Synonyme. Der Zusammenhang von Energie und Arbeit, wie er in diesem Unterrichtskonzept beschrieben wird¹⁵⁵, wählen nur 14,5 % der Schüler/innen. Fast ein Viertel aller Schüler/innen kann keinen Zusammenhang zwischen Energie und Arbeit angeben¹⁵⁶.

¹⁵⁰ $\chi^2 = 69,997$, $p = 0,000$

¹⁵¹ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 5,238$, $p = 0,387$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 7,124$, $p = 0,310$

¹⁵² Ak. 1: 48,9 %

¹⁵³ Ak. 1: Mädchen: 55,0 % , Jungen: 44,2 %

¹⁵⁴ Ak. 7

¹⁵⁵ Ak. 3

¹⁵⁶ Ak. 7: 24,5 %

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Wie vom didaktischen Ansatz her nicht anders zu erwarten, unterscheiden sich die Vorstellungen der beiden Gruppen signifikant voneinander. Während bei der Versuchsgruppe fast die Hälfte aller Schüler/innen den Zusammenhang von Arbeit und Energie über „Arbeit ist gleich Energieänderung“ sieht, verfügen die Schüler/innen der Kontrollgruppe über kein einheitliches Bild. Grund dafür könnte sein, dass die Einführung der Arbeit als „Produkt aus Kraft und Weg“ erfolgt, später die Energie als gespeicherte Arbeit definiert wird und dann ganz zum Schluss der Unterrichtseinheit „mechanische Energie“ die Arbeit als Energieänderung interpretiert wird.

Vergleich der Items 2 (Zusammenhang von Energie und Arbeit), Item 6 (Definition der Energie) und Item 7 (Definition der Arbeit):

Die Items 2 und 6 haben die Ak. „Energie ist gleich gespeicherter Arbeit“ gemeinsam.

Energie ist gleich gespeicherter Arbeit	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
Item 6:	0 %	25,5 %
Item 2:	0 %	14,5 %

Die Diskrepanz der Antworthäufigkeiten bei der Kontrollgruppe ist dadurch zu erklären, dass deren Schüler/innen mit dem Energiebegriff Probleme haben. Sie geben daher den Zusammenhang zwischen der Energie und der Arbeit lieber in der Form „Arbeit ist ...“, anstatt in der Form „Energie ist ...“ an.

Das Item zur Definition der Arbeit und das Item zum Zusammenhang von Energie und Arbeit haben die Ak. „Arbeit ist gleich Energieänderung“ gemeinsam.

Arbeit ist gleich Energieänderung	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
Item 7:	52,2 %	2,7 %
Item 2:	48,9 %	3,6 %

Die gute Übereinstimmung der Antworthäufigkeiten zeigt, dass die Antworten der einzelnen Items konsistent zueinander sind.

Item 4 b:

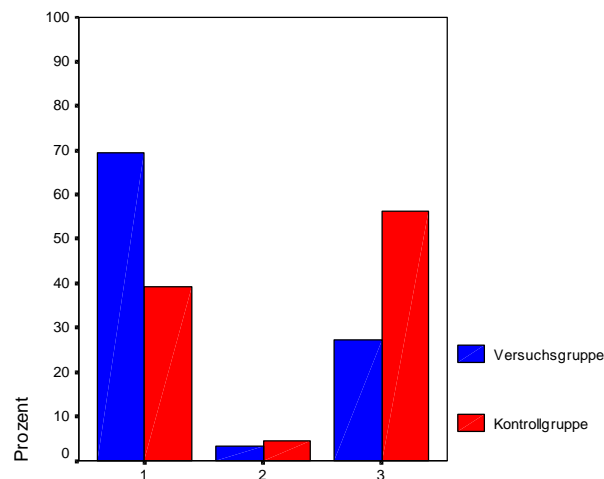
Eine schwere Kiste ($G = 0,50 \text{ kN}$) wird mit Hilfe eines Flaschenzugs reibungsfrei hochgehoben. Dazu muß man das Seil des Flaschenzugs mit einer Kraft von $F = 50 \text{ N}$ auf einer Länge von $l = 4,3 \text{ m}$ ziehen. Wie hoch wurde die Kiste gehoben?

Intention: Es soll untersucht werden, inwieweit die Schüler/innen einen Zusammenhang zwischen der mechanischen Energie und der Arbeit herstellen können..

Antwortkategorien:

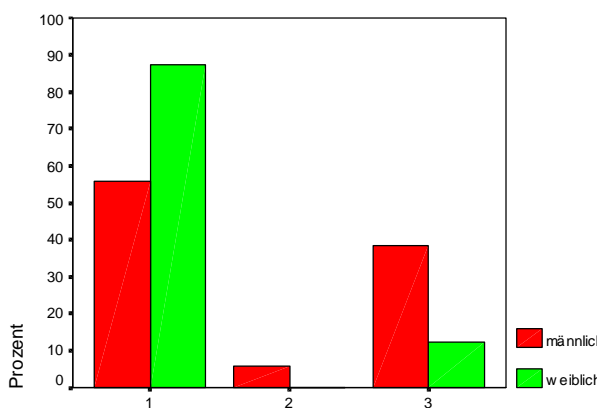
1. Richtige Antwort mit $\Delta E = W$
2. Richtige Antwort gerechnet über die Anzahl der Flaschen
3. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

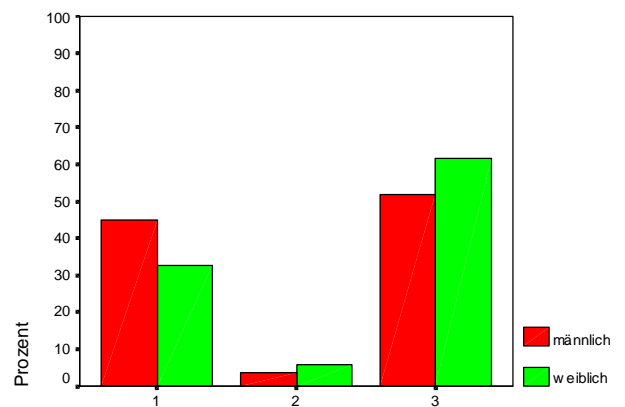


Antwortverhalten differenziert nach Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Sowohl beim U-Test von Mann und Withney als auch beim Kolmogorov-Smirnov-Test ergibt sich, dass das Antwortverhalten beider Gruppen signifikant unterschiedlich ist¹⁵⁷. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich bei der Antwortverteilung der Versuchsgruppe sowohl beim U-Test von Mann und Withney

¹⁵⁷ bei beiden Tests: $p = 0,000$

als auch beim Kolmogorov-Smirnov-Test Signifikanz. Bei der Kontrollgruppe sind die Antwortverteilungen nicht signifikant unterschiedlich¹⁵⁸.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Ein sehr hoher Prozentsatz von 69,6 % der Schüler/innen hat diese Aufgabe unter der Zuhilfenahme des Zusammenhangs von Arbeit und Energieänderung richtig gelöst. Dabei unterscheidet sich die Prozentzahl der richtigen Antworten von Mädchen und Jungen signifikant. Die Mädchen haben die Aufgabe etwa 1,6 mal so oft richtig gelöst wie die Jungen.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier haben 39,1 % der Schüler/innen die Aufgabe anhand von „Arbeit ist gleich Energieänderung“ richtig gelöst. Die Mädchen lösen die Aufgabe deutlich öfter falsch als die Jungen. Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe lösen diese Aufgabe signifikant häufiger als die Schüler/innen der Kontrollgruppe¹⁵⁹. Dabei sind bei der Versuchsgruppe die Schülerinnen signifikant besser als ihre Mitschüler, bei der Kontrollgruppe sind sie deutlich, wenn auch nicht signifikant, schlechter.

Statistischer Zusammenhang der Items 2, 3 und 4b:

Die folgende Tabelle stellt den statistischen Zusammenhang der in diesem Kapitel besprochenen Items mit Hilfe des χ^2 -Tests dar. In der Tabelle sind die asymptotischen Signifikanzen p eingetragen.

Versuchsgruppe:

Item	2	3	4b
2		0,724	0,808
3	0,724		0,137
4b	0,808	0,137	

Kontrollgruppe:

Item	2	3	4b
2		0,545	0,286
3	0,545		0,137
4b	0,286	0,137	

Bei keinem der Items bestehen untereinander signifikante Zusammenhänge.

¹⁵⁸ Versuchsgruppe: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,002$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,021$,

Kontrollgruppe: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,243$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,814$

¹⁵⁹ Versuchsgruppe: 69,6 % , Kontrollgruppe: 39,1 %

Zusammenfassung der Auswertung zum Zusammenhang von Energie und Arbeit:

Zusammenhang von Energie und Arbeit:

Versuchs- und Kontrollgruppe haben ein grundlegend anderes Bild von dem Zusammenhang zwischen Energie und Arbeit. Bei der Versuchsgruppe wird die Arbeit als Energieänderung angesehen¹⁶⁰. Während bei der Versuchsgruppe etwa ein Viertel der Schüler/innen nicht in der Lage ist einen physikalisch richtigen Zusammenhang zwischen Energie und Arbeit zu erkennen, ist es bei der Kontrollgruppe fast die Hälfte¹⁶¹.

Anwendung des Zusammenhangs von Energie und Arbeit:

Bei dieser etwas schwierigeren Aufgabe schneidet die Versuchsgruppe signifikant besser ab als die Kontrollgruppe¹⁶². Hervorzuheben ist hier dabei, dass die Mädchen der Versuchsgruppe signifikant besser abschneiden als die Jungen. Bei der Kontrollgruppe sind die Mädchen schlechter als ihre Mitschüler¹⁶³.

Diskussion:

Die unterschiedlichen didaktischen Ansätze bringen den beiden Gruppen eine jeweils andere Sichtweise vom Zusammenhang von Energie und Arbeit nahe. Während die Arbeit bei der Versuchsgruppe als eine Beschreibung der Energieänderung gesehen wird, sieht fast die Hälfte aller Schüler/innen der Kontrollgruppe in der Arbeit die wichtigere Größe. Das äußert sich zum Beispiel in der Formulierung „um Arbeit zu verrichten braucht man Energie“.

Sowohl beim Item 3 als auch beim Item 4b ist die Versuchsgruppe signifikant besser als die Kontrollgruppe. Dieser Ausgang war zu erwarten, da das Münchner Unterrichtskonzept den Zusammenhang von Arbeit als Energieänderung sehr viel stärker betont, als das konventionelle Unterrichtskonzept. Auch bei diesen Rechenaufgaben sind die Mädchen der Versuchsgruppe genau so gut oder sogar signifikant besser als ihre Mitschüler. Bei der Kontrollgruppe dagegen sind die Mädchen stets schlechter als die Jungen. Dieses Ergebnis bestätigt den Trend der vorhergehenden Rechenaufgaben.

¹⁶⁰ Ak. 1. Versuchsgruppe: 48,9 %, Kontrollgruppe: 3,6%

¹⁶¹ Ak. 5, 6 und 7: Versuchsgruppe: 28,2 %, Kontrollgruppe: 49,1 %

¹⁶² Ak. 1 und 2: Versuchsgruppe: 73,2 %, Kontrollgruppe: 43,6 %

¹⁶³ Ak. 1 und 2: Versuchsgruppe: Mädchen: 87,5 %, Jungen: 61,6 %,
Kontrollgruppe: Mädchen: 38,5 %, Jungen: 48,2 %

5.4.3.4 Items zum nullten Hauptsatz der Wärmelehre und zur Temperatur

Mit Hilfe der Items 13, 15a, 15b, 19a, 19b 19c und 21 des Lernerfolgstests II wird untersucht, inwieweit die Schüler/innen begreifen, warum man Temperaturen überhaupt messen kann, und ob die Schüler/innen ihre physiologische Temperaturempfindung auch kritisch reflektieren können. Weiterhin wird evaluiert, ob die Schüler/innen verinnerlicht haben, dass 0 K die geringste zu erreichende Temperatur ist.

Item 21:

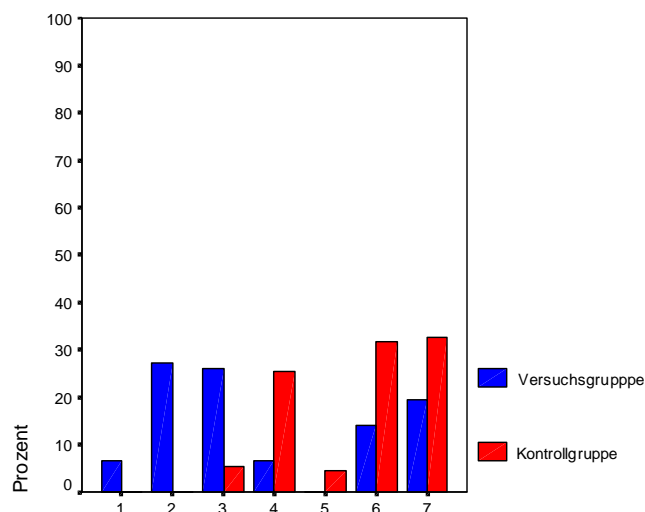
Um die Temperatur eines Körpers zu messen, hält man ein Thermometer an diesen Körper. Nach einiger Zeit kann man an diesem Thermometer die Temperatur des Körpers ablesen. Erkläre bitte genau, warum man am Thermometer nach einiger Zeit die Temperatur des Körpers ablesen kann.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, ob die Schüler/innen verstanden haben, warum man Temperaturen überhaupt messen kann.

Antwortkategorien:

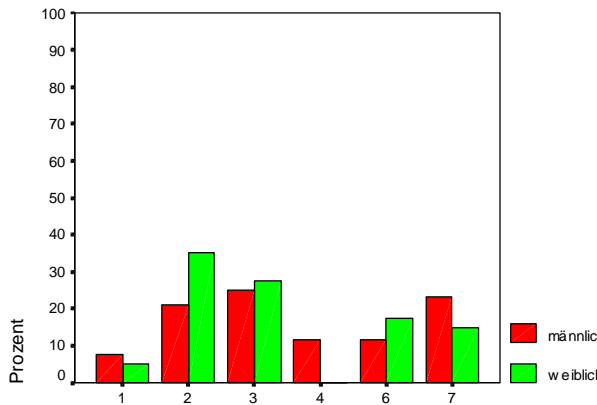
1. Wegen des nullten Hauptsatzes der Wärmelehre
2. Da Thermometer und Körper ins thermische Gleichgewicht gelangen
3. Thermometer und Körper gleichen ihre Temperatur an
4. Das Thermometer nimmt die Temperatur des Körpers an
5. Die Temperatur des Körpers wird auf das Thermometer übertragen
6. Funktionsweise des Thermometers erklärt
7. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

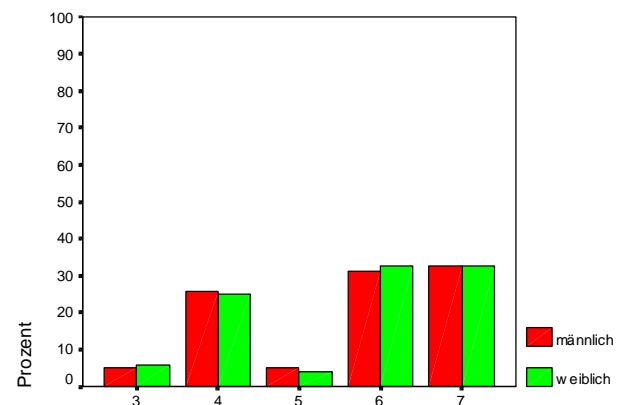


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind signifikant¹⁶⁴. Vergleicht man die Antwortverteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich bei beiden Unterrichtskonzepten keine Signifikanz¹⁶⁵.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

67,5 % beantworteten die Aufgabe richtig¹⁶⁶. Nur 14,1 % der Schüler/innen weichen der Aufgabenstellung dadurch aus, dass sie die Funktionsweise des Thermometers beschreiben.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Wie nicht anders zu erwarten, schnitt die Kontrollgruppe hier sehr schlecht ab. Grund dafür ist, dass die Temperaturmessung bei diesem Unterrichtskonzept nur am Rande problematisiert wird. So konnten auch nur 5,5 % der Schüler/innen eine physikalisch richtige Antwort geben¹⁶⁷. 30 % der Schüler/innen sind der Meinung, dass das Thermometer die Temperatur des Körpers annimmt¹⁶⁸. Fast ein Drittel der Schüler/innen wich der Fragestellung aus, indem sie nur die Funktionsweise des Thermometers beschrieb¹⁶⁹. Fast genauso groß ist der Anteil der Schüler/innen, die die Aufgabe gar nicht oder sehr unzureichend beantwortet haben¹⁷⁰. Das Antwortverhalten von Mädchen und Jungen ist nicht signifikant unterschiedlich.

¹⁶⁴ $\chi^2 = 76,119$, $p = 0,000$

¹⁶⁵ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 7,838$, $p = 0,165$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 0,156$, $p = 0,997$

¹⁶⁶ Ak. 1, 2 und 3

¹⁶⁷ Ak. 1, 2 und 3

¹⁶⁸ Ak. 4 und 5

¹⁶⁹ Ak. 6: 31,8 %

¹⁷⁰ Ak. 6: 32,7 %

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Das Antwortverhalten der einzelnen Gruppen differiert sehr stark. Während 59,8 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgaben richtig beantworten, sind es bei der Kontrollgruppe nur 5,5 % der Schüler/innen¹⁷¹. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich. Die Temperaturmessung wird beim konventionellen Unterrichtskonzept nur wenig problematisiert.

Item 15a:

Eine Rakete setzt einen Satelliten (Temperatur beim Aussetzen: 12 °C) im Weltraum aus. Die Umgebungstemperatur beträgt zirka 3 K. Welche Temperatur hat der Satellit nach einiger Zeit, wenn er von der Sonne gerade nicht beschienen wird?

- Die Temperatur des Satelliten ist höher als 12 °C.
- Die Temperatur des Satelliten beträgt 12 °C.
- Die Temperatur des Satelliten ist geringer als 12 °C, aber größer als 3 K.
- Die Temperatur des Satelliten beträgt zirka 3 K.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen das Prinzip des thermischen Gleichgewichts anwenden können. Zum andern wird untersucht, ob die Schüler/innen die Temperaturabnahme des Satellits mit Hilfe der Wärmestrahlung beschreiben können.

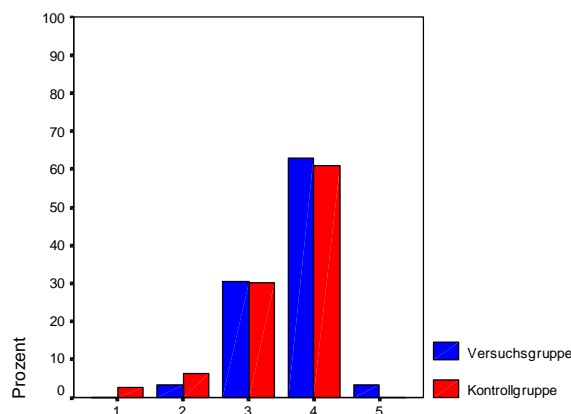
Erster Teil der Auswertung:

Hier wurde nur untersucht, welche Temperatur die Schüler/innen gewählt haben.

Antwortkategorien:

1. Die Temperatur des Satelliten ist höher als 12 °C
2. Die Temperatur des Satelliten beträgt 12 °C
3. Die Temperatur des Satelliten ist geringer als 12°C, aber größer als 3 K
4. Die Temperatur des Satelliten beträgt zirka 3 K
5. Sonstige oder keine Antwort

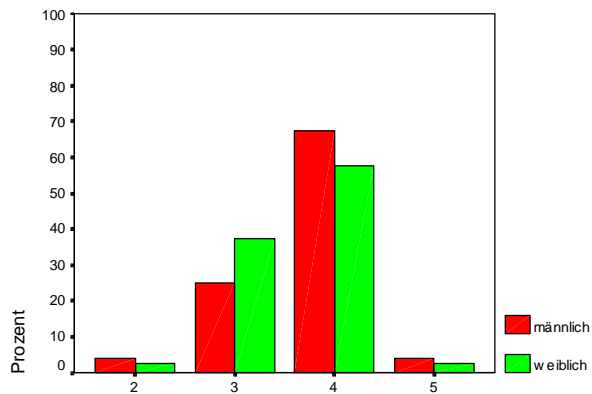
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



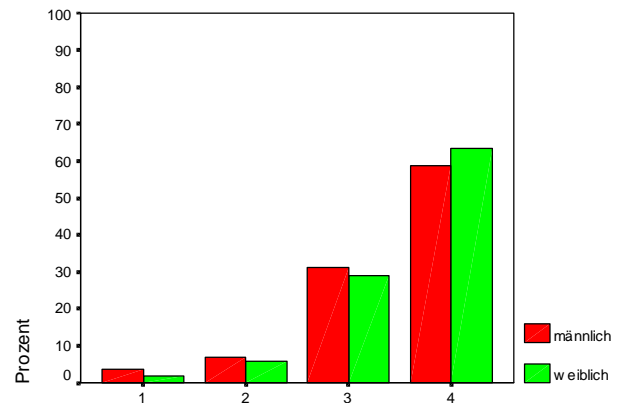
¹⁷¹ Ak. 1, 2 und 3

Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede der beiden Versuchsgruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant¹⁷². Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der einzelnen Gruppen, ergibt sich bei beiden Gruppen keine Signifikanz¹⁷³.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Etwa zwei Drittel der Schüler/innen haben die Aufgabe richtig beantwortet¹⁷⁴. Dabei hatten die Jungen die Aufgabe häufiger richtig als die Mädchen¹⁷⁵.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier haben 60,9 % der Schüler/innen die Aufgabe richtig. Die Jungen schneiden etwas schlechter als die Mädchen ab¹⁷⁶.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Das Antwortverhalten beider Gruppen ist fast gleich. So geben bei beiden Gruppen etwa 60 % der Schüler/innen dem Satelliten am Ende die Temperatur von 3 K¹⁷⁷.

¹⁷² $\chi^2 = 7,110$, $p = 0,130$

¹⁷³ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 1,757$, $p = 0,624$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 0,438$, $p = 0,932$

¹⁷⁴ Ak. 4: 63 %

¹⁷⁵ Ak. 4: Mädchen: 57,5 %, Jungen: 67,3 %

¹⁷⁶ Ak. 4: Mädchen: 63,5 %, Jungen: 58,6 %

¹⁷⁷ Ak. 4: Versuchsgruppe: 63 % , Kontrollgruppe: 60,9 %

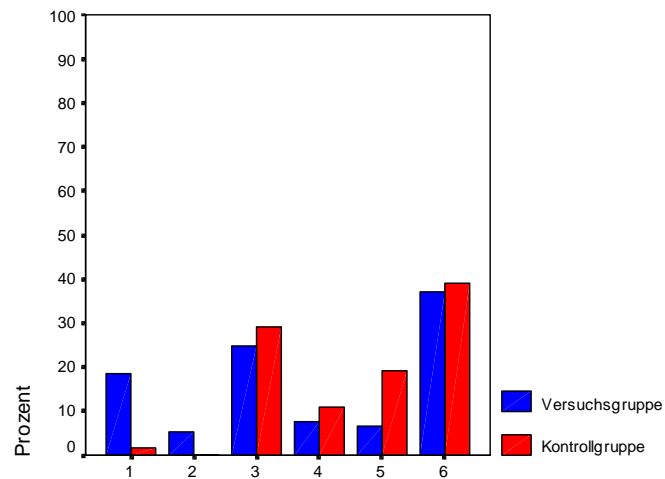
Zweiter Teil der Auswertung:

Neben der richtigen Temperatur wurde auch berücksichtigt, ob die zugehörige Begründung richtig war.

Antwortkategorien:

1. 3 K, wegen der Wärmestrahlung
2. 3 K, da der Satellit mit der Umgebung ins thermische Gleichgewicht kommt.
3. 3 K, der Satellit nimmt die Temperatur der Umgebung an
4. 3 K, der Satellit gibt Wärme ab
5. 3 K mit sonstiger oder keiner Begründung
6. Falsche Antwort, mit sonstiger oder keiner Begründung

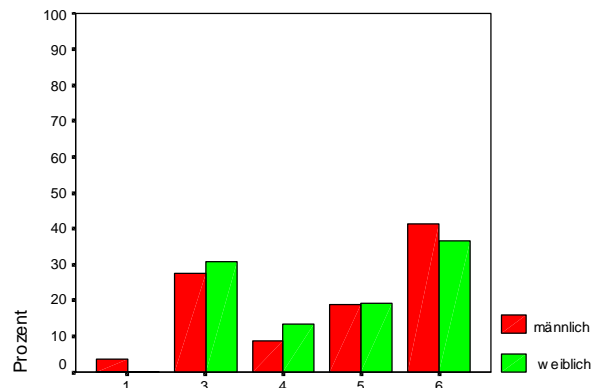
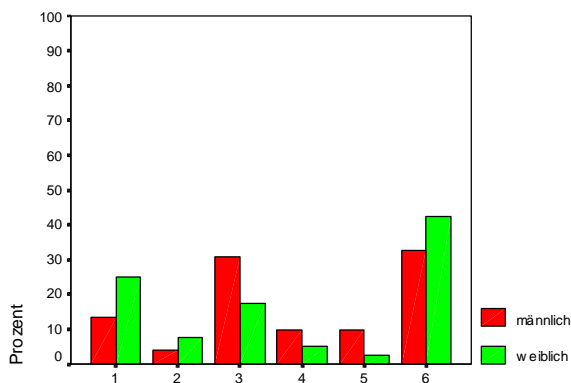
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:

Kontrollgruppe:



Das Antwortverhalten der beiden Gruppen ist nach der Vielfeldertafel signifikant unterschiedlich¹⁷⁸. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der einzelnen Gruppen, ergibt sich bei beiden Gruppen nach der Vielfeldertafel keine Signifikanz¹⁷⁹.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

31,5 % der Schüler/innen haben neben der richtigen Temperatur auch die richtige, detaillierte Begründung genannt¹⁸⁰. Dabei schneiden die Mädchen besser als die Jungen ab¹⁸¹.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier geben 12,7 % der Schüler/innen neben der richtigen Temperatur auch eine richtige und detaillierte Begründung an. Dabei sind die Mädchen besser als die Jungen¹⁸².

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Das Antwortverhalten beider Gruppen ist sehr unterschiedlich. Bei der Versuchsgruppe gibt zirka ein Drittel der Schüler/innen sowohl die richtige Temperatur als auch richtige Begründung an. Bei der Kontrollgruppe sind es immerhin 12,7 % der Schüler/innen. Das ist eine erstaunlich hohe Anzahl, wenn man bedenkt, dass die Problematik der Wärmeübergänge bei der Kontrollgruppe nicht besprochen wurde. Bei beiden Gruppen haben die Mädchen besser als die Jungen abgeschnitten.

Item 19a:

An einem kalten Wintertag berührst du gleichzeitig die Kufen (Metall) und die Sitzfläche deines Schlittens (Holz). Beschreibe, was du fühlen wirst. Bitte begründe deine Antwort auch.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen ihre physiologische Erfahrung erklären können.

Erster Teil der Auswertung:

Es wird die physiologische Wahrnehmung ohne die zugehörige Begründung betrachtet.

¹⁷⁸ $\chi^2 = 27,631$, $p = 0,000$

¹⁷⁹ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 6,753$, $p = 0,240$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 2,643$, $p = 0,619$

¹⁸⁰ Ak. 1, 2 und 4

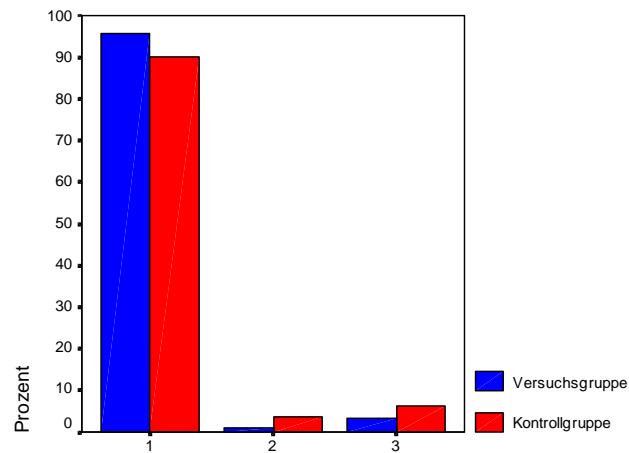
¹⁸¹ Ak. 1, 2 und 4: Mädchen: 37,5 %, Jungen: 26,9 %

¹⁸² Ak. 1, 2 und 4: Mädchen: 13,5 %, Jungen: 8,6 %

Antwortkategorien:

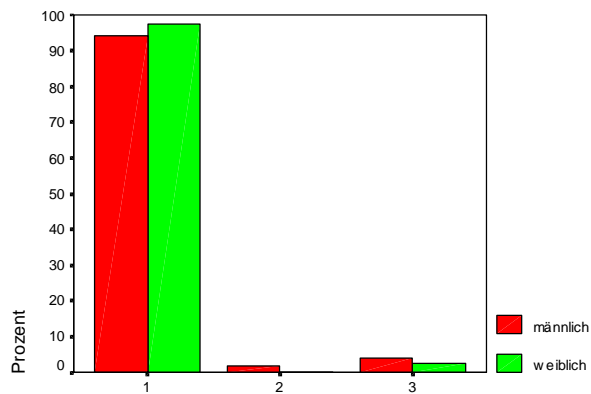
1. Die Kufen fühlen sich kälter an.
2. Die Kufen fühlen sich wärmer an
3. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

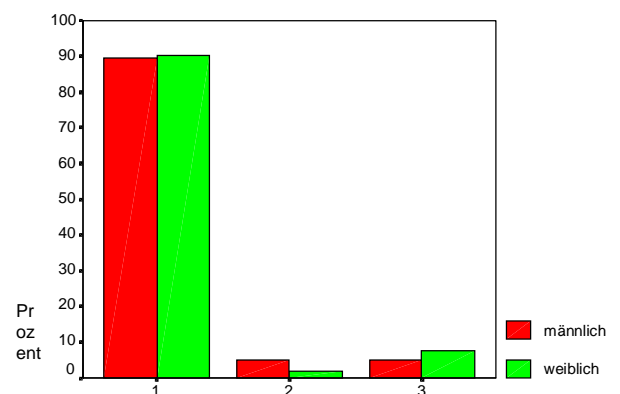


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Antwortverteilung der beiden Gruppen unterscheidet sich nach der Vielfeldertafel nicht signifikant¹⁸³. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der einzelnen Gruppen, ergibt sich bei beiden Gruppen keine Signifikanz¹⁸⁴.

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Fast alle Schüler/innen haben die richtige Möglichkeit gewählt.

¹⁸³ $\chi^2 = 2,463$, $p = 0,292$

¹⁸⁴ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 0,92$, $p = 0,631$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 1,074$, $p = 0,585$

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Auch hier haben fast alle Schüler/innen die Kufen gewählt.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei beiden Gruppen haben nahezu alle Schüler/innen die Metallkufen gewählt. Daher ist es auch nicht sinnvoll das Antwortverhalten nach dem Geschlecht differenziert genauer zu betrachten.

Zweiter Teil der Auswertung:

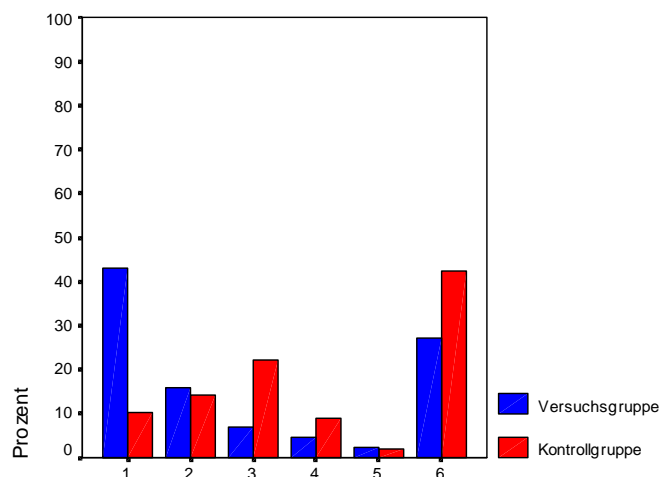
Bei den Schülern/Schülerinnen, die angaben, dass die Kufen kälter sind, wird nun die Begründung genauer untersucht.

Da bei beiden Gruppen ein sehr hoher Prozentsatz angab, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen, werden nur die Antworten dieser Schüler/innen weiter untersucht¹⁸⁵. Die Antworten der wenigen Schüler/innen, die etwas anderes angegeben haben, sind statistisch nicht mehr sinnvoll zu erfassen.

Antwortkategorien:

1. Metall ist ein besserer Wärmeleiter
2. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität
3. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an.
4. Die Metallkufen sind im Schnee
5. Die Temperatur wird vom Menschen falsch wahrgenommen
6. Sonstige oder keine Begründung

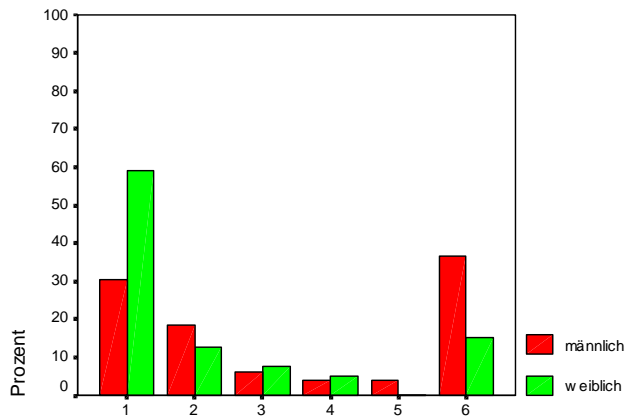
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



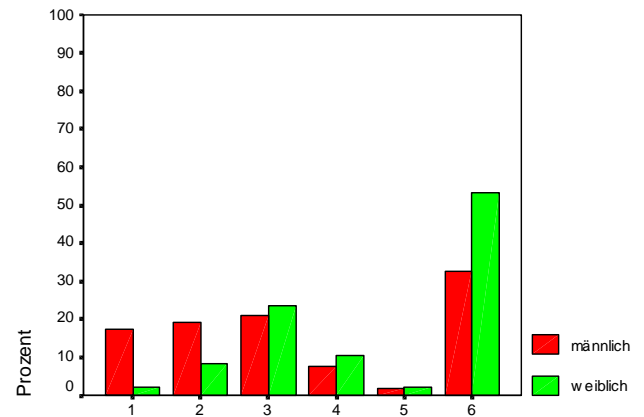
¹⁸⁵ Item 19a Ak. 1: Versuchsgruppe 97,5 %, Kontrollgruppe 90 %

Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Antwortverteilung der beiden Gruppen unterscheidet sich nach der Vielfeldertafel signifikant¹⁸⁶. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der einzelnen Gruppen, ergibt sich bei beiden Gruppen keine Signifikanz¹⁸⁷.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

43,2 % der Schüler/innen gaben die richtige Begründung für die Wahl der Metallkufen¹⁸⁸. Dabei geben deutlich, aber nicht signifikant mehr Mädchen als Jungen die richtige Begründung an¹⁸⁹.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier gibt ein Zehntel der Schüler/innen das Metall und die richtige Begründung an. Die Mädchen scheiden hier schlechter als die Jungen ab¹⁹⁰.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppe:

Es haben etwa vier mal so viele Schüler/innen der Versuchsgruppe wie Schüler/innen der Kontrollgruppe die richtige Begründung angegeben. Grund dafür ist, dass nur bei der Versuchsgruppe das physiologische Temperaturempfinden ausführlich besprochen wurde.

¹⁸⁶ $\chi^2 = 31,771$, $p = 0,000$

¹⁸⁷ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 9,817$, $p = 0,081$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 10,38$, $p = 0,065$

¹⁸⁸ Ak. 1

¹⁸⁹ Ak. 1.: Mädchen: 59 %, Jungen: 30,6 %

¹⁹⁰ Ak. 1.: Mädchen: 12,1 %, Jungen: 17,3 %

Während bei der Versuchsgruppe die Schülerinnen deutlich besser als die Schüler abschneiden, sind die Schülerinnen der Kontrollgruppe deutlich schlechter als ihre Mitschüler. Das ist die gleiche Tendenz wie sie schon beim Item 14 auftrat.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Bei der Untersuchung von Engel und Driver (siehe Kapitel 3.3/ Seite 34) ergab sich, dass 24 % der Schüler/innen bei einer ähnlichen Aufgabenstellung ihr physiologisches Temperaturempfinden mit Hilfe der Wärmeleitung begründet haben. Bei der Versuchsgruppe waren es 43,2 %, bei der Kontrollgruppe 10,1 % der Schüler/innen.

Die Werte können nicht direkt miteinander verglichen werden, da Duit bei seiner Untersuchung leider nicht angibt, inwieweit die von ihm untersuchten Schüler/innen mit der Problematik vor dem Test konfrontiert wurden.

Item 19 b und c:

An einem kalten Wintertag berührst du gleichzeitig die Kufen (Metall) und die Sitzfläche deines Schlittens (Holz).

b. Was ergibt sich, wenn du die Temperaturen der Kufen (Metall) und der Sitzfläche (Holz) mit einem Thermometer misst?

- Die Temperatur der Kufen ist höher als die Temperatur der Sitzfläche.
- Die Temperatur der Kufen ist gleich der Temperatur der Sitzfläche.
- Die Temperatur der Kufen ist geringer als die Temperatur der Sitzfläche.

c. Begründe deine Entscheidung.

Intention: Mit diesem Item zusammen mit dem Item 19a wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen ihre physiologische Erfahrung und die Messergebnisse in Einklang bringen können.

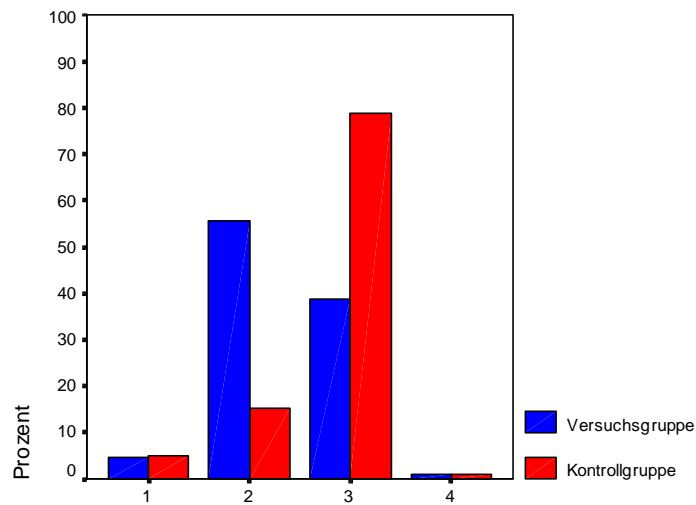
Erster Teil der Auswertung:

Es wird nur die Einschätzung der gemessenen Temperatur betrachtet. Da nahezu alle Schüler/innen bei dem Item 19a angaben, dass sich die Metallkufen kälter als das Holz anfühlen, werden nur die Antworten dieser Schülern/Schülerinnen genauer untersucht.

Antwortkategorien:

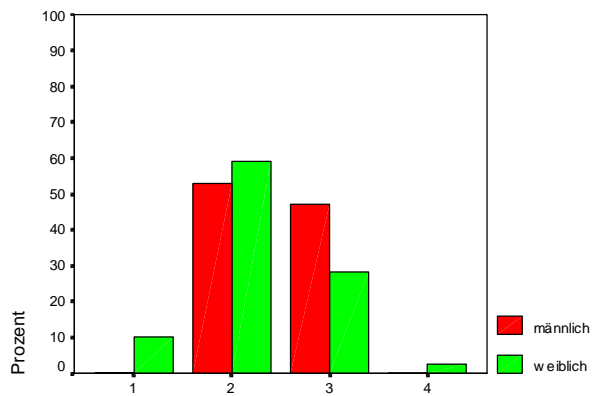
1. Die Temperatur der Kufen ist höher als die Temperatur der Sitzfläche
2. Die Temperatur der Kufen ist gleich der Temperatur der Sitzfläche
3. Die Temperatur der Kufen ist geringer als die Temperatur der Sitzfläche
4. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

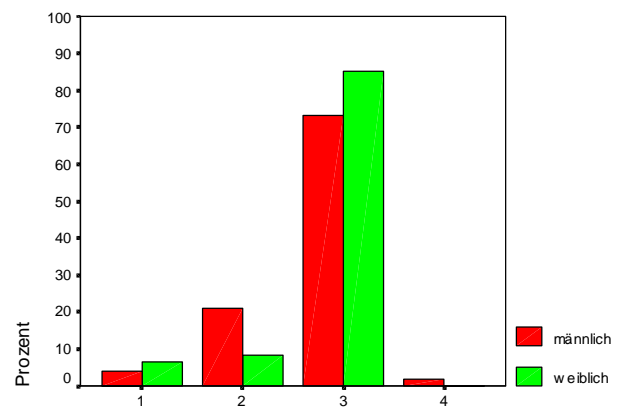


Antwortverhalten differenziert nach Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Das Antwortverhalten der beiden Gruppen ist nach der Vielfeldertafel signifikant unterschiedlich¹⁹¹. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen, so ergibt sich nach der Vielfeldertafel bei der Versuchsgruppe Signifikanz, bei der Kontrollgruppe jedoch nicht¹⁹².

¹⁹¹ $\chi^2 = 34,993$, $p = 0,000$

¹⁹² Versuchsgruppe: $\chi^2 = 8,391$, $p = 0,039$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 4,276$, $p = 0,223$

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

55,7 % der Schüler/innen geben an, dass die Sitzfläche aus Holz und die Kufen aus Metall die gleiche Temperatur besitzen. Über ein Drittel der Schüler/innen ist der Meinung, dass das Metall messbar kälter als das Holz ist¹⁹³. Die Mädchen haben die Aufgabe etwas häufiger richtig als die Jungen¹⁹⁴.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier geben 15,2 % der Schüler/innen die richtige Antwort. Etwa drei Viertel der Schüler/innen geben an, dass das Metall auch meßbar kälter als das Metall ist (Ak. 3: 78,8 %). Die Mädchen sind deutlich schlechter als die Jungen¹⁹⁵.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei beiden Gruppen wurden nur die Schüler/innen untersucht, die angaben, dass sich das Metall kälter als das Holz anfühlt. Die Schüler/innen, die der Meinung sind, dass das Metall auch messbar kälter als das Holz ist, sind folglich der Auffassung, dass ihre physiologische Temperaturempfindung die realen Temperaturen widerspiegelt. Bei der Versuchsgruppe sind das 38,6 %, bei der Kontrollgruppe 78,8 % der Schüler/innen. Die Prozentsätze sind erstaunlich hoch, denn in beiden Unterrichtskonzepten wird das physiologische Empfinden der Temperatur eines Körpers problematisiert. Die beiden Unterrichtskonzepte unterscheiden sich nur darin, dass nur bei der Versuchsgruppe auch eine Erklärung dafür gegeben wird, warum die physiologische Temperaturbestimmung nicht die reale Temperatur wiedergeben muss.

Aus dem Ergebnis des Items 19b folgt, dass die Schüler/innen die Diskrepanz zwischen dem physiologischen Temperaturempfinden und der realen Temperatur eines Körpers meist nur dann annehmen, wenn sie auch verstanden haben, warum dies so ist.

Bei diesem Item sind die Mädchen der Versuchsgruppe besser als ihre Mitschüler, bei der Kontrollgruppe sind die Mädchen deutlich schlechter.

Man kann die Ergebnisse des Items 19 b nicht nur unter dem Aspekt der Diskrepanz zwischen physiologischer Temperaturmessung und Angabe der realen Temperaturwerte betrachten. Diese Aufgabe zeigt wie bereits die Aufgabe 15a, inwieweit die Schüler/innen das Prinzip des thermischen Gleichgewichts verstanden haben. Dazu stellt man am besten die Ergebnisse der beiden entsprechenden Items 15a und 19b einander gegenüber.

Item	richtige Antworten in %	
	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
15a (Satellit im Weltraum)	63,0 %	60,9 %
19b (Metallkufe und Holz eines Schlittens)	55,7 %	15,2 %

¹⁹³ Ak. 3: 38,6 %

¹⁹⁴ Ak. 2: Mädchen: 59 %, Jungen: 53,1 %

¹⁹⁵ Ak. 2: Mädchen: 8,5 % , Jungen: 21,2 %

Die Tabelle zeigt, dass bei der Versuchsgruppe die Lösungshäufigkeit nahezu unabhängig vom Kontext ist. Bei der Kontrollgruppe hängt sie jedoch sehr stark von der Aufgabenstellung ab. Die Schüler/innen der Kontrollgruppe lassen sich von ihrer physiologischen Temperaturerfahrung leiten und stellen diese Erfahrung über das Prinzip des thermischen Gleichgewichts.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

37,8 % der von Fleischer (1991) untersuchten Schüler/innen waren auch nach der Behandlung der Wärmelehre der Meinung, dass blankes Metall im Zimmer eine niedrigere Temperatur als Holz hat. Leider gibt Fleischer nicht an, ob bei den von ihm untersuchten Schülern/Schülerinnen das thermische Gleichgewicht besprochen wurde. Die Aufgabenstellung von Fleischer entspricht in etwa der Aufgabenstellung vom Item 19b. 38,6 % der Versuchsgruppe und 78,8 % der Kontrollgruppe geben an, dass die Metallkufen des Schlittens eine geringere Temperatur als das Holz aufweisen. Der von Fleischer ermittelte Wert stimmt sehr gut mit dem Wert der Versuchsgruppe überein. Daher ist anzunehmen, dass bei den Schülern/Schülerinnen, die er untersucht hat, das thermische Gleichgewicht problematisiert wurde.

Zweiter Teil der Auswertung:

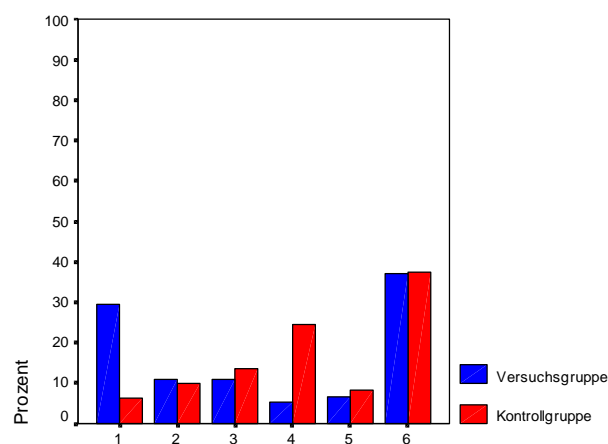
Neben der Auswahl der Höhe der Körpertemperaturen, wird jetzt noch die zugehörige Begründung betrachtet.

Antwortkategorien:

1. Überall herrscht die gleiche Umgebungstemperatur
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an.
5. Die Metallkufen sind im Schnee
6. Sonstige oder keiner Begründung

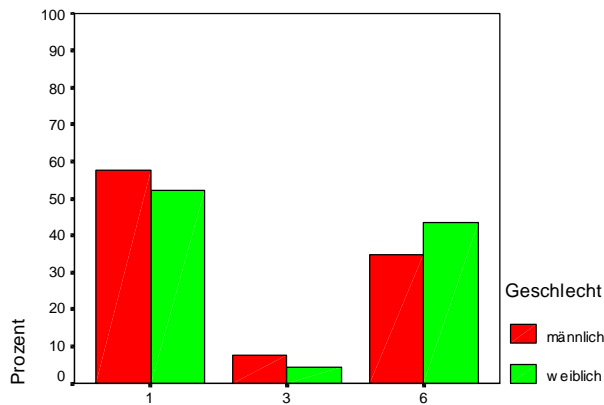
Schüler/innen bei denen die Temperaturen der Kufen und der Sitzfläche gleich sind:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

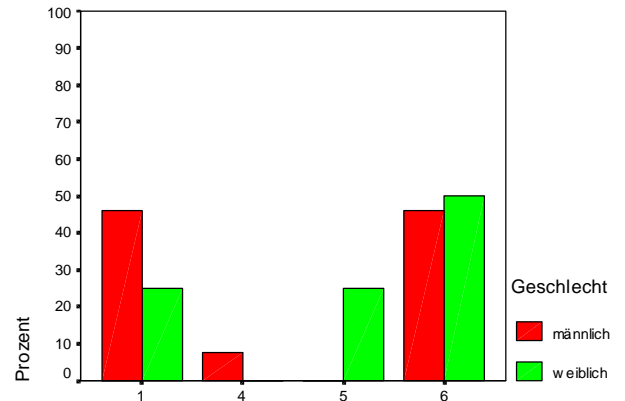


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



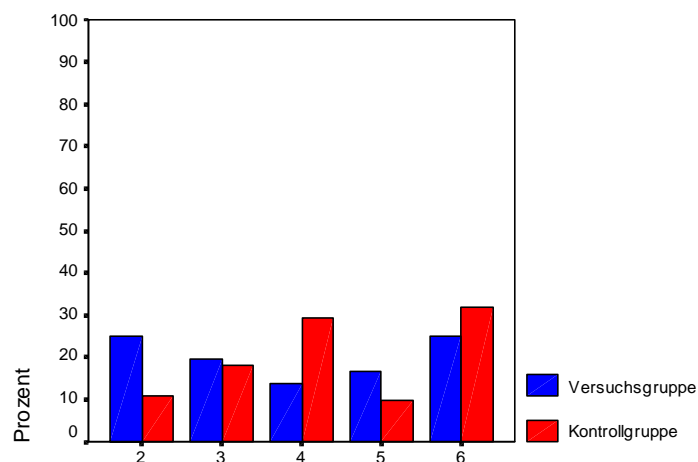
Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Versuchsgruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant¹⁹⁶. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach der Vielfeldertafel keine Signifikanz¹⁹⁷.

Schüler/innen bei denen die Temperatur der Kufen geringer ist als die Temperatur der Sitzfläche:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

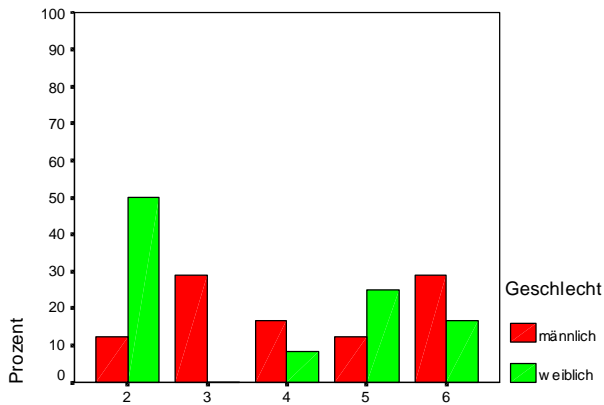


¹⁹⁶ $\chi^2 = 7,610$, $p = 0,107$

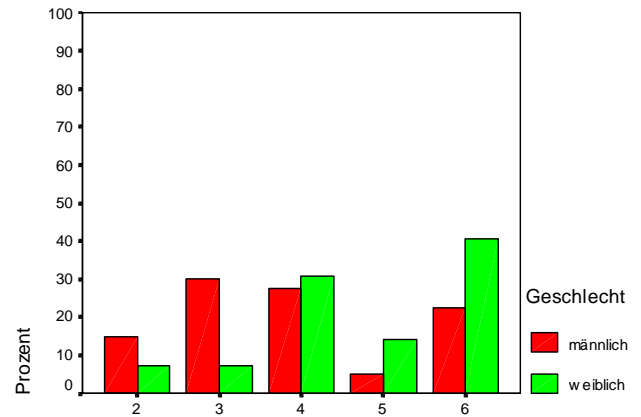
¹⁹⁷ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 0,538$, $p = 0,764$, Kontrollgruppe $\chi^2 = 3,799$, $p = 0,284$

Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel nicht signifikant¹⁹⁸. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der Versuchsgruppe, ergibt sich bei beiden Gruppen nach der Vielfeldertafel keine Signifikanz¹⁹⁹. Bei der Kontrollgruppe ergibt sich ein signifikanter Zusammenhang²⁰⁰.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Schüler/innen, welche die Temperatur von Kufen und Sitzfläche gleich gewählt haben:

Über die Hälfte der Schüler/innen gibt an, dass die Kufen und die Sitzfläche die gleiche Temperatur haben, da überall die Umgebungstemperatur gleich ist²⁰¹. Der Rest begründet seine Wahl falsch. Das Antwortverhalten von Jungen und Mädchen unterscheidet sich fast nicht.

Schüler/innen, die die Temperatur der Kufen geringer als die Temperatur der Sitzfläche gewählt haben:

55,8 % der Schüler/innen begründen ihre Wahl mit einer Eigenschaft des Metalls²⁰².

¹⁹⁸ $\chi^2 = 6,268$, $p = 0,180$

¹⁹⁹ $\chi^2 = 7,816$, $p = 0,099$

²⁰⁰ $\chi^2 = 11,818$, $p = 0,019$

²⁰¹ Ak. 1: 55,1%

²⁰² Ak. 2, 3 und 4

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Schüler/innen, die die Temperatur von Kufen und Sitzfläche gleich gewählt haben:
Hier geben etwas weniger als die Hälfte der Schüler/innen eine korrekte Begründung an²⁰³. Die Mädchen sind dabei sehr viel schlechter als die Jungen²⁰⁴.

Schüler/innen, die die Temperatur der Kufen geringer als die Temperatur der Sitzfläche gewählt haben:
57,7 % der Schüler/innen begründen ihre Wahl mit einer Eigenschaft des Metalls²⁰⁵.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Das Antwortverhalten der Schüler/innen differiert zwischen den beiden Gruppen in beiden Fällen nicht sehr stark. So begründet in beiden Gruppen knapp die Hälfte der Schüler/innen ihre Angabe, dass das Metall und das Holz die gleiche Temperatur haben, damit, dass überall die gleiche Umgebungstemperatur herrscht²⁰⁶.

Item 13:

Man gibt einen Körper der Temperatur 22 °C in eine geeignete Kühlapparatur, die dem Körper in den ersten 10 Minuten so viel innere Energie entzogen hat, dass der Körper nur noch eine Temperatur von 2 °C hat. Welche Temperatur hat der Körper nach 5 Stunden? (Es wird – sofern möglich – dem Körper pro Zeiteinheit immer die gleiche Wärme entzogen.) (Diese Aufgabe ist zu berechnen!)

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen die Existenz des Temperaturnullpunktes verinnerlicht haben.

Antwortkategorien:

1. Richtige Antwort (-273,1 °C)
2. Temperatur unter – 273,1 °C
3. Sonstige und keine Antwort

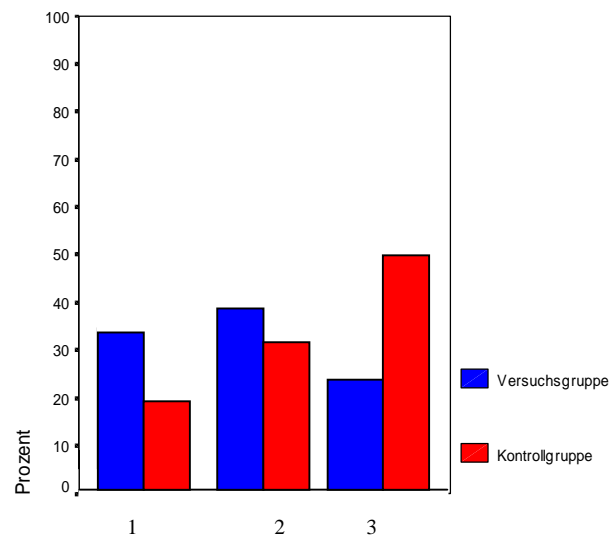
²⁰³ Ak. 1: 46,7 %

²⁰⁴ Ak. 1: Mädchen: 25 % , Jungen: 54,5 %

²⁰⁵ Ak. 2, 3 und 4

²⁰⁶ Ak. 1: Versuchsgruppe: 55,1 % , Kontrollgruppe: 46,7 %

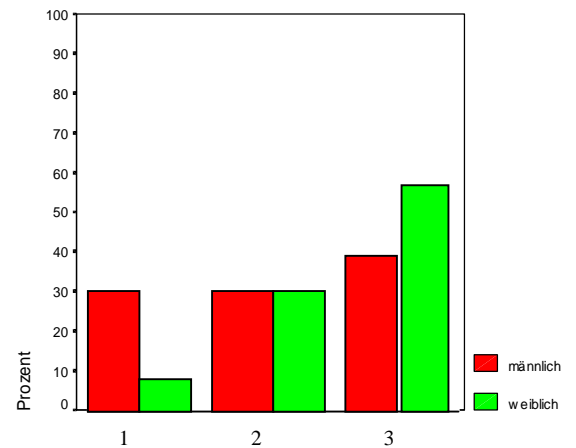
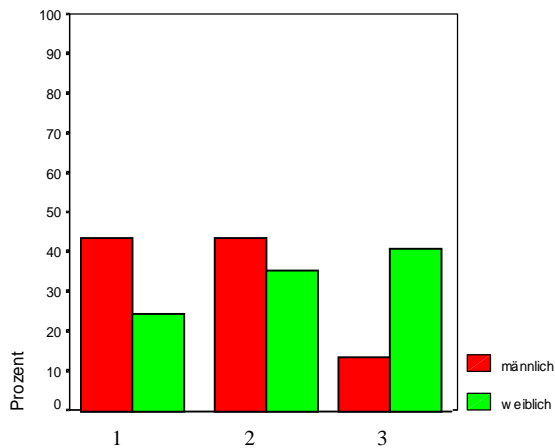
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:

Kontrollgruppe:



Der U-Test von Mann und Withney ergibt, dass die Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgabe signifikant öfter richtig bearbeitet haben als die Schüler/innen der Kontrollgruppe²⁰⁷. Die Antwortverteilung weist nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test zwischen beiden Gruppen keinen signifikanten Unterschied auf²⁰⁸. Nach dem U-Test von Mann und Withney sind die Jungen der Kontrollgruppe signifikant besser als ihre Mitschülerinnen, bei der Versuchsgruppe zeigt sich keine Signifikanz²⁰⁹. Die Antwortverteilung von Jungen und Mädchen ist bei beiden Gruppen nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test nicht signifikant unterschiedlich²¹⁰.

²⁰⁷ $p = 0,018$

²⁰⁸ $p = 0,224$

²⁰⁹ Versuchsgruppe: $p = 0,086$, Kontrollgruppe: $p = 0,002$

²¹⁰ Versuchsgruppe: $p = 0,507$, Kontrollgruppe: $p = 0,101$

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Etwas mehr als ein Drittel der Schüler/innen hat die Aufgabe richtig beantwortet²¹¹. Die Mädchen lösen die Aufgabe deutlich, wenn auch nicht signifikant schlechter als die Jungen²¹².

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier hat nur ein Fünftel der Schüler/innen die Aufgabe richtig beantwortet. Dabei bearbeiten die Mädchen die Aufgabe signifikant schlechter als ihre Mitschüler²¹³.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe haben die Aufgabe ca. 1,7 mal so oft richtig wie die Schüler/innen der Kontrollgruppe. Bei beiden Gruppen schneiden die Mädchen schlechter als die Jungen ab.

Item	richtige Antworten in %	
	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
15a (Satellit im Weltraum)	63,0 %	60,9 %
19b (Metallkufe und Holz eines Schlittens)	55,7 %	15,2 %

Die Tabelle zeigt, dass bei der Versuchsgruppe die Lösungshäufigkeit nahezu unabhängig vom Kontext ist. Bei der Kontrollgruppe hängt sie jedoch sehr stark von der Aufgabenstellung ab. Die Schüler/innen der Kontrollgruppe lassen sich von ihrer physiologischen Temperaturerfahrung leiten und stellen diese Erfahrung über das Prinzip des thermischen Gleichgewichts.

Statistischer Zusammenhang der Items 13, 15a, 15b, 19a, 19b, 19c und 21.

Die folgende Tabelle stellt den statistischen Zusammenhang der in diesem Kapitel besprochenen Items mit Hilfe des χ^2 -Tests dar. In der Tabelle sind die asymptotischen Signifikanzen p eingetragen.

Versuchsgruppe:

Item	13	15a	15b	19a	19b	19c	21
13		0,367	0,747	0,175	0,758	0,403	0,208
15a	0,367		0,000	0,000	0,104	0,497	0,429
15b	0,747	0,000		0,848	0,419	0,245	0,298
19a	0,175	0,000	0,848		0,002	0,824	0,530
19b	0,758	0,104	0,419	0,002		0,000	0,571
19c	0,403	0,497	0,245	0,824	0,000		0,670
21	0,208	0,429	0,298	0,530	0,571	0,670	

²¹¹ 34,8 %

²¹² Mädchen: 25 %, Jungen: 42,3 %

²¹³ Mädchen: 7,7 %, Jungen: 31 %

Kontrollgruppe:

Item	13	15a	15b	19a	19b	19c	21
13		0,044	0,413	0,217	0,763	0,461	0,781
15a	0,044		0,000	0,488	0,608	0,490	0,937
15b	0,413	0,000		0,554	0,014	0,649	0,246
19a	0,217	0,488	0,554		0,000	0,364	0,116
19b	0,763	0,608	0,014	0,000		0,000	0,194
19c	0,461	0,490	0,649	0,364	0,000		0,083
21	0,781	0,937	0,246	0,116	0,194	0,083	

Beim Antwortverhalten gibt es zwischen den einzelnen Items fast keine statistischen Zusammenhänge. Irgendwelche auffällige Verbindungen können zwischen den einzelnen Items nicht erkannt werden.

Zusammenfassung der Auswertung zum nullten Hauptsatz und zur Temperatur:

Grundlagen der Temperaturmessung (nullter Hauptsatz der Wärmelehre):

67,5 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe erklären physikalisch richtig, warum eine Temperaturmessung möglich ist²¹⁴. Bei der Kontrollgruppe beträgt dieser Prozentsatz nur 5,5 %. Hier weicht fast ein Drittel der Schüler/innen der Fragestellung insoweit aus, als das nur die Funktionsweise des Thermometers beschrieben wird²¹⁵. Bei der Versuchsgruppe lösen ca. 60 % der Schüler/innen die jeweiligen Aufgaben zum thermischen Gleichgewicht²¹⁶. Bei der Kontrollgruppe hängt die Anzahl der richtigen Lösungen sehr stark vom entsprechenden Kontext ab. Sie liegt zwischen 60,9 % und 15,2 %. Das Item, bei dem die Schüler/innen bereits eine physiologische Vorerfahrung haben, wird deutlich seltener richtig gelöst²¹⁷.

Verständnis dafür, dass physiologische Vorgänge eine Messung der Temperatur mit Hilfe der Haut unmöglich machen:

Bei beiden Gruppen sind fast alle Schüler/innen der Meinung, dass sich die Kufen eines Schlittens kälter anfühlen als seine hölzerne Sitzfläche²¹⁸. Dabei argumentieren 43,2 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe damit, dass das Metall eine bessere Wärmeleitfähigkeit als das Holz hat. Bei der Kontrollgruppe sind es nur 10,1 %. 55,7 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe geben an, dass das Metall sich kälter anfühlt²¹⁹, das Holz und das Metall aber die gleiche Temperatur besitzen²²⁰. Bei der Kontrollgruppe beträgt dieser Prozentsatz nur 15,2 %. Bei der Versuchsgruppe ist der Anteil der Schüler/innen, die der Metallkufe und dem Holz die gleiche Temperatur zuschreiben

²¹⁴ Item 21: Ak. 1, 2 und 3

²¹⁵ Item 21: Ak. 6: 31,8 %

²¹⁶ Item 15a: 63,0 %; Item 19b: 55,7 %

²¹⁷ Item 15a: 60,9 % (ohne physiologische Vorerfahrung); Item 19b: 15,2 % (mit physiologischer Vorerfahrung)

²¹⁸ Item 19a: Versuchsgruppe: 95,7 %, Kontrollgruppe: 90%

²¹⁹ Item 19b

²²⁰ Item 19 b

und gleichzeitig die richtige Begründung wählen, etwas größer als bei der Kontrollgruppe²²¹.

Der absolute Temperatur-Nullpunkt:

34,8 % Schüler/innen der Versuchsgruppe erkennen, dass ein Kühlapparat nicht auf eine Temperatur von unter -273.1 °C kühlen kann. Bei der Kontrollgruppe sind es dagegen nur 20 % der Schüler/innen. Bei der Versuchsgruppe schneiden die Mädchen deutlich, bei der Kontrollgruppe sogar signifikant schlechter als die Jungen ab²²².

Diskussion:

Wie auf Grund der unterschiedlichen didaktischen Ansätze zu erwarten, können deutlich mehr Schüler/innen der Versuchsgruppe erklären, warum man Temperaturen überhaupt messen kann. Die Erklärung der Funktionsweise eines Thermometers, auf das sich das konventionelle Konzept beschränkt, reicht also beim weitem nicht aus um den Inhalt des Nullten Hauptsatzes zu verstehen.

Bei der Versuchsgruppe erkennen etwa die Hälfte der Schüler/innen, dass die Physiologie eine exakte Messung der Temperatur mit Hilfe der Haut unmöglich macht. Bei der Kontrollgruppe sind dies zirka 15 %. Das Ergebnis scheint auf den ersten Blick erstaunlich. Denn bei beiden Gruppen werden die physiologischen Vorgänge problematisiert. Grund dafür, dass die Versuchsgruppe deutlich besser als die Kontrollgruppe abschneidet, liegt sicherlich darin begründet, dass im Gegensatz zum konventionellen Unterrichtskonzept das Münchner Unterrichtskonzept erklärt, warum der physiologische Eindruck täuschen kann.

Dass mehr Schüler/innen der Versuchsgruppe erkennen, dass die Temperatur von 0 K nicht unterschritten werden kann, liegt höchst wahrscheinlich darin begründet, wie der absolute Temperaturnullpunkt erklärt wird. Während beim konventionellen Unterrichtskonzept der Temperaturnullpunkt recht abstrakt bei der Behandlung der Gasgesetze eingeführt wird, erfolgt die Erklärung beim Münchner Unterrichtsmodell sehr viel anschaulicher. Hier wird die Temperatur von 0 K als die Temperatur beschrieben, bei dem einem Körper keine Energie mehr entzogen werden kann. Bei dieser Temperatur schwingen die Gitterteilchen nur noch sehr schwach um ihre Ruhelage.

²²¹ Item 19c: Versuchsgruppe: 55,1 %, Kontrollgruppe: 46,7 %

²²² Item 13: Versuchsgruppe: Mädchen: 25 %, Jungen: 42,3 %,
Kontrollgruppe: Mädchen: 7,7 %, Jungen: 31 %

5.4.3.5 Items zur inneren Energie und zum ersten Hauptsatz der Wärmelehre

Die Items 10, 11a, 11b, 16, 17 und 20 des Lernerfolgstests II können den Themenkreisen innere Energie und erster Hauptsatz der Wärmelehre zugeordnet werden. Anhand dieser Items wurde untersucht, welche Vorstellung die Schüler/innen von der inneren Energie haben und inwieweit sie den ersten Hauptsatz der Wärmelehre anwenden können. Des weiteren zeichnen einige Items ein genaueres Bild vom Verständnis des ersten Hauptsatzes. Anhand dieser Items kann angegeben werden, welchen Zusammenhang die Schüler/innen zwischen der inneren Energie, der mechanischen Arbeit und der mechanischen Energie erkennen.

Item 16:

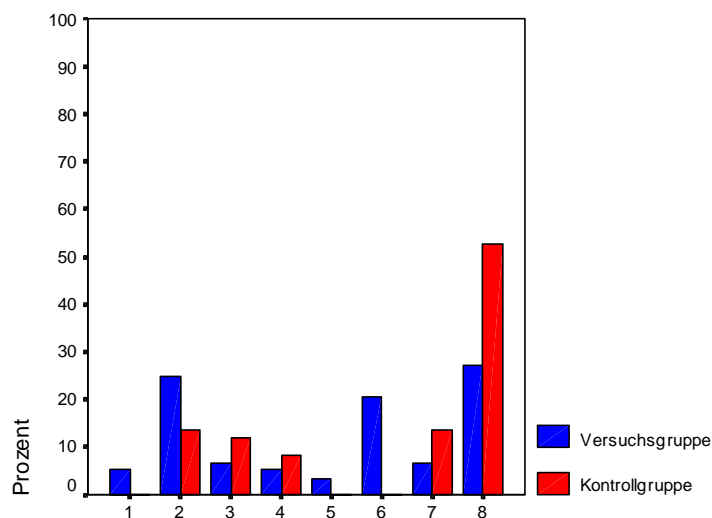
Was verstehst du unter dem Begriff "innere Energie"?

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, was sich die Schüler/innen unter der inneren Energie vorstellen.

Antwortkategorien:

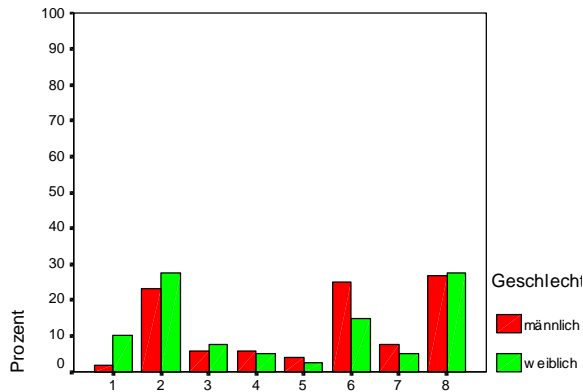
1. $\Delta E_i = Q + W$
2. E_i ist die Energie, die ein Körper in sich hat
3. E_i ist die Energie, die ein Körper hat
4. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen der Teilchenbewegung hat
5. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen seiner Temperatur hat
6. $E_i =$ Summe über die Energien aller Teilchen ($E_{kin} + E_{pot}$)
7. E_i ist gleich der Wärme
8. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

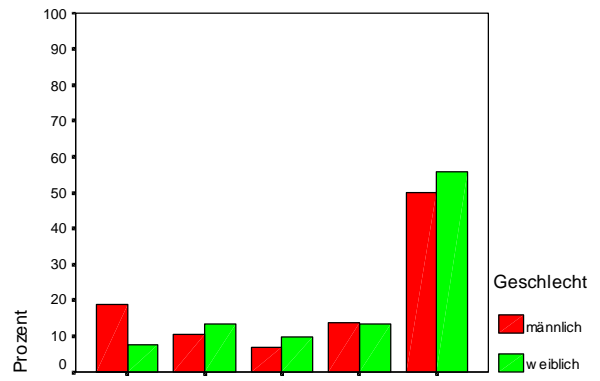


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel signifikant¹. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Versuchsgruppen, ergibt sich bei beiden Unterrichtskonzepten nach der Vielfeldertafel keine Signifikanz².

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

5,4 % der Schüler/innen definieren die innere Energie über den ersten Hauptsatz der Wärmelehre³. Weniger abstrakt sehen 31,5 % der Schüler/innen die innere Energie, denn diese ist für sie die Energie, die ein Körper (in sich) hat⁴. Weitere 26,1 % konkretisieren diese Ansicht. Ihr Zugang zur inneren Energie geht über die mikroskopische Betrachtung⁵. Dieser Anteil ist erstaunlich hoch, denn die mikroskopische Betrachtung wurde nur kurz bei der Einführung des absoluten Nullpunkts herangezogen. Während deutlich mehr Mädchen die innere Energie mit Hilfe des 1. Hauptsatzes beschreiben, erklären deutlich mehr Jungen die innere Energie mit Hilfe der Energien der einzelnen Teilchen⁶.

¹ $\chi^2 = 48,162$, $p = 0,000$

² Versuchsgruppe: $\chi^2 = 4,494$, $p = 0,721$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 3,204$, $p = 0,524$

³ Ak 1

⁴ Ak. 2 und 3

⁵ Ak. 4 und 6

⁶ Ak. 1: Mädchen: 10 %, Jungen: 1,9 %,
Ak. 6: Mädchen: 15 %, Jungen 25 %

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

25,4 % verstehen unter der inneren Energie die Energie, die ein Körper (in sich) hat⁷. Nur 8,2 % der Schüler/innen bringen die innere Energie mit Teilchenbewegungen in Zusammenhang. Das sind erstaunlich wenige Schüler/innen, denn auch beim konventionellen Unterrichtskonzept wird vermittelt, dass es einen Zusammenhang zwischen der inneren Energie und der Teilchenbewegung gibt. Ein sehr hoher Anteil von 66,3 % der Schüler/innen hat keine oder eine falsche Vorstellung von der inneren Energie⁸. Die Mädchen beschreiben etwas seltener als ihre Mitschüler die innere Energie als die Energie, die ein Körper in sich hat⁹. Ansonsten unterscheiden sich Jungen und Mädchen in ihrem Antwortverhalten nicht.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei der Versuchsgruppe ist die Streubreite der Antworten sehr hoch. Hierbei herrscht am ehesten die Vorstellung vor, dass die innere Energie sich im Inneren der Körper verbirgt¹⁰. Bei der Kontrollgruppe ist diese Sichtweise auch weit verbreitet¹¹. Die meisten Schüler/innen der Kontrollgruppe sind jedoch nicht in der Lage eine sinnvolle Beschreibung der inneren Energie zu geben¹². Das Antwortverhalten von Jungen und Mädchen zeigt bei beiden Gruppen ein völlig undifferenziertes Bild.

Item 17:

In einem Styroporbehälter befinden sich $m_k = 400$ g kaltes Wasser der Temperatur $\vartheta_k = 15^\circ\text{C}$ und eine kleine Bleikugel (15°C). Nun gießt man in diesen Styroporbehälter zusätzlich $m_w = 300$ g Wasser der Temperatur $\vartheta_w = 70^\circ\text{C}$. Die Mischtemperatur beträgt $\vartheta_M = 30^\circ\text{C}$. Berechne die Änderung der inneren Energie der Bleikugel.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen den ersten Hauptsatz der Wärmelehre anwenden können.

Antwortkategorien:

1. Richtiger Ansatz
2. Sonstige oder keine Antwort

⁷ Ak. 2 und 3

⁸ Ak. 7 und 8

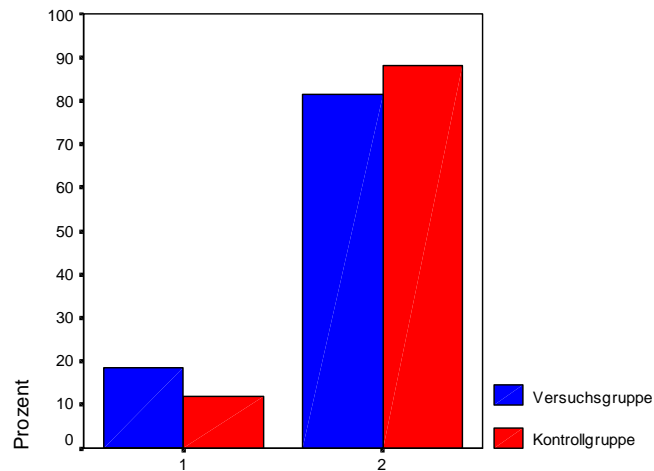
⁹ Ak. 2 und 3: Mädchen: 21,2 %, Jungen: 29,3 %

¹⁰ Ak. 2, 3, 4 und 6: Versuchsgruppe: 57,6 %

¹¹ Ak. 2, 3, 4 und 6: Kontrollgruppe: 33,6 %

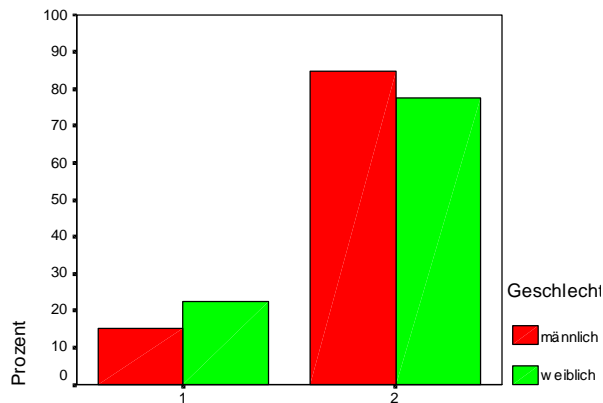
¹² geben (Ak. 7 und 8: Versuchsgruppe: 33,7 %, Kontrollgruppe: 66,3 %

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

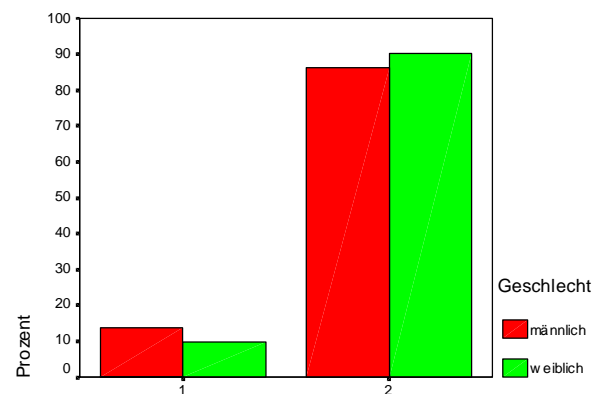


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



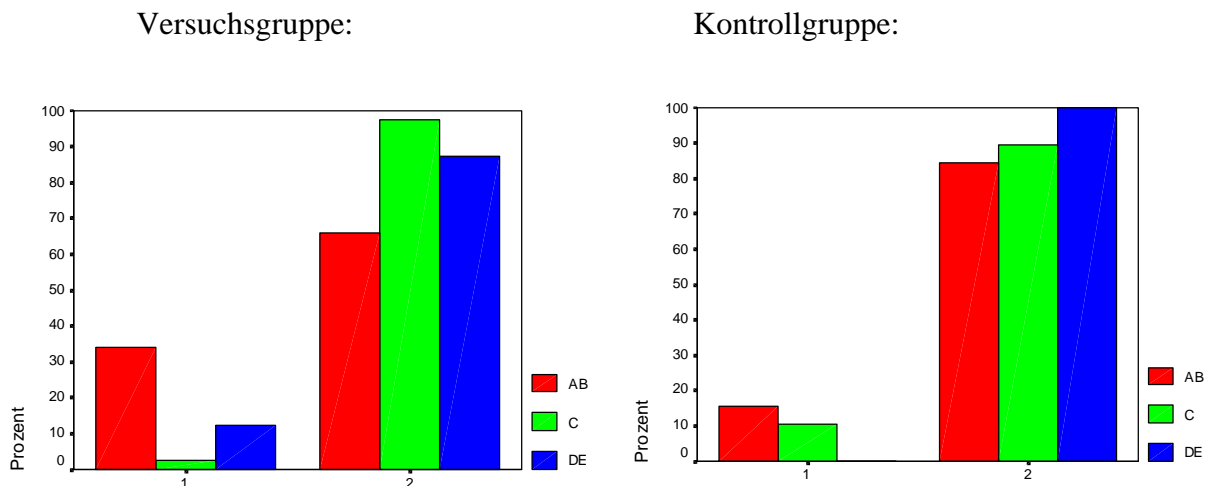
Sowohl der U-Test von Mann und Withney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigen, dass sich die Antwortverteilungen der beiden Gruppen nicht signifikant unterscheiden¹³. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Versuchsgruppen, ergeben der U-Test von Mann und Withney und der Kolmogorov-Smirnov-Test, dass auch hier im Antwortverhalten keine signifikanten Unterschiede auftreten¹⁴.

¹³ U-Test von Mann und Withney: $p = 0,186$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,979$

¹⁴ Versuchsgruppe: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,386$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$;
Kontrollgruppe: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,500$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$

Da der Kruskal-Wallis-Test bei der Versuchsgruppe einen signifikanten Zusammenhang zwischen den zusammengefassten IQ-Klassen und dem Antwortverhalten ergibt, wird dieser Zusammenhang näher untersucht¹⁵.

Antwortverhalten differenziert nach den zusammengefassten IQ-Gruppen:



Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Nur 18,5 % der Schüler/innen haben diese Aufgabe richtig gelöst. Dabei waren die intelligentesten Schüler/innen deutlich erfolgreicher als die anderen Schüler/innen. Erstaunlich ist dabei, dass die weniger intelligenten Schüler/innen besser abschnitten als die durchschnittlich intelligenten Schüler/innen¹⁶. Die Mädchen lösen diese Aufgabe häufiger richtig als die Jungen¹⁷.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Diese Aufgabe haben 11,8 % der Schüler/innen richtig. Es gelang nur den intelligentesten und den durchschnittlich intelligenten Schülern/Schülerinnen diese Aufgabe richtig zu lösen¹⁸. Die Mädchen lösen diese Aufgabe nicht so häufig wie ihre Mitschüler¹⁹.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei beiden Gruppen haben nur wenige Schüler/innen die Aufgabe richtig gelöst. Das ist eigentlich nicht zu verstehen, denn bei beiden Unterrichtskonzepten werden solche Mischungversuche besprochen.

¹⁵Versuchsgruppe: $p = 0,001$, Kontrollgruppe: $p = 0,320$

¹⁶Ak. 1: AB: 34,1 %, C: 2,5 %, DE: 12,5 %

¹⁷Mädchen: 22,5 %, Jungen: 15,4 %

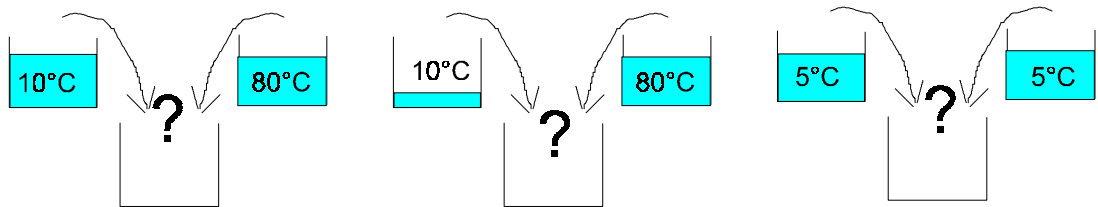
¹⁸AB: 15,7 %, C: 10,4 %, DE: 0 %

¹⁹Mädchen: 9,6 %, Jungen: 13,8 %

Auch bei dieser Rechenaufgabe zeigt sich, dass die Mädchen der Versuchsgruppe besser als ihre Mitschüler abschneiden, bei der Kontrollgruppe ist dies genau anders herum.

Item 10:

In den untenstehenden Zeichnungen wird aus zwei verschiedenen Behältern Wasser zusammengeschüttet. Schreibe in die noch leeren Mischbehälter, welche Mischtemperatur sich deiner Meinung nach ungefähr ergibt. Eine Rechnung ist nicht notwendig!



Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen den ersten Hauptsatz der Wärmelehre intuitiv anwenden können.

Antwortkategorien:

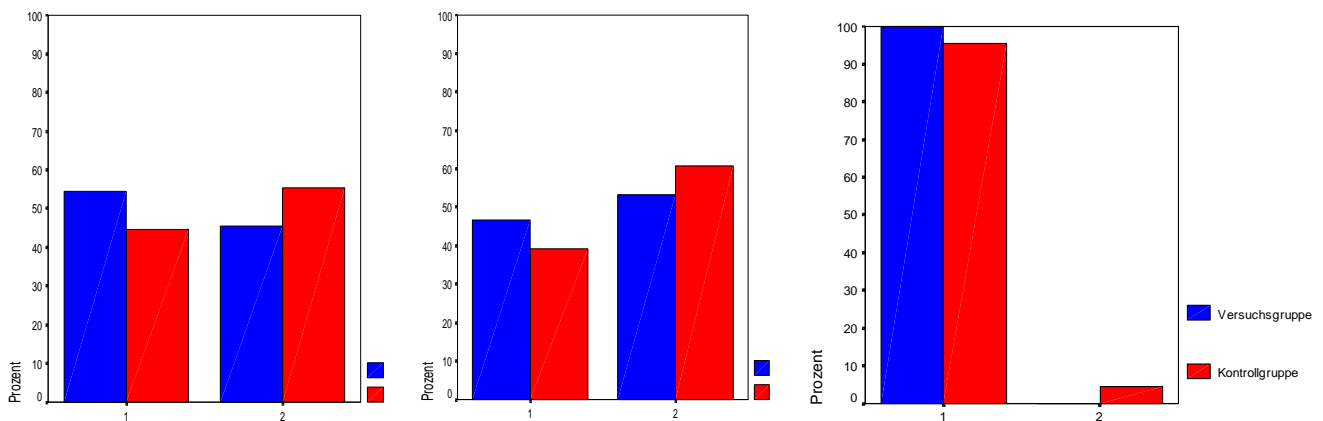
1. Richtige Temperatur (Bei dem linken und dem mittleren Bild bis zu einer Abweichung von 3°C ; beim rechten Bild nur bei der Angabe von 5°C)
2. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

linkes Bild:

mittleres Bild:

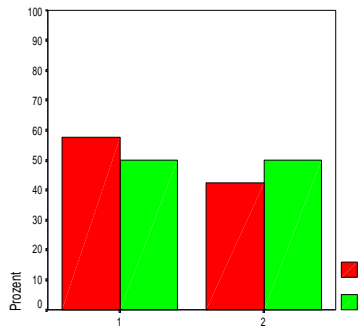
rechtes Bild:



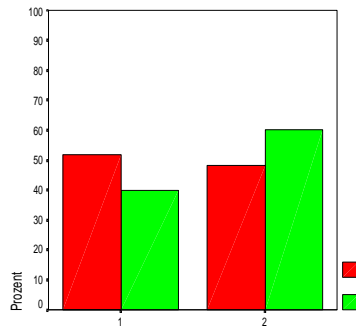
Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:

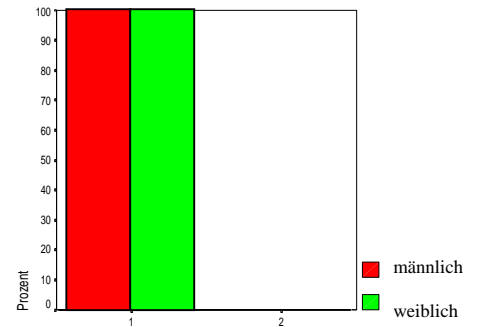
linkes Bild:



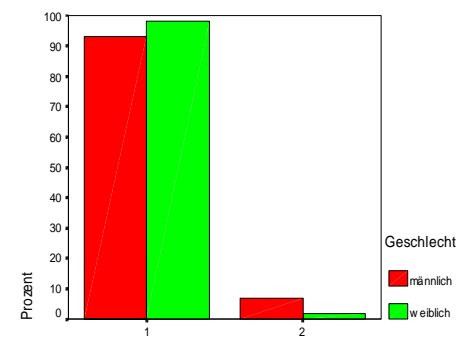
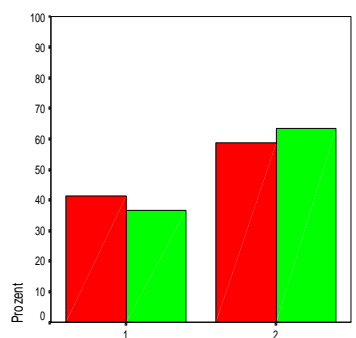
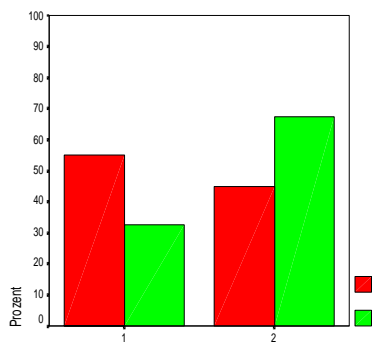
mittleres Bild:



rechtes Bild:



Kontrollgruppe:



Sowohl der Kolmogorov-Smirnov-Test als auch der U-Test von Mann und Withney ergeben, dass sich die Antwortverteilung der beiden Gruppen beim linken und mittleren Bild nicht signifikant unterscheiden²⁰. Beim rechten Bild löst die Versuchsgruppe nach dem U-Test von Mann und Withney die Aufgabe signifikant häufiger, die Antwortverteilungen unterscheiden sich aber nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test nicht signifikant²¹.

Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen innerhalb der Versuchsgruppe, ergibt sich nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test und nach dem U-Test von Mann und Withney für keines der Bilder Signifikanz²². Bei der Kontrollgruppe zeigt der U-Test von Mann und Withney, dass beim linken Bild die Mädchen signifikant häufiger die falsche Antwort gaben. Ansonsten unterscheiden

²⁰ linkes Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,166$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,722$, mittleres Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,275$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,931$

²¹ U-Test von Mann und Withney: $p = 0,039$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$

²² linkes Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,465$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,999$, mittleres Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,258$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,905$, rechtes Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 1,000$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$

sich auch hier Antwortverteilung und Anzahl der richtigen Antworten bei keinem der Bilder signifikant²³.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Beim linken Bild, bei dem beide Flüssigkeiten das gleiche Volumen haben, geben erwartungsgemäß mehr Schüler/innen die richtige Temperatur als beim mittleren Bild an, bei dem die Mischtemperatur sehr viel schwerer einzuschätzen war²⁴. Das rechte Bild beantworten alle Schüler/innen richtig. Bei dem linken und dem mittleren Bild geben die Mädchen seltener die richtige Mischtemperatur als ihre Mitschüler an.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Auch hier geben beim linken Bild mehr Schüler/innen die richtige Temperatur an als beim mittleren Bild an²⁵. Die Mischtemperaturen werden von den Mädchen beim linken und mittleren Bild seltener richtig angegeben als von ihren Mitschülern.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Erwartungsgemäß schneiden beide Gruppen beim linken Bild im Vergleich zum mittleren Bild besser ab. Grund dafür ist, dass beim linken Bild die Flüssigkeitsvolumina der ursprünglich vorhandenen Flüssigkeiten gleich sind. Die Mischtemperatur ist damit einfacher abzuschätzen. Die Versuchsgruppe weist immer mehr richtige Antworten als die Kontrollgruppe auf, der Unterschied ist jedoch auf dem 5 % Niveau nicht signifikant. Bei beiden Gruppen sind die Mädchen beim linken und mittleren Bild schlechter als ihre Mitschüler.

Item 20:

Ein heißes Gas ($m = 10 \text{ g}$, $c = 0,1 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$) drückt den Kolben (30 g) eines Kolbenprobers (sieht aus wie eine Spritze) um $4,2 \text{ cm}$ nach oben. Berechne, um wieviel sich die Temperatur des Gases dabei verringert hat.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, ob die Schüler/innen den Zusammenhang von mechanischer Energie und innerer Energie erkennen.

Antwortkategorien:

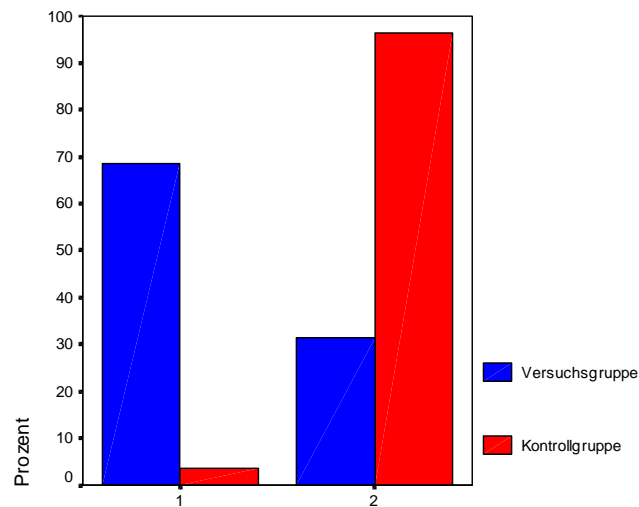
1. Richtige Antwort ($E_h = \Delta E_i$)
2. Sonstige und keine Antwort

²³ linkes Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,018$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,125$, mittleres Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,605$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,00$, rechtes Bild: U-Test von Mann und Withney: $p = 0,213$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$

²⁴ Ak. 1: linkes Bild: $54,3 \%$, mittleres Bild: $46,7 \%$

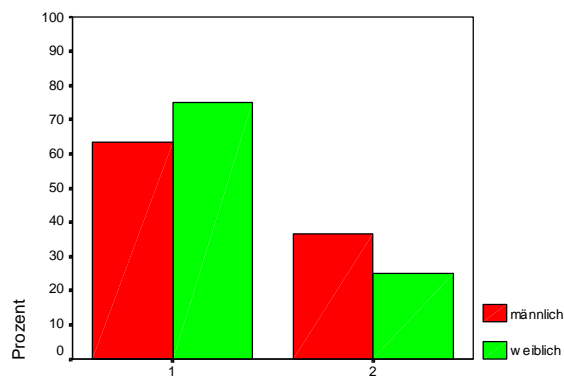
²⁵ Ak. 1: linkes Bild: $44,5 \%$, mittleres Bild: $39,1 \%$

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

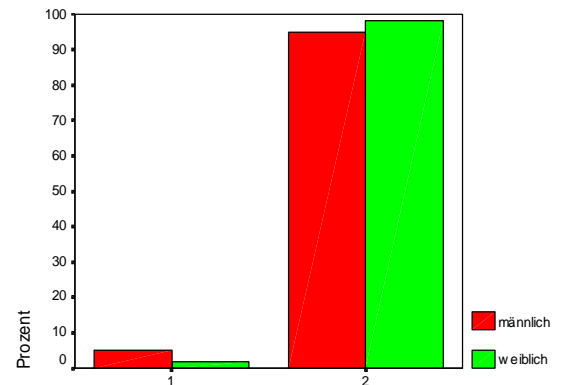


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Sowohl der U-Test von Mann-Withney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass zwischen den beiden Gruppen signifikante Unterschiede vorliegen²⁶. Vergleicht man das Antwortverhalten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach dem U-Test von Mann-Withney und dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz²⁷.

²⁶ bei beiden Tests: $p = 0,000$

²⁷ Versuchsgruppe: U-Test von Mann-Withney: $p = 0,240$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 0,924$,
Kontrollgruppe: U-Test von Mann-Withney: $p = 0,366$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Zirka zwei Drittel der Schüler/innen können die Aufgabe richtig beantworten²⁸. Dabei lösen etwas mehr Mädchen als Jungen diese Aufgabe richtig²⁹.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Nahezu kein/e Schüler/in kann die Aufgabe richtig beantworten³⁰. Unter den Wenigen, die diese Aufgabe richtig beantworten, ist fast kein Mädchen zu finden³¹.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Das Lösungsverhalten der beiden Versuchsgruppen differiert sehr stark. Während zwei Drittel der Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgabe richtig gelöst haben, war es bei der Kontrollgruppe ein verschwindend geringer Anteil von nur 3,6 %. Im Gegensatz zur Versuchsgruppe, wo mehr Mädchen als Jungen die Aufgabe richtig gelöst haben, haben bei der Kontrollgruppe weniger Mädchen die Aufgabe richtig.

Zu Item 11a:

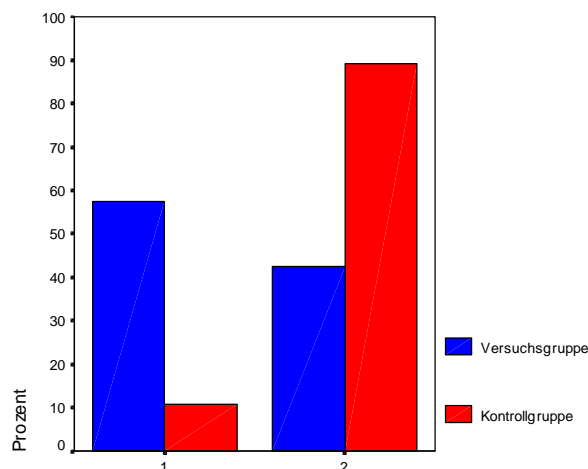
Ein Holzquader (200 g, $c = 2,5 \text{ kJ}/(\text{kg K})$) gleitet auf einer waagrechten Fläche auf einer Länge von 20 cm, dann ist er zur Ruhe gekommen. Die Reibungskraft betrug 0,03 N. Berechne die Temperaturänderung des Holzquaders.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schülern/Schülerinnen erkennen, dass durch mechanische Arbeit die innere Energie geändert werden kann.

Antwortkategorien:

1. Richtiger Ansatz ($W = \Delta E_i$)
2. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



²⁸ Ak. 1: 68,5 %

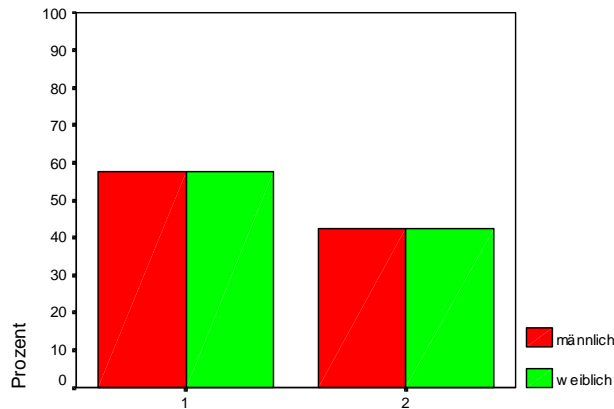
²⁹ Mädchen: 75,0 %, Jungen: 63,5 %

³⁰ Ak. 1: 3,6 %

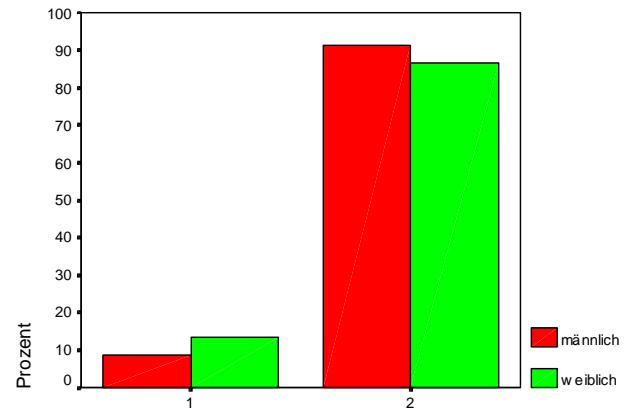
³¹ Mädchen: 1,9 %, Jungen: 5,3 %

Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Sowohl der U-Test von Mann-Whitney als auch der Kolmogorov-Smirnov-Test ergeben, dass zwischen den beiden Gruppen signifikante Unterschiede vorliegen³². Vergleicht man das Antwortverhalten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich nach dem U-Test von Mann-Whitney und dem Kolmogorov-Smirnov-Test keine Signifikanz³³.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Mehr als die Hälfte der Schüler/innen gibt den richtigen Ansatz an³⁴. Dabei schneiden Mädchen und Jungen genau gleich gut ab.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe :

10,9 % der Schüler/innen können die richtigen Ansatz angeben. Die Mädchen lösen die Aufgabe häufiger als ihre Mitschüler, der Unterschied ist aber nicht signifikant.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei diesem Item bietet sich ein ähnliches Bild wie beim Item 20. Die Schüler/innen der Versuchsgruppe lösen die Aufgabe mehr als fünfmal so häufig wie die Schüler/innen der Kontrollgruppe. Dieses Ergebnis ist sehr erstaunlich, denn nach dem konventionellen Unterrichtskonzept wird die Formel für die innere Energie mit Hilfe der Arbeit eingeführt. Die Herleitung des Zusammenhangs und zugehörige Aufgaben nehmen in diesem Konzept einen wesentlich breiteren Raum als bei der Versuchsgruppe ein. Also wäre zu erwarten gewesen, dass die Schüler/innen der

³² bei beiden Tests: $p = 0,000$

³³ Versuchsgruppe: U-Test von Mann-Whitney: $p = 0,985$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$,

Kontrollgruppe: U-Test von Mann-Whitney: $p = 0,418$, Kolmogorov-Smirnov-Test: $p = 1,000$

³⁴ 57,6 %

Kontrollgruppe besser abscheiden als die Schüler/innen der Versuchsgruppe. Genau das Gegenteil ist eingetreten.

Item 11b:

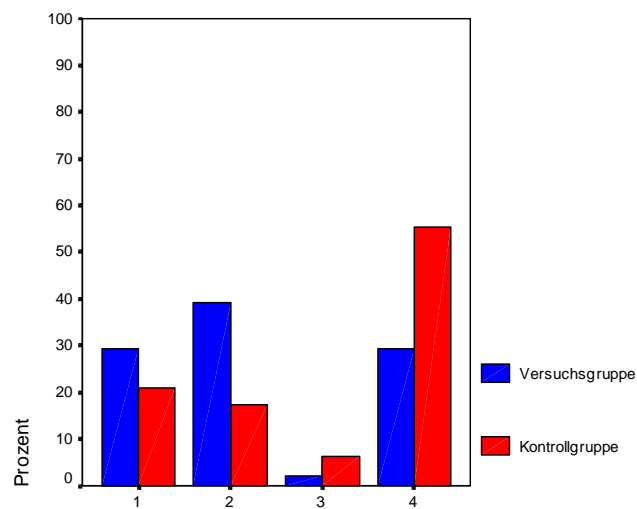
Warum ist die gemessene Temperaturerhöhung geringer als die berechnete?

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen erkennen, dass nicht die gesamte mechanische Energie zur Erhöhung der inneren Energie des Holzquaders herangezogen wird.

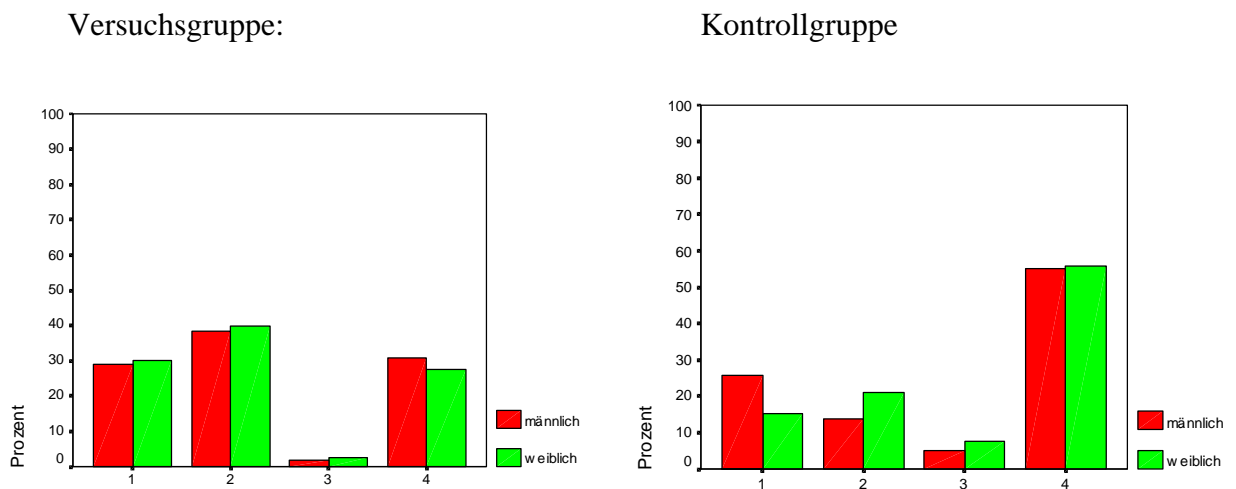
Antwortkategorien:

1. Die Umgebung wurde vernachlässigt
2. Der Körper gibt Wärme ab
3. Wegen Messfehlern
4. Sonstige oder keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:



Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:



Die Vielfeldertafel ergibt, dass die Antwortverteilungen der beiden Gruppen signifikant unterschiedlich sind³⁵. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Versuchsgruppen, ergibt sich keine Signifikanz in der Antwortverteilung³⁶.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

29,3 % der Schüler/innen geben an, dass die Umgebung vernachlässigt wurde. Diese nimmt einen Teil der Wärme auf. Noch mehr Schüler/innen, - nämlich 39,1 % - geben an, dass der Körper während des Vorgangs Wärme an die Umgebung abgibt. Mädchen und Jungen unterscheiden sich in ihrem Antwortverhalten nicht.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier geben 20,9 % der Schüler/innen an, dass die Umgebung bei der Energiebetrachtung vernachlässigt wurde. 17,3 % der Schüler/innen entschieden sich dafür, dass der Körper Wärme an die Umgebung abgibt.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Während 29,3 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe die Temperaturdifferenz mit der Vernachlässigung der Umgebung begründen, sind es bei der Kontrollgruppe 20,9 % der Schüler/innen. Dass doppelt so viele Schüler/innen der Versuchsgruppe annehmen, die Wärmeabgabe sei der Grund für den Temperaturunterschied des Holzklotzes, könnte daran liegen, dass beim Münchner Unterrichtskonzept im Gegensatz zum konventionellen Unterrichtskonzept Wärmeübertragungsvorgänge detailliert besprochen werden.

³⁵ $\chi^2 = 20,044$, $p = 0,000$

³⁶ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 0,141$, $p = 0,987$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 2,575$, $p = 0,462$

Zusammenfassung der Auswertung zur inneren Energie und dem ersten Hauptsatz:

Die innere Energie:

51,1 % der Versuchsgruppenschüler/innen beschreiben die innere Energie als die Energie, die ein Körper in sich hat. Einige konkretisieren dies, in dem sie diese Energie auf die Energie der einzelnen Teilchen in dem Körper zurückführen³⁷. Bei der Kontrollgruppe wählen diese Art de Beschreibung nur 21,8 %. Auffallend ist der große Anteil von 66,3% der Kontrollgruppenschüler/innen, die eine völlig falsche Beschreibung von der inneren Energie geben. Bei der Versuchsgruppe sind es nur 33,7 %³⁸.

Anwendung des Erster Hauptsatz (hier: $\Delta E_i = Q$; Mischung zweier Flüssigkeiten):

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe lösen alle Items häufiger richtig als die Schüler/innen der Kontrollgruppe. Dabei tritt nur in einem Fall ein signifikanter Unterschied auf. Bei der Rechenaufgabe tritt ein geschlechtsspezifischer Unterschied zwischen den Gruppen auf. Während die Mädchen der Versuchsgruppe besser als ihre Mitschüler sind, ist es bei der Kontrollgruppe genau anders herum³⁹. Bei den Mischungsaufgaben, die ohne Formeln gelöst werden mussten, sind bei beiden Gruppen die Jungen bei den schwierigen Mischungsaufgaben besser⁴⁰. Bei den einfachsten Mischungsversuchen sind die Mädchen beider Gruppen gleich gut wie ihre Mitschüler oder sogar besser⁴¹.

Anwendung des Erster Hauptsatz (hier: $\Delta E_i = W$):

Auch hier schneidet die Versuchsgruppe deutlich besser als die Kontrollgruppe ab⁴². Während bei der Versuchsgruppe die Mädchen und Jungen gleich gut sind, schneiden die Mädchen bei der Kontrollgruppe besser als ihre Mitschüler ab.

Umwandlung von innerer Energie in mechanische Energie:

Während bei der Versuchsgruppe etwa zwei Drittel der Schüler/innen das Item 20 richtig gelöst haben, war bei der Kontrollgruppe fast niemand dazu in der Lage⁴³. Dabei schneiden die Mädchen der Versuchsgruppe besser als ihre Mitschüler ab, bei der Kontrollgruppe dagegen schlechter.

Diskussion:

Wie kann man die innere Energie am einfachsten in ein Bild fassen? Sicherlich damit, dass man sie im Inneren eines Körpers lokalisiert sieht, im idealsten Fall als Summe der E_{kin} und E_{pot} , zwischen den Teilchen der einzelnen Teilchen. Bei der

³⁷ Ak. 2, 3 und 6

³⁸ Ak. 7 und 8

³⁹ Item 17, Ak. 1: Versuchsgruppe: Mädchen: 22,5 %, Jungen 15,4 %,
Kontrollgruppe: Mädchen: 9,6 %, Jungen: 13,8 %

⁴⁰ Item 10: linkes und mittleres Bild

⁴¹ Item 10: rechtes Bild

⁴² Item 11a, Ak 1: Versuchsgruppe: 57,6 %, Kontrollgruppe: 10,9 %

⁴³ Ak. 1: Versuchsgruppe 68,5 %, Kontrollgruppe: 3,6 %

Versuchsgruppe hat eine erfreuliche Anzahl von Schülern/Schülerinnen diesen Weg wenigstens teilweise eingeschlagen. Dass die Schüler/innen diesen Weg gehen ist nicht erstaunlich. So wird doch die innere Energie als die Energie eingeführt, die sich bei verschiedenen Experimenten innerhalb eines Körpers befinden muß, damit der Energieerhaltungssatz auch weiterhin gilt. Dass die innere Energie beim konventionellen Konzept erst sehr spät eingeführt und dann auch nur am Rande behandelt wird, wirkt sich negativ aus. Ein Großteil der Schüler/innen der Kontrollgruppe kann mit dem Begriff „innere Energie“ nicht viel anfangen.

Dass bei beiden Gruppen nur sehr wenige Schüler/innen die Rechenaufgabe zum Mischungsversuch zweier Flüssigkeiten richtig lösen, war nicht zu erwarten, denn bei beiden Unterrichtskonzepten finden sich Aufgaben zu diesem Themenbereich.

Dass die Schüler/innen der Versuchsgruppe den Zusammenhang zwischen der Änderung der mechanischer Energie und der Änderung der inneren Energie deutlich besser beherrschen als die Schüler/innen der Kontrollgruppe, darf nicht verwundern. Schon zu Beginn des Kapitels „Wärmelehre“ wird die innere Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes eingeführt. Dieser Satz zieht sich wie ein roter Faden durch das gesamte Münchner Unterrichtskonzept. Beim konventionellen Unterrichtskonzept kommt dieser Zusammenhang deutlich zu kurz.

Verwunderlich ist aber, dass die Schüler/innen der Versuchsgruppe auch den Zusammenhang zwischen der mechanischen Arbeit und der Änderung der inneren Energie besser verstanden haben als die Schüler/innen der Kontrollgruppe. Zur Erinnerung: beim konventionellen Unterrichtskonzept wird die Wärme und gleich anschließend die innere Energie mit Hilfe der mechanischen Arbeit eingeführt. Beim Münchner Unterrichtskonzept wird der Zusammenhang von der Änderung der inneren Energie und der Arbeit bei der Behandlung des Themas „erster Hauptsatz“ angesprochen. Er steht also nicht so zentral im Mittelpunkt wie bei dem konventionellen Unterrichtskonzept.

Wie bereits beim Mechanik-Kapitel lösen bei der Versuchsgruppe die Mädchen die Rechenaufgaben gleich gut oder besser als ihre Mitschüler. Bei der Kontrollgruppe ist es fast immer anders herum. Aufgaben, die keine Formeln zum Lösen benötigen, werden bei beiden Gruppen meistens von den Jungen besser als von den Mädchen gelöst. Auch diesen Trend gab es bereits beim Mechanik-Kapitel.

5.4.3.6 Item zur Wärme

Das Item 12 des Lernerfolgstests II kann dem Themenkreis „Wärme“ zugeordnet werden.

Item 12:

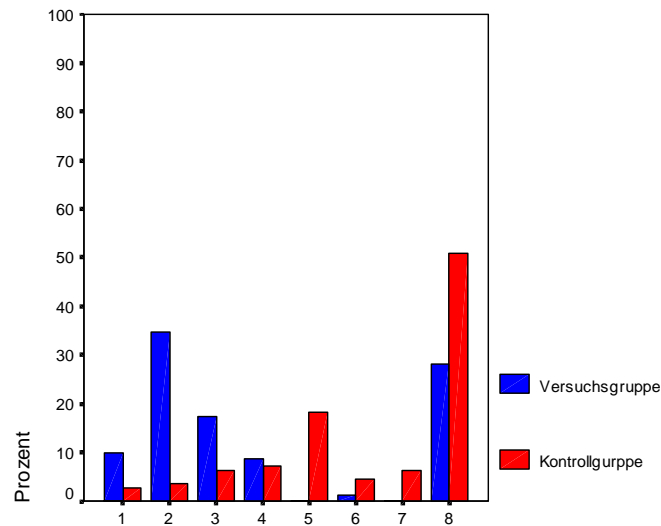
Was verstehst du unter dem Begriff „Wärme“?

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, welche Vorstellung die Schüler/innen vom physikalischen Wärmebegriff haben.

Antwortkategorien:

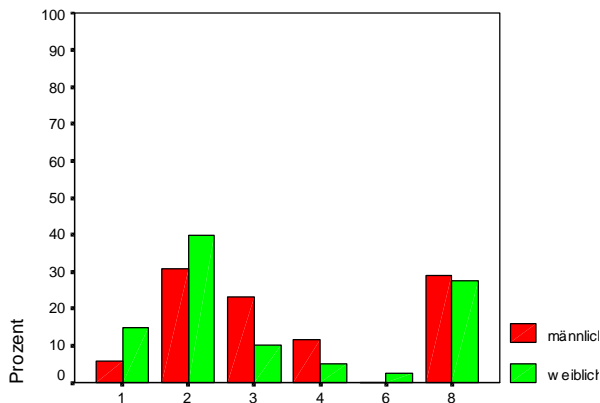
1. Wärme = $\Delta E_i - W$
2. Wärme = ΔE_i
3. Wärme = E_i
4. Wärme ist gleich der Temperatur
5. Die Wärme ist eine Energieart
6. Wärme entsteht bei der Reibung
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht
8. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

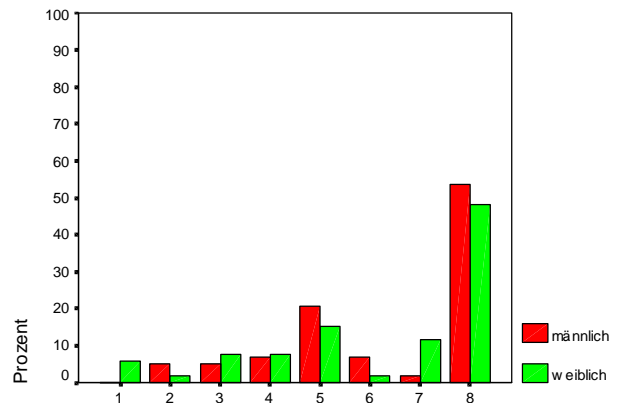


Vergleich des Antwortverhaltens differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Das Antwortverhalten der beiden Gruppen ist nach der Vielfeldertafel signifikant unterschiedlich⁴⁴. Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Versuchsgruppen, ergibt sich bei beiden Unterrichtskonzepten keine Signifikanz⁴⁵.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Etwas mehr als ein Drittel der Schüler/innen versteht unter der Wärme eine Ursache für die Änderung der inneren Energie⁴⁶. 9,8 % der Schüler/innen gehen noch weiter und versuchen die Wärme mit Hilfe des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre zu definieren. Ein beachtlicher Anteil von 17,5 % sieht in der Wärme und der inneren Energie gleichwertige Begriffe. Eine stattliche Zahl von 28,3 % der Schüler/innen gibt eine Antwort, die nicht sinnvoll zu verwerten ist, oder gar keine Antwort.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Nur 6,3 % der Schüler/innen sehen in Wärme eine Ursache für die Änderung der inneren Energie oder definieren die Wärme über den ersten Hauptsatz⁴⁷. Mehr als die Hälfte aller Schüler/innen hat die Frage entweder nicht beantwortet oder die Antwort ist in keine der Antwortkategorien einzuordnen⁴⁸. Von den restlichen Schülern/Schülerinnen verstehen 24,6 % die Wärme als eine Energieart⁴⁹.

⁴⁴ $\chi^2 = 67,877$, $p = 0,000$

⁴⁵ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 7,127$, $p = 0,208$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 10,662$, $p = 0,154$

⁴⁶ Ak. 2: 34,8 %

⁴⁷ Ak. 1 und 2

⁴⁸ Ak. 8: 50,9 %

⁴⁹ Ak. 5 und 7

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Das Antwortverhalten beider Gruppen unterscheidet sich sehr stark voneinander. Betrachtet man nur die Schüler/innen, die eine verwertbare Antwort gegeben haben, ergibt sich folgendes Bild: Während die Schüler/innen der Versuchsgruppe die Wärme am ehesten mit der Änderung der inneren Energie in Zusammenhang bringen, können die meisten Schüler/innen der Kontrollgruppe mit dem Begriff „Wärme“ überhaupt nichts anfangen.

Vergleich mit bisherigen Untersuchungen:

Das Ergebnis dieses Items kann mit den Untersuchungen von Fleischer (1991) und Manthei (1980) gegenübergestellt werden.

Verständnis des physikalischen Begriffs „Wärme“ Q	Untersuchung von Fleischer	Untersuchung von Manthei	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
Q gibt die übertragene Menge innerer Energie an	42 %		44,6 %	6,4 %
Q ist Energie	23,8 %	20,4 %	17,4 %	24,6 %
Q ist Temperatur	23,8 %	19,4 %	8,7 %	7,3 %
Sonstige Definitionen	10,4 %		39,4 %	61,8 %

Die Schüler/innen von Fleischer und die Schüler/innen der Versuchsgruppe geben in etwa gleich häufig an, dass die Wärme gleich der übertragenen Energie sei. Diese Aussage wählen deutlich weniger Schüler/innen der Kontrollgruppe. Die Fehlvorstellung, dass die Wärme gleich der Temperatur sei, ist bei der Versuchsgruppe und der Kontrollgruppe in etwa gleich stark ausgeprägt. Sie tritt deutlich seltener auf als nach den Untersuchungen von Fleischer und Manthei zu vermuten ist.

Zusammenfassung der Auswertung zur Wärme:

Bei der Versuchsgruppe bringt fast die Hälfte aller Schüler/innen die Wärme mit der Änderung der inneren Energie in Zusammenhang⁵⁰. Bei der Kontrollgruppe sind es hingegen nur 6,3 %. Während 17,4 % der Schüler/innen der Versuchsgruppe die Wärme gleich der inneren Energie setzen, tun dies bei der Kontrollgruppe nur 6,4 % der Schüler/innen. Dafür sieht zirka ein Viertel aller Schüler/innen der Kontrollgruppe die Wärme als eine Energieart an, bei der Versuchsgruppe macht dies kein/e einzig/e Schüler/in. Die Anzahl der Schüler/innen, die überhaupt keine verwertbare Angabe gemacht hat, ist bei der Kontrollgruppe mit 50,9 % fast doppelt so hoch wie bei der Versuchsgruppe. Die Mädchen beider Gruppen beschreiben den Begriff der „Wärme“ häufiger physikalisch richtig als ihre Mitschüler⁵¹

⁵⁰ Ak. 1 und 2: 44,6 %

⁵¹ Ak. 1 und 2: Versuchsgruppe: Mädchen: 55 % , Jungen: 36,6 % ;
Kontrollgruppe: Mädchen: 7,7 % , Jungen: 5,2 %

Diskussion:

Das unterschiedliche Antwortverhalten zwischen beiden Gruppen ist sehr ausgeprägt. Während bei der Versuchsgruppe fast die Hälfte der Schüler/innen die Wärme mit der Änderung der inneren Energie verbindet, beschreibt nahezu ein Viertel der Schüler/innen der Kontrollgruppe die Wärme als eine Energieart. Es haben mehr Schüler/innen der Versuchsgruppe den Begriff „Wärme“ richtig verstanden als bei der Kontrollgruppe. Das kann daran liegen, dass beim Münchner Unterrichtskonzept die Analogie zwischen Arbeit und Wärme deutlich hervorgehoben wird. So lässt sich auch erklären, warum kein/e Schüler/in der Versuchsgruppe die Wärme explizit als eine Energieart angegeben hat.

5.4.3.7 Item zum zweiten Hauptsatz der Wärmelehre

Mit Hilfe des Items 18 des Lernerfolgstests II wird untersucht, inwieweit die Schüler/innen den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre anwenden können.

Item 18:

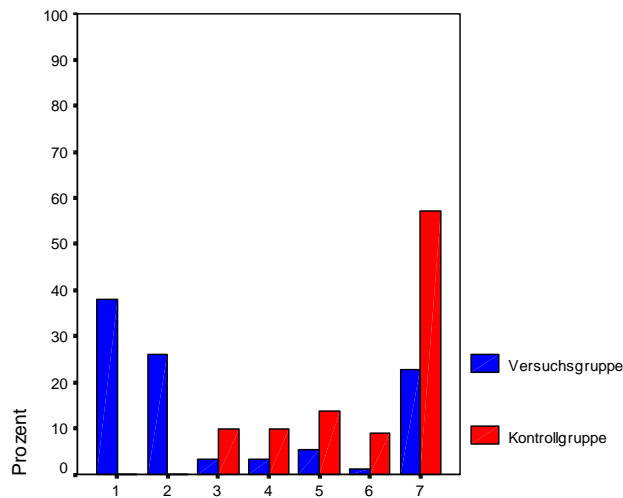
Ein Spielzeugauto wird angeschoben, so dass es eine Anfangsgeschwindigkeit von 0,2 m/s hat. Aufgrund der Reibung kommt es nach einiger Zeit wieder zur Ruhe. Bei diesem Vorgang wurde mechanische Energie in innere Energie umgewandelt. Warum setzt sich das Auto nicht irgendwann wieder von selbst in Bewegung? Nach dem Energieerhaltungssatz könnte die sich die innere Energie ja wieder in mechanische Energie umwandeln.

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, inwieweit die Schüler/innen irreversible Prozesse erkennen und erklären können.

Antwortkategorien:

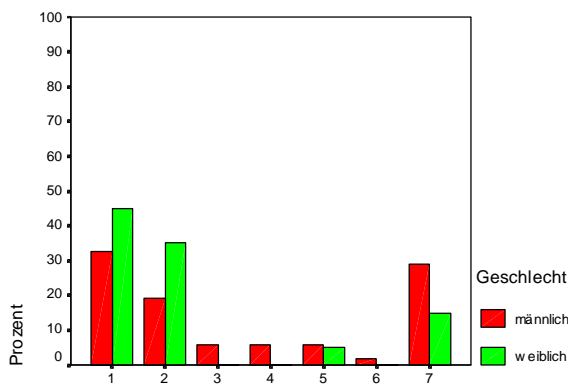
1. Wegen des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre
2. Da der Vorgang irreversibel ist
3. Da die innere Energie vom Auto nicht in mechanische Energie umgewandelt werden kann
4. Wegen der Reibung
5. Da das Auto niemand anschiebt
6. Weil es kein Perpetuum mobile gibt
7. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

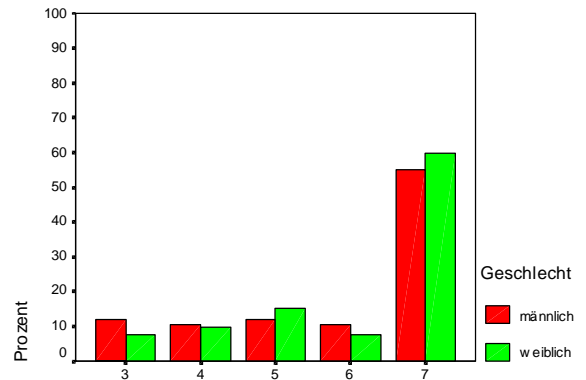


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Das Antwortverhalten beider Gruppen ist nach der Vielfeldertafel signifikant unterschiedlich⁵². Vergleicht man die Verteilung der Antworten von Mädchen und Jungen jeweils innerhalb der beiden Gruppen, ergibt sich bei beiden Unterrichtskonzepten keine Signifikanz⁵³.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

64,1 % der Schüler/innen haben die Aufgabe richtig beantwortet⁵⁴. 38 % nannten sogar explizit den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre. Der Anteil der Mädchen, die

⁵² $\chi^2 = 200,702$, $p = 0,000$

⁵³ Versuchsgruppe: $\chi^2 = 10,363$, $p = 0,110$, Kontrollgruppe: $\chi^2 = 1,068$, $p = 0,899$

⁵⁴ Ak. 1 und 2

die Aufgabe richtig beantwortet haben, ist mit 80 % deutlich höher als der Anteil der Jungen mit 51,9 %.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Kein einziger Schüler/keine einzige Schülerin hat die Aufgabe richtig beantwortet. 10 % der Schüler/innen geben immerhin an, dass das Auto von selbst die innere Energie nicht wieder in mechanische Energie umwandeln kann. Mädchen und Jungen unterscheiden sich in ihrem Antwortverhalten nur unwesentlich.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Das Antwortverhalten beider Gruppen ist extrem unterschiedlich. Während fast zwei Drittel der Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgabe richtig beantworten, ist bei der Kontrollgruppe kein Schüler/keine Schülerin dazu fähig. Die Mädchen der Versuchsgruppe sind deutlich besser als ihre Mitschüler. Bei der Kontrollgruppe ist dagegen kein geschlechtsspezifischen Unterschied zu erkennen.

Zusammenfassung der Auswertung zum zweiten Hauptsatz der Wärmelehre:

Das Antwortverhalten der beiden Gruppen unterscheidet sich sehr stark voneinander. Während 61,4 % der Schüler/innen von der Versuchsgruppe zur Beantwortung des Items den zweiten Hauptsatz oder den Begriff der Irreversibilität nennen, ist es bei der Kontrollgruppe kein einziger Schüler/keine einzige Schülerin.

Die Schülerinnen der Versuchsgruppe schneiden deutlich besser ab als ihre Mitschüler⁵⁵. Bei der Kontrollgruppe gab es nur unwesentliche Unterschiede im Antwortverhalten von Jungen und Mädchen.

Diskussion:

Dass ein Großteil der Schüler/innen der Versuchsgruppe die Aufgabe richtig löst, ist wohl darauf zurückzuführen, dass der zweite Hauptsatz der Wärmelehre beim Münchner Unterrichtskonzept an mehreren Stellen vorkommt und so immer wieder in unterschiedlichen Situationen eingeübt wurde. Erstaunlich ist aber das Abschneiden der Kontrollgruppe. Am Ende des Kapitel „Wärmelehre“ wird beim konventionellen Unterrichtskonzept die Irreversibilität besprochen. Die Schüler/innen müssten also noch relativ leicht auf diesen Begriff zurückgreifen können. Da kein/e Schüler/in der Kontrollgruppe die Aufgabe richtig beantwortet hat, kann daraus nur gefolgert werden, dass kein Schüler/keine Schülerin den Irreversibilitätsbegriff verstanden hat. Grund dafür könnte sein, dass die Schüler/innen der Kontrollgruppe mit ihrer Definition der „Energie als gespeicherte Arbeit“ einen für sie nicht zu lösenden Konflikt zwischen dem Energieerhaltungssatz und dem zweiten Hauptsatz mitgeliefert bekamen. Wenn die Fähigkeit Arbeit zu verrichten erhalten bleibt (Energieerhaltungssatz), wie kann dann bei realen Prozessen die Fähigkeit der Energie mechanische Arbeit zu verrichten immer mehr abnehmen (2. Hauptsatz)?

⁵⁵ richtige Antworten: Ak. 1 und 2.: Mädchen: 80 %, Jungen: 51,9 %

5.4.3.8 Items zur Wärmeleitung und zur Wärmestrahlung

Die Items 14, 15a und 15b können dem Themenkreis Wärmeleitung und Wärmeübergang zugeordnet werden. Die Items 15a und 15b wurden bereits in vorhergehenden Kapiteln vorgestellt und werden daher erst bei der abschließenden Zusammenfassung und Diskussion nochmals betrachtet.

Item 14:

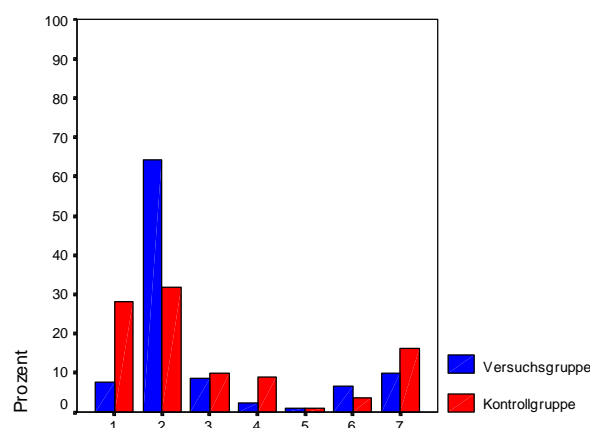
Ein Metalllöffel und ein Plastiklöffel werden zum Umrühren beim Puddingkochen (80° C) benutzt. Werden beide Löffel so heiß, dass du sie nicht mehr berühren kannst? (Begründung)

Intention: Mit diesem Item wurde untersucht, ob die Schüler/innen diese Erfahrungen mit Hilfe des Wärmeübergangs durch Wärmeleitung erklären können.

Antwortkategorien:

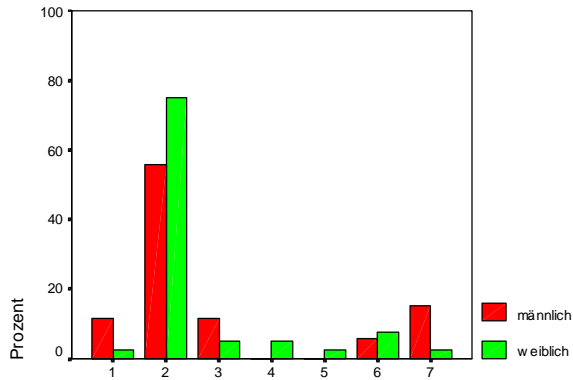
1. Das Metall wird heißer (ohne Begründung)
2. Das Metall wird heißer wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit
3. Das Metall wird heißer wegen seiner spezifischen Wärmekapazität
4. Das Metall wird heißer, da es schneller (besser) die Wärme aufnehmen kann
5. Das Plastik wird heißer
6. Beide werden gleich heiß
7. Sonstige und keine Antwort

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

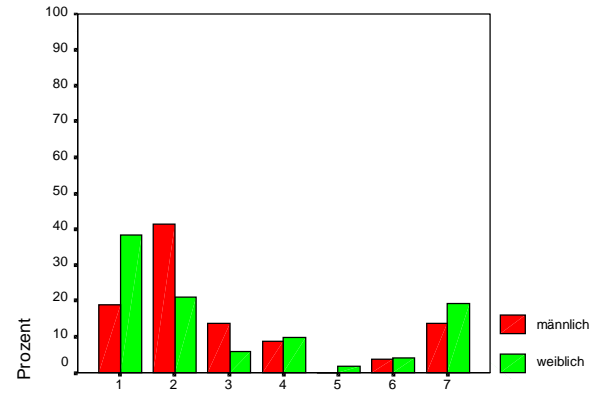


Antwortverhalten differenziert nach dem Geschlecht:

Versuchsgruppe:



Kontrollgruppe:



Die Unterschiede im Antwortverhalten der beiden Gruppen sind nach der Vielfeldertafel signifikant⁵⁶. Die Antwortverteilung von Mädchen und Jungen der Versuchsgruppe unterscheidet sich nach der Vielfeldertafel signifikant⁵⁷. Bei der Kontrollgruppe ist das Antwortverhalten von Mädchen und Jungen nicht signifikant unterschiedlich⁵⁸.

Zusammenfassung und Diskussion:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

82,6 % der Schüler/innen geben an, dass das Metall heißer als das Plastik wird⁵⁹. 64,1 % der Schüler/innen wählen nicht nur das Metall, sondern geben auch noch die richtige Begründung für ihre Wahl an⁶⁰. Dabei geben deutlich mehr Mädchen als Jungen die richtige Begründung an⁶¹.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Hier geben 79,1 % der Schüler/innen an, dass das Metall heißer als das Plastik wird⁶². 31,8 % der Schüler/innen geben nicht nur an, dass das Metall heißer wird, sondern begründen dies auch richtig⁶³. Die Mädchen geben etwa halb so oft wie ihre Mitschüler die richtige Begründung an⁶⁴.

⁵⁶ $\chi^2 = 29,12$, $p = 0,000$

⁵⁷ $\chi^2 = 12,683$, $p = 0,048$

⁵⁸ $\chi^2 = 10,641$, $p = 0,100$

⁵⁹ Ak. 1, 2, 3 und 4

⁶⁰ Ak. 2

⁶¹ Ak. 2: Mädchen 75%, Jungen: 55,8 %

⁶² Ak. 1, 2, 3 und 4

⁶³ Ak. 2

⁶⁴ Ak.2: Mädchen: 21,2 %, Jungen: 41,4 %

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei beiden Gruppen geben etwa gleich viele Schüler/innen an, dass der Metalllöffel wärmer als der Plastiklöffel wird⁶⁵. Dass bei beiden Gruppen nahezu gleich viel Schüler/innen das Metall ausgewählt haben, liegt sicherlich an den Erfahrungen, die die Schüler/innen im Umgang mit Metalllöffeln und Plastiklöffeln gemacht haben. Bei der Versuchsgruppe haben 64,1 % der Schüler/innen nicht nur den Metalllöffel gewählt, sondern auch die richtige Begründung angegeben. Erstaunlich ist, dass 31,8 % der Schüler/innen der Kontrollgruppe ebenfalls die richtige Begründung gegeben haben. Denn beim konventionellen Unterrichtskonzept ist die Wärmeleitung kein Lernziel. Da nur 13,6 % der Kontrollgruppenschüler beim Vortest⁶⁶ die Wärmeleitung erwähnt hatten, ist anzunehmen, dass die Wärmeleitung von den Lehrern, die das konventionellen Konzept unterrichtet haben, angesprochen worden ist.

Die Mädchen der Versuchsgruppe schneiden im Vergleich mit ihren Klassenkameraden deutlich besser ab als die Mädchen der Kontrollgruppe. Bei der Kontrollgruppe ist es genau anders herum.

Statistischer Zusammenhang der Items Items 14,15a und 15b.

Die folgende Tabelle stellt den statistischen Zusammenhang der in diesem Kapitel besprochenen Items mit Hilfe des χ^2 -Tests dar. In der Tabelle sind die asymptotischen Signifikanzen p eingetragen.

Versuchsgruppe:

Item	14	15a	15b
14		0,898	0,682
15a	0,898		0,000
15b	0,682	0,000	

Kontrollgruppe:

Item	14	15a	15b
14		0,105	0,205
15a	0,105		0,000
15b	0,205	0,000	

Anhand der Korrelationstabelle zeigt sich, dass bei beiden Gruppen die Wahl des Materials⁶⁷ eindeutig mit der zugehörigen Begründung⁶⁸ zusammenhängt.

⁶⁵ Ak. 1, 2, 3 und 4: Versuchsgruppe: 82,6 %, Kontrollgruppe: 79,1 %

⁶⁶ Item 6

⁶⁷ Item 15a

⁶⁸ Item 15b

Zusammenfassung der Auswertung zur Wärmeleitung und Wärmestrahlung:

Wärmeleitung:

Die Schüler/innen der Versuchsgruppe begründen ihre Wahl bei dem Item 14 deutlich häufiger als die Schüler/innen der Kontrollgruppe mit der Wärmeleitung⁶⁹. Dabei erklären die Schülerinnen der Versuchsgruppe die Aufgabe deutlich öfter als ihre Mitschüler mit Hilfe der Wärmeleitung⁷⁰. Bei der Kontrollgruppe ist es genau anders herum⁷¹.

Wärmestrahlung:

Während bei der Versuchsgruppe 18,5 % der Schüler/innen das Item 15b mit Hilfe der Wärmestrahlung begründen, sind es bei der Kontrollgruppe 1,8 %. Genauso wie beim Item zur Wärmeleitung begründen in der Versuchsgruppe mehr Mädchen als Jungen ihre Wahl physikalisch korrekt⁷². Bei der Kontrollgruppe argumentieren nur Jungen mit der Wärmestrahlung.

Diskussion:

Dass die Schüler/innen der Versuchsgruppe besser als die Schüler/innen der Kontrollgruppe sind, darf nicht verwundern, da nur beim Unterrichtskonzept der Versuchsgruppe die entsprechenden Phänomene eingehend besprochen wurden. Unter diesem Gesichtspunkt sind die 31,8 % der Kontrollgruppenschüler, die beim Item 14 mit der Wärmeleitung argumentiert haben, erstaunlich hoch.

Dass bei der Versuchsgruppe die Mädchen die Begriffe Wärmeleitung und Wärmestrahlung deutlich häufiger als die Jungen genannt haben, ist sicherlich darauf zurückzuführen, dass beim Kapitel „Wärmeübergänge“ im Münchner Unterrichtskonzept sehr viele Beispiele aus der Biologie aufgeführt sind. Das bewirkt eine größere Motivation und letztendlich auch höhere Leistung bei den Mädchen.

⁶⁹ Item 14, Ak 2: Versuchsgruppe: 64,1 %, Kontrollgruppe: 31,8 %

⁷⁰ Item 14, Ak 2: Mädchen: 75,0 %, Jungen: 55,8 %

⁷¹ Item 14, Ak 2: Mädchen: 21,2 %, Jungen: 41,4%

⁷² Item 15b, Ak 1: Mädchen: 25,0 %, Jungen: 13,5 %

6. Zusammenfassung der wichtigsten Untersuchungsergebnisse

In den vorhergegangenen Kapiteln wurden die einzelnen Untersuchungsergebnisse ausführlich dargestellt und diskutiert. Um einen Überblick zu erhalten, werden im Folgenden die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchung nochmals kurz zusammengefasst.

Population:

Sowohl die Schüler/innen der Versuchsgruppe als auch die Schüler/innen der Kontrollgruppe besuchten zur Zeit der Tests die 9. Klasse eines mathematisch naturwissenschaftlichen Gymnasiums in Bayern. Der Altersdurchschnitt betrug bei beiden Gruppen ca. 14,5 Jahre. Die Versuchsgruppe bestand aus 92, die Kontrollgruppe aus 110 Schüler/innen und Schüler/innen.

Voruntersuchungen:

FIGURE-REASONING-TEST:

Der Intelligenztest ergab, dass sich die Intelligenz beider Gruppen nicht signifikant unterscheidet⁷³. Auch zwischen den Jungen und Mädchen der einzelnen Gruppen war kein signifikanter Intelligenzunterschied zu erkennen⁷⁴.

Vortest:

Beide Gruppen wiesen nahezu keine physikalischen Vorkenntnisse auf. Dabei ergaben sich bei keinem der Items signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Es trat nur beim Item 3 ein signifikanter Unterschied zwischen Jungen und Mädchen auf. Hier zeigte sich, dass die Mädchen der Kontrollgruppe mit dem Erhaltungsgedanken vertrauter waren als ihre Mitschüler. Die Items 1 bis 3 zeigen, dass bei beiden Gruppen gravierende Fehlvorstellungen bei der Kraft vorhanden sind.

Aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen kann geschlossen werden, dass die Unterschiede im Lernerfolg nicht auf das Gruppen-Design zurückzuführen sind.

⁷³ Versuchsgruppe: $\bar{IQ} = 118,5$, Kontrollgruppe: $\bar{IQ} = 117,9$

⁷⁴ Versuchsgruppe: Mädchen: $\bar{IQ} = 119,7$, Jungen $\bar{IQ} = 117,6$
Kontrollgruppe: Mädchen: $\bar{IQ} = 119,2$, Jungen $\bar{IQ} = 116,7$

Globaler Lernerfolg:

Bei der Unterrichtseinheit „Mechanische Energie“ war der Lernerfolg der Versuchsgruppe 1,84 mal, bei der Unterrichtseinheit „Wärmelehre“ 2,45 mal höher als die Kontrollgruppe⁷⁵. **Der globale Lernerfolg war damit bei der Versuchsgruppe 2,06 mal so hoch wie bei der Kontrollgruppe!**

Einfluss des Geschlechts auf den globalen Lernerfolg:

Während die Mädchen der Versuchsgruppe etwas besser als ihre Mitschüler abschnitten, waren die Mädchen der Kontrollgruppe signifikant schlechter als ihre Mitschüler⁷⁶.

Das signifikant bessere Abschneiden der Versuchsgruppe wird auf das neu erarbeitete „Münchner Unterrichtskonzept“ zurückgeführt. Das erfreulich gute Abschneiden der Mädchen der Versuchsgruppe ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Mädchen durch die Einbeziehung von Sachverhalten aus der Biologie einen Motivationsschub erhalten haben.

Detaillierte Betrachtung des Lernerfolgs:

Bei allen Items, in denen die Schüler/innen Aufgaben zu bearbeiten hatten, war der Lernerfolg der Versuchsgruppe immer, meist sogar signifikant, höher als der Lernerfolg der Kontrollgruppe.

Bei beiden Gruppen sind die Vorstellungen von Energie, Arbeit, Wärme und innerer Energie eindeutig vom jeweiligen Unterrichtskonzept geprägt. Das zeigt die folgende Tabelle.

Die drei häufigsten Nennungen	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
Definiere die Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Definition mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes (10,9 %) - Körper hat Energie aufgrund seiner Lage oder Bewegung (32,6 %) - Nennung von Energiearten (15,2 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Energie ist gespeicherte Arbeit (25,5 %) - Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit (9,1 %) - Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten (6,4 %)

⁷⁵ Versuchsgruppe: Mechanische Energie: $\overline{GP} = 9,29$, Wärmelehre: $\overline{GP} = 6,75$

Kontrollgruppe: Mechanische Energie: $\overline{GP} = 5,04$, Wärmelehre: $\overline{GP} = 2,75$

⁷⁶ Mechanische Energie: Versuchsgruppe: Mädchen: $\overline{GP} = 9,43$, Jungen: $\overline{GP} = 9,19$,

Kontrollgruppe: Mädchen: $\overline{GP} = 4,10$, Jungen: $\overline{GP} = 5,88$;

Wärmelehre: Versuchsgruppe: Mädchen: $\overline{GP} = 6,95$, Jungen: $\overline{GP} = 6,60$,

Kontrollgruppe: Mädchen: $\overline{GP} = 2,33$, Jungen: $\overline{GP} = 3,14$

Definiere die Arbeit	<ul style="list-style-type: none"> - Arbeit ist gleich Energieänderung (52,2 %) - Arbeit ist gleich Kraft mal Weg (8,7 %) - Bei Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und /oder seine Lage geändert (8,7 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Arbeit ist gleich Kraft mal Weg (41,8 %) - Bei Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und/ oder seine Lage geändert (10,9 %) - Arbeit ist Kraft (11,8 %)
Definiere die Wärme	<ul style="list-style-type: none"> - Wärme ist Änderung der inneren Energie (34,8 %) - Wärme ist innere Energie (17,4 %) - Definition über den ersten Hauptsatz (9,8 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Wärme ist eine Energieart (18,2 %) - Wärme ist gleich der Temperatur 7,3 % - Wärme ist gleich der inneren Energie (6,4 %) - Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht (6,4 %)
Definiere die innere Energie	<ul style="list-style-type: none"> - Energie, die ein Körper in sich hat (25,0 %) - Summe der Teilchenenergien (20,7 %) - Energie, die ein Körper hat (6,5 %) - innere Energie ist gleich der Wärme (6,5 %) 	<ul style="list-style-type: none"> - Energie, die ein Körper in sich hat (13,6 %) - innere Energie ist gleich der Wärme (13,6 %) - Energie, die ein Körper hat (11,8 %)

Einfluss der Intelligenz bei den einzelnen Items:

Bei beiden Gruppen nimmt der Lernerfolg meist mit zunehmender Intelligenz zu. Aber nur bei wenigen Items ist dieser Zusammenhang signifikant.

Einfluss des Geschlechts bei den einzelnen Items:

Bei der Versuchsgruppe besteht die Tendenz, dass die Mädchen die Rechenaufgaben häufiger richtig haben als die Jungen. Bei den Aufgaben, die nicht durch einen Rechenansatz gelöst werden können, sind dagegen meist die Jungen besser als die Mädchen. Die Mädchen der Kontrollgruppe schneiden bei fast allen Aufgaben schlechter als ihre Mitschüler ab, meist ist diese Tendenz sogar signifikant.

Resümee:

Die vorliegende Untersuchung zeigt auf, dass der Lernerfolg nicht nur vom Lernwillen der Schüler/innen abhängt, sondern entscheidend von dem zugrunde liegenden Unterrichtskonzept beeinflusst wird. Das Münchner Unterrichtskonzept führt in der 9. Jahrgangsstufe bei den Unterrichtseinheiten „Mechanische Energie“ und „Wärmelehre“ zu einem deutlich größeren Lernerfolg als das bisherige bayerische Unterrichtskonzept. Das konnte nur gelingen, weil beim Münchner Unterrichtskonzept die Energie in den Vordergrund gerückt wurde, eine eindeutige Verknüpfung zwischen der Wärmelehre und der mechanischen Energie vorhanden ist und die unterschiedliche Interessenslage von Mädchen und Jungen mit berücksichtigt wurde.

Bei der vorliegenden Arbeit wurde nicht untersucht, welchen Anteil der Aufbau und welchen Anteil die biologische Ausrichtung des Münchner Unterrichtskonzepts am Lernerfolg der Versuchsgruppe hatten. Hier müssten weiterführende Untersuchungen ansetzen.

Für die Schüler/innen ist zu hoffen, dass das Münchner Unterrichtskonzept Eingang in die Unterrichtspraxis findet.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Dr. Wiesner, ohne den diese Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Des weiteren gilt mein Dank den Lehrern/Lehrerinnen die bereit waren mein Unterrichtskonzept an ihren Schulen in die Unterrichtspraxis umzusetzen.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich wegen dieser Arbeit für manche Stunden entbehren musste.

Erklärung

„Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation ohne fremde Hilfe angefertigt habe und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.“

_____, den _____

Literatur:

- Anderson, J.R: Kognitive Psychologie, 2. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford (1996) Seite 411- 417
- Bayerlein, R.: Thermal Physics. Cambridge University Press (1999)
- Bécu-Robinault, K., Tiberghien, A.: Intergrating experiments into the teaching of energy. In International Journal of Science Education, Vol. 20, (1998), Seite 99 -114
- Berge, O.E., Hauke, B.: Schüler äußern sich über Energie. In NiU-P/C 31, (1983) Seite 352-355
- Bergmann, Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik 1. Walter de Gruyten – Berlin, New York (1990), Seite 676
- Bradley, J: Machs Philosophie der Naturwissenschaft, S. Hirzel Verlag Stuttgart (1974)
- Daniels, J.C.: FIGURE REASONING TEST, Crosby Lockwood & Son Ltd, London 1962
- Dengler, R.: Einstellung zur Physik; In NiU-P/C 28, (1995) Seite 25-29
- Duit, R.: Learning the energy concept in school – empirical results from the Philippines and West Germany. In Physical Education, Vol. 19, (1984) Seite 59 – 66.
- Duit, R: Der Energiebegriff im Physikunterricht. Habilitationsschrift. Kiel: JPN, (1986/1)
- Duit, R. Wärmeverstellungen. In NiU, Heft 13, (1986/2) Seite 30-133.
- Duit, R: Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Themenheft „Energieentwertung und Unordnung“, Herausgeber: Duit, R (1987)
- Duit, R.: Zur Elementarisierung des Energiebegriffs. In NiU, Heft 6, (1991) Seite 12-19.
- Duit, R: Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. Zeitschrift für Pädagogik 41, Seite 905-923 (1995)
- Engel Clough, E, Driver, R.: Secondary students' conceptions of the conduction of heat: bringing together scientific and peronal views. Physical Education 20, Seite 176-182 (1984)
- Engelhardt P., Jung W. und Wiesner H.: Vortrag auf der Frühjahrstagung der AG Didaktik der DPG (1977)
- Erickson, G.: Childrens' conceptions of heat and temperature. In Science Education 63 (1979), Seite 221-230
- Feuerlin, R., Näpfel, H., Schäflein, H: Physik 2, Bayerischer Schulbuch - Verlag (1993)
- Feynman, R.,P.:The Feynman Lectures on Physics Volume I. Oldenbourg Verlag, München 1974
- Fleischer, F.: Lernschwierigkeiten bei Behandlung von Grundbegriffen der Thermodynamik. In Physik in der Schule, Heft 4, (1991) Seite 140-144
- Gerstenmaier, J, Mandl, H.: Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. Zeitschrift für Pädagogik 41, Seite 867-888 (1995)
- Hammer, Knauth, Kühnel.:Physik 9A. Oldenbourg: München, (1993).
- Häußler, P., Hoffmann, L.: Physikunterricht für Mädchen und Jungen getrennt. In NiU-P/C, 1 (1990), Seite 12-14
- Häußer, P., Bündler, W. Duit, R, Gräber, W. Mayer, J.: Perspektiven für die Unterrichtspraxis, Kiel: IPN Schriftenreihe (1998)
- Hell. K.: Interesse und Leistungen in Physik bei Jungen und Mädchen. In NiU P/C 9 (1984) Seite 315 - 317
- Herrmann, F., Falk, G.: Ein moderner Physikkurs für Anfänger und seine Begründung. Schroedel Verlag,Hannover (1979)
- Hilscher, H.: Vorschlag einer an der heutigen Physik orientierten problembereinigten Unterrichtssequenz. Vortrag beim regionalen MNU-Tag in Hannover im September 1994
- Hoffmann, L., Lehrke, M.: Eine Zusammenstellung erster Ergebnisse an der Querschnitterhebung 1984 über Schüler-Interessen an Physik und Technik vom 5. bis 10. Schuljahr, Kiel: IPN, (1985)
- Hoffmann, L.: Mädchen und Physik – ein aktuelles, ein drängendes Thema. In NiU-P/C 1 (1990), Seite 4 - 11
- Hoffmann, L. Häußler, P. Peters-Haft, S: An den Interessen von Mädchen und Jungen orientierter Physikunterricht – Ergebnisse eines BLK-Modellversuchs. Kiel: IPN Schriftenreihe 155 (1997)
- Horstkemper, M.: Jungen und Mädchen in der Schule. Formale Gleichheit und unterschwellige Benachteiligung. Hamburg macht Schule 5, (1989), Seite 4-8
- Huis, Cor von, Berg, Ed van den: Teaching energy: a system approach. In Physics education, Volume 28 Number 3, (1993) Seite 146 - 153
- Jank, W., Meyer, H.: Didaktische Modelle, Cornelsen Verlag (1991)

- Jung, W. Weber, E. Wiesner, H.: Der Energiebegriff als Erhaltungsgröße. Ein Einführungskurs in der Sekundarstufe I. In *physica didactica*, Heft 1, (1977) Seite 1 – 20
- Kesidou, S., R. Duit: Wärme, Energie, Irreversibilität – Schülervorstellungen im herkömmlichen Unterricht und im Karlsruher Ansatz, In *physica didactica* Heft 2/3 (1991)
- L.D. Landau, E.M. Lifschitz, Lehrbuch der theoretischen Physik V, Akademie-Verlag-Berlin (1979)Seite 33
- Licht et al. Naturkunde in Blöcken, DBK vor de bovenbouw, Freie Universität Amsterdam (1990)
- Lie,S. Bryhni, E.: Girls and physics: Attitudes, experiences and unachievement. In: Contributions to the second GSAT conference. Oslo: University of Oslo (1983) Seite 202- 215
- Manthei, U.: Zur genetischen Begriffsdifferenzierung und Begriffspräzisierung in Physik in der Schule, Heft 9 (1980) Seite 389 - 398
- Manthei U.: Zustandsgröße und Prozeßgröße am Beispiel der Energie – Arbeit, Wärme, Strahlung. In Physik in der Schule, Heft 7/8 (1981) Seite 307 - 317
- Marenke, E.: Wärmekraftmaschinen und Carnot-Wirkungsgrad.In NiU, Heft 11 (1984)
- Mark,S., Young, K.: Misconceptions in teaching of heat. In *School Science review*, Band 68 (1987), Seite 646-470
- Nielsen, H., Thomsen, P.V: Die Einstellung von 16jährigen zum Physikunterricht, In NiU-P/C 33 (1985), Seite 118 - 121
- Ogborn, N. J.: Unterricht über Energie. In *physica didactica*, Heft 10, (1983), Seite 17 – 36
- Ormerod, M.B., Druckworth, D.: Pupils' attitude to science. A review of research. Windsor: NFER (1975)
- Piaget, J., Inhelder, B.: Le developpement des quantités physiques chez l'enfant. Paris (1941); Deutsche Übersetzung : Die Entwicklung der physikalischen Mengenbegriffe beim Kinde. Klett, Stuttgart (1969)
- Piaget, J.: La formation de la notion de force. Presses Universitaires de France, Paris (1973)
- Planck, M: Über die Begründung des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik: Sitzungsberichte der Preußischen Akademie der Wissenschaften. Berlin. Verlag der Akademie der Wissenschaften. (1921)
- Rogers, E.:*Physica for the Inquiring Mind*. Princeton, New Jersey, 1960
- Shayer, M., Wylam, H.: The development of the concepts of heat and temperature in 10-13 year-olds. In *Journal of research in science teaching*, Vol. 18, No 5 (1981) Seite 419-434
- Schlichting, H.J., Backhaus, U.: Energie als grundlegendes Konzept In PiU-P/C 2 (1979), Seite 139 – 152
- Thomaz, Marilia F., Malquias, I M, Valente, M C, Antunes, M J: An attempt to overcome alternative conceptions related to heat and temperature. In *Physics Education*, Volume 30 Number 1 (1995)
- Todt, E.: Schülerempfehlungen für einen interessanten Physikunterricht, In NiU-P/C 17 (1993), Seite 37 - 18
- Wiesner, H. Stengel, D.: Vorstellungen von Schülern der Primarstufe zu Temperatur und Wärme, In *Sachunterricht und Mathematik in der Primarstufe* Band 12 (1984), Seite 445-452

Vergleich der gesamt \overline{GP} -Werte der beiden Gruppen:

	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
\overline{GP}	16,0435	7,7909
σ	5,1949	4,0094
σ / \overline{GP}	32,38 %	51,46 %
N	92	110

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur mechanischen Energie der beiden Gruppen:

	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
\overline{GP}	9,2935	5,0364
σ	3,3432	3,1271
σ / \overline{GP}	35,97 %	62,09 %
N	92	110

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur Wärmelehre der beiden Gruppen:

	Versuchsgruppe	Kontrollgruppe
\overline{GP}	6,7500	2,7545
σ	2,8694	1,5923
σ / \overline{GP}	42,51 %	57,80 %
N	92	110

Vergleich der \overline{GP} beiden Gruppen unterteilt nach Lehrergruppen:

Lehrer		\overline{GP}	σ	σ / \overline{GP}	N
Schüler der Versuchsgruppe	1	20,9474	3,3578	16,03 %	19
	2	18,6667	3,1547	16,90 %	15
	3	14,1053	4,1217	29,22 %	19
	4	16,4706	4,1400	25,13 %	17
	5	11,3636	4,4566	39,22 %	22
Schüler der Kontrollgruppe	6	5,7857	2,2931	39,34 %	14
	7	10,7500	5,1896	48,27 %	12
	8	7,8148	3,8734	49,56 %	27
	9	7,0000	4,6152	65,83 %	21
	10	6,9524	3,0574	43,98 %	21
	11	9,5333	3,2704	34,31 %	15

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur mechanischen Energie der beiden Gruppen unterteilt nach Lehrergruppen:

Lehrer		\overline{GP}	σ	σ / \overline{GP}	N
Schüler der Versuchsgruppe	1	12,3684	2,2413	18,12 %	19
	2	9,8000	1,5675	15,99 %	15
	3	8,2105	3,3925	41,32 %	19
	4	9,9412	3,0098	30,28 %	17
	5	6,7273	2,9469	43,81 %	22
Schüler der Kontrollgruppe	6	2,8571	1,8337	64,18 %	14
	7	7,0000	4,3275	61,82 %	12
	8	5,3333	2,8148	52,78 %	27
	9	4,1429	3,1510	76,06 %	21
	10	4,4762	2,2499	50,26 %	21
	11	7,0000	2,8536	40,77 %	15

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur Wärmelehre der beiden Gruppen unterteilt nach Lehrergruppen:

Lehrer		\overline{GP}	σ	σ / \overline{GP}	N
Schüler der Versuchsgruppe	1	8,5789	2,4110	28,10 %	19
	2	8,8667	1,9952	22,50 %	15
	3	5,8947	2,3308	39,54 %	19
	4	6,5294	2,1540	32,99 %	17
	5	4,6364	2,8710	62,06 %	22
Schüler der Kontrollgruppe	6	2,9286	1,4392	49,14 %	14
	7	3,7500	1,7645	47,05 %	12
	8	2,4815	1,6022	64,56 %	27
	9	2,8571	1,8516	64,81 %	21
	10	2,4762	1,5368	62,06 %	21
	11	2,5333	1,0601	41,85 %	15

Vergleich der gesamt \overline{GP} -Werte der beiden Gruppen unterteilt nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

		\overline{GP}	σ	σ / \overline{GP}	N
Schüler der Versuchsgruppe	AB	18,2500	4,3409	23,83 %	44
	C	14,2000	5,2438	36,93 %	40
	DE	13,1250	4,7037	35,84 %	8
Schüler der Kontrollgruppe	AB	8,5686	3,7162	43,37 %	51
	C	7,4583	4,3465	58,28 %	48
	DE	5,6364	2,9419	52,19 %	11

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur mechanischen Energie der beiden Gruppen unterteilt nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

		\overline{GP}	σ	σ / \overline{GP}	N
Schüler der Versuchsgruppe	AB	10,7955	2,4072	22,30 %	44
	C	8,1000	3,5934	44,36 %	40
	DE	7,0000	3,0706	43,87 %	8
Schüler der Kontrollgruppe	AB	5,8039	2,9733	51,23 %	51
	C	4,6458	3,1250	67,27 %	48
	DE	3,1818	2,9939	94,09 %	11

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur Wärmelehre der beiden Gruppen unterteilt nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

		\overline{GP}	σ	σ / \overline{GP}	N
Schüler der Versuchsgruppe	AB	7,4545	2,8971	38,86 %	44
	C	6,1000	2,7901	45,74 %	40
	DE	6,1250	2,4749	40,41 %	8
Schüler der Kontrollgruppe	AB	2,7647	1,6442	59,47 %	51
	C	2,8125	1,6587	58,98 %	48
	DE	2,4545	1,0357	42,20 %	11

Vergleich der \overline{GP} -Werte der beiden Gruppen unterteilt nach dem Geschlecht:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	Mädchen	Jungen	Mädchen	Jungen
\overline{GP}	16,3750	15,7885	6,4231	9,0172
σ	4,8394	5,4856	3,0509	4,3789
σ / \overline{GP}	29,55 %	34,74 %	47,50 %	48,56 %
N	40	52	52	58

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur mechanischen Energie der beiden Gruppen unterteilt nach dem Geschlecht:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	Mädchen	Jungen	Mädchen	Jungen
\overline{GP}	9,4250	9,1923	4,0962	5,8793
σ	3,2964	3,4072	2,1168	3,6278
σ / \overline{GP}	34,98 %	37,07 %	51,68 %	61,70 %
N	40	52	52	58

Vergleich der \overline{GP} -Werte zur Wärmelehre der beiden Gruppen unterteilt nach dem Geschlecht:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	Mädchen	Jungen	Mädchen	Jungen
\overline{GP}	6,9500	6,5962	2,3269	3,1379
σ	2,5815	3,0886	1,4103	1,6591
σ / \overline{GP}	37,14 %	46,82 %	60,61 %	52,87 %
N	40	52	52	58

Vergleich der GP-Werte zur Mechanik der beiden Gruppen:

GP-Werte	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	N	%	N	%
0	0%	0	4	3,6%
1	1,1%	1	9	8,2%
2	3,3%	3	6	5,5%
3	1,1%	1	15	13,6%
4	3,3%	3	22	20,0%
5	7,6%	7	18	16,4%
6	4,3%	4	11	10,0%
7	7,6%	7	4	3,6%
8	8,7%	8	5	4,5%
9	10,9%	10	2	1,8%
10	15,2%	14	6	5,5%
11	5,4%	5	3	2,7%
12	16,3%	15	2	1,8%
13	0%	0	1	0,9%
14	15,2%	14	2	1,8%

Vergleich der GP-Werte zur Wärmelehre der beiden Gruppen:

GP-Werte	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	N	%	N	%
0	0%	0	1	,9%
1	4,3%	4	23	20,9%
2	3,3%	3	32	29,1%
3	9,8%	9	27	24,5%
4	6,5%	6	14	12,7%
5	9,8%	9	5	4,5%
6	7,6%	7	3	2,7%
7	16,3%	15	4	3,6%
8	13,0%	12	1	0,9%
9	10,9%	10	0%	0
10	7,6%	7	0%	0
11	9,8%	9	0%	0
12	0%	0	0%	0
13	1,1%	1	0%	0

Vergleich der GP-Werte zur Wärmelehre der beiden Gruppen:

GP-Werte	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	N	%	N	%
0	0%	0	0%	0
1	0%	0	0%	0
2	0%	0	4,5%	5
3	2,2%	2	5,5%	6
4	1,1%	1	9,1%	10
5	0%	0	10,9%	12
6	1,1%	1	13,6%	15
7	2,2%	2	15,5%	17
8	2,2%	2	6,4%	7
9	3,3%	3	9,1%	10
10	2,2%	2	5,5%	6
11	2,2%	2	4,5%	5
12	6,5%	6	2,7%	3
13	5,4%	5	2,7%	3
14	8,7%	8	0,9%	1
15	5,4%	5	2,7%	3
16	12,0%	11	,9%	1
17	6,5%	6	2,7%	3
18	7,6%	7	0,9%	1
19	5,4%	5	0,9%	1
20	3,3%	3	0%	0
21	6,5%	6	0,9%	1
22	5,4%	5	0%	0
23	3,3%	3	0%	0
24	2,2%	2	0%	0
25	5,4%	5	0%	0
26	0%	0	0%	0
27	0%	0	0%	0

Vergleich der Ergebnisse des Vortests:

Item 1:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Kraft als Ursache für Bewegungsänderung und / oder Verformung	45,6%	42	37,3%	42
2. Kraft bewegt einen Körper	13,0%	12	25,5%	28
3. Ausschließliche Nennung von Beispielen	15,2%	14	10,0%	11
4. Kraft charakterisiert durch Angriffspunkt, Betrag und Richtung	2,2%	2	5,5%	6
5. Kraft ist Energie	5,4%	5	0,9%	1
6. Sonstige oder keine Antwort	18,5%	17	20,9%	23

Item 1:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Kraft als Ursache für Bewegungsänderung und Verformung	42,5%	17	48,1%	25	36,6%	19	37,9%	22
2. Kraft bewegt einen Körper	15,0%	6	11,5%	6	21,2%	11	29,3%	17
3. Ausschließliche Nennung von Beispielen	20,0%	8	11,5%	6	15,4%	8	5,2%	3
4. Kraft charakterisiert durch Angriffspunkt, Betrag und Richtung	2,5%	1	1,9%	1	5,8%	3	5,2%	3
5. Kraft ist Energie	2,5%	1	7,7%	4	0%	0	1,7%	1
6. Sonstige oder keine Antwort	17,5%	7	19,2%	10	21,2%	11	20,7%	12

Item 2:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Wegen der Energie	6,5%	6	13,6%	15
2. Weil der Ball elastisch ist	33,7%	31	27,3%	30
3. Wegen der Kraft / Schwerkraft	13,0%	12	15,5%	17
4. Wegen der Geschwindigkeit	6,5%	6	1,8%	2
5. Sonstige und keine Antwort	40,2%	37	41,8%	46

Item 2:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen der Energie	7,5%	3	5,7%	3	19,2%	10	8,6%	5
2. Weil der Ball elastisch ist	30,0%	12	36,5%	19	25,0%	13	29,3%	17
3. Wegen der Kraft / Schwerkraft	15,0%	6	11,5%	6	21,2%	11	10,3%	6
4. Wegen der Geschwindigkeit	7,5%	3	5,8%	3	0%	0	3,4%	2
5. Sonstige und keine Antwort	40,0%	16	40,4%	21	34,6%	18	48,3%	28

Item 3:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Der Ball verliert Energie	10,9%	10	16,3%	18
2. Wegen des Luftwiderstandes und / oder der Reibung	14,1%	13	11,8%	13
3. Der Ball verliert Kraft	9,8%	9	18,2%	20
4. Wegen der Schwerkraft	54,3%	50	36,4%	40
5. Sonstige und keine Antwort	10,9%	10	17,3%	19

Item 3:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Der Ball verliert Energie / Schwung	12,5%	5	9,6%	5	25,0%	13	8,6%	5
2. Wegen des Luftwiderstandes und / oder der Reibung	10,0%	4	17,3%	9	3,8%	2	19,0%	11
3. Der Ball verliert Kraft	15,0%	6	5,8%	3	21,2%	11	15,5%	9
4. Wegen der Schwerkraft	55,0%	22	53,8%	28	30,8%	16	41,4%	24
5. Sonstige und keine Antwort	7,5%	3	13,5%	7	19,2%	10	15,5%	9

Item 4:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Stromverbrauch	30,4%	28	32,7%	36
2. Stromverbrauch und Energie- verbrauch bei der Bewegung eines Lebewesens	7,6%	7	6,4%	7
3. Stromverbrauch und andere Beispiele für den Energieverbrauch	19,6%	18	24,5%	27
4. Energieverbrauch bei der Bewegung eines Lebewesens	6,5%	6	5,5%	6
5. Andere Beispiele für den Energieverbrauch	12,0%	11	19,1%	21
6. Sonstige und keine Antwort	23,9%	22	11,8%	13

Item 4 :

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Stromverbrauch	30,0%	12	30,8%	16	38,5%	20	27,6%	16
2. Stromverbrauch und Energieverbrauch bei der Bewegung eines Lebewesens	10,0%	4	5,8%	3	11,5%	6	1,7%	1
3. Stromverbrauch und andere Beispiele für den Energieverbrauch	17,5%	7	21,2%	11	17,3%	9	31,0%	18
4. Energieverbrauch bei der Bewegung eines Lebewesens	7,5%	3	5,8%	3	1,9%	1	8,6%	5
5. Andere Beispiele für den Energieverbrauch	12,5%	5	11,5%	6	17,3%	9	20,7%	12
6. Sonstige und keine Antwort	22,5%	9	25,0%	13	13,5%	7	10,3%	6

Item 5:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Der Bohrer wird wegen der Energieumwandlung heiß	5,4%	5	7,3%	8
2. Reibung erzeugt Hitze / Wärme	34,8%	32	41,8%	46
3. Der Bohrer wird wegen der Reibung warm	58,7%	54	49,1%	54
4. Sonstige und keine Antworten	1,1%	1	1,8%	2

Item 5 :

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Der Bohrer wird wegen der Energieumwandlung heiß	5,0%	2	5,8%	3	9,6%	5	5,2%	3
2. Reibung erzeugt Hitze / Wärme	27,5%	11	40,4%	21	32,7%	17	50,0%	29
3. Der Bohrer wird wegen der Reibung warm	67,5%	27	51,9%	27	57,7%	30	41,4%	24
4. Sonstige und keine Antworten	0%	0	1,9%	1	0%	0	3,4%	2

Item 6:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Metall leitet besser	10,9%	10	13,6%	15
2. Metall nimmt Wärme besser (schneller) auf / gibt Kälte besser ab	6,5%	6	2,7%	3
3. Metall wird schneller kälter	4,3%	4	1,8%	2
4. Metall nimmt Kälte schneller (besser) auf	17,4%	16	20,9%	23
5. Metall speichert Kälte besser	21,7%	20	19,1%	21
6. Metall speichert Kälte besser und ist daher kälter	9,8%	9	10,9%	12
7. Sonstige und keine Antwort	29,3%	27	30,9%	34

Item 6 :

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Metall leitet besser	12,5%	5	9,6%	5	5,8%	3	20,7%	12
2. Metall nimmt Wärme besser (schneller) auf / gibt Kälte besser ab	2,5%	1	9,6%	5	0	0%	5,2%	3
3. Metall wird schneller kälter	7,5%	3	1,9%	1	1,9%	1	1,7%	1
4. Metall nimmt Kälte schneller (besser) auf	27,5%	11	9,6%	5	25,0%	13	17,2%	10
5. Metall speichert Kälte besser	22,5%	9	21,2%	11	19,2%	10	19,0%	11
6. Metall speichert Kälte besser und ist daher kälter	7,5%	3	11,5%	6	11,5%	6	10,3%	6
7. Sonstige und keine Antwort	20,0%	8	36,5%	19	36,5%	19	25,9%	15

Item 7:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Ich stelle das Eis auf den Metallblock	80,4%	74	79,1%	87
2. Ich wickle das Eis in einen dicken Wollpullover	19,6%	18	20,0%	22
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0,9%	1

Item 7 :

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Ich stelle das Eis auf den Metallblock	72,5%	29	86,5%	45	88,5%	46	70,7%	41
2. Ich wickle das Eis in einen dicken Wollpullover	27,5%	11	13,5%	7	11,5%	6	27,6%	16
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0	1,7%	1

Item 7:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen.

Es werden nur die Schüler berücksichtigt, die Metall angekreuzt haben:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Metall gibt Wärme ab, Wolle isoliert	17,6%	13	9,2%	8
2. Metall hat Wärme gespeichert	8,1%	6	9,2%	8
3. Wolle isoliert	10,8%	8	14,9%	13
4. Der Metallblock hält seine Temperatur länger.	17,6%	13	5,7%	5
5. Sonstige oder keine Begründung	45,9%	34	60,9%	53

Item 7:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Er werden nur die Schüler berücksichtigt, die Wolle angekreuzt haben:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Wolle macht es rund herum warm	38,9%	7	45,5%	10
2. Wolle hat Wärme gespeichert	16,7%	3	9,1%	2
3. Metall wird schneller kalt als Wolle	33,3%	6	31,8%	7
4. Wolle, sonstige oder keine Antwort	11,1%	2	13,6%	3

Vergleich der Ergebnisse des Lernerfolgstests I:

Item 1a: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	80,4%	74	69,1%	76
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	19,6%	18	30,9%	34
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0

Item 1a: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	72,5%	29	86,5%	45	65,4%	34	72,4%	42
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	27,5%	11	13,5%	7	34,6%	18	27,6%	16
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0

Item 1a: Antwortverhalten beim Münchner Unterrichtskonzept differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	90,9%	40	72,5%	29	62,5%	5
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	9,1%	4	27,5%	11	37,5%	3
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0

Item 1a: Antwortverhalten beim konventionellen Unterrichtskonzept differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	82,4%	42	64,6%	31	27,3%	3
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	17,6%	9	35,4%	17	72,7%	8
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0

Item 1a: Unterscheidung nach der angegebenen Geschwindigkeit und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch	53,3%	49	15,5%	17
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	27,2%	25	53,6%	59
3. Sonstige oder keine Antwort	19,6%	18	30,9%	34

Item 1a: Unterscheidung nach der angegebenen Geschwindigkeit und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch	40,0%	16	63,5%	33	3,8%	2	25,9%	15
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	32,5%	13	23,1%	12	61,5%	32	46,6%	27
3. Sonstige oder keine Antwort	27,5%	11	13,5%	7	34,6%	18	27,6%	16

Item 1a: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Antwortverhalten beim Münchner Unterrichtskonzept nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch	65,9%	29	40,0%	16	50,0%	4
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	25,0%	11	32,5%	13	12,5%	1
3. Sonstige oder keine Antwort	9,1%	4	27,5%	11	37,5%	3

Item 1a: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Antwortverhalten beim konventionellen Unterrichtskonzept differenziert nach den
zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch	17,6%	9	16,7%	8	0%	0
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	64,7%	33	47,9%	23	27,3%	3
3. Sonstige oder keine Antwort	17,6%	9	35,4%	17	72,7%	8

Item 1a: Genaue Betrachtung der Begründungen:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	52,7%	39	5,6%	1	22,4%	17	2,9%	1
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat	13,5%	10	0%	0	0%	0	0%	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	5,4%	4	16,7%	3	21,1%	16	14,7%	5
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	14,9%	11	11,1%	2	38,2%	29	23,5%	8
5. Wegen der Hangabtriebskraft	0%	0	44,4%	8	1,3%	1	17,6%	6
6. Sonstige oder keine Begründung	13,5%	10	22,2%	4	17,1%	13	41,2%	14

Item 1a: Unterscheidung nach der angegebenen Geschwindigkeit und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	30,0%	12	53,8%	28	5,8%	3	25,9%	15
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat	10,0%	4	11,5%	6	0%	0	0%	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	5,0%	2	9,6%	5	21,2%	11	17,2%	10
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	17,5%	7	11,5%	6	36,5%	19	31,0%	18
5. Wegen der Hangabtriebskraft	17,5%	7	1,9%	1	9,6%	5	3,4%	2
6. Sonstige oder keine Begründung	20,0%	8	11,5%	6	26,9%	14	22,4%	13

Item 1a:

Begründungen beim Münchner Unterrichtskonzept differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen											
	AB				C				DE			
	v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich	
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	62,5	25	0	0	37,9	11	9,1	1	60,0	3	0	0
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat.	10,0	4	0	0	17,2	5	0	0	20,0	1	0	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	2,5	1	25,0	1	10,3	3	9,1	1	0	0	33,3	1
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	10,0	4	25,0	1	20,7	6	9,1	1	20,0	1	0	0
5. Wegen der Hangabtriebskraft	0	0	25,0	1	0	0	63,6	7	0	0	0	0
6. Sonstige oder keine Begründung	15,0	6	25,0	1	13,8	4	9,1	1	0	0	66,7	2

Item 1a:

Begründungen beim konventionellen Unterrichtskonzept differenziert den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen											
	AB				C				DE			
	v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich	
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	21,4	9	11,1	1	25,8	8	0%	0	0%	0	0%	0
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat.	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	23,8	10	22,2	2	16,1	5	5,9	1	33,3	1	25,0	2
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	31,0	13	11,1	1	45,2	14	29,4	5	66,7	2	25,0	2
5. Wegen der Hangabtriebskraft	2,4	1	11,1	1	0%	0	23,5	4	0%	0	12,5	1
6. Sonstige oder keine Begründung	21,4	9	44,4	4	12,9	4	41,2	7	0%	0	37,5	3

Item 1b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	68,5%	63	30,0%	33
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	31,5%	29	68,2%	75
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	1,8%	2

Item 1b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	65,0%	26	71,2%	37	19,2%	10	39,7%	23
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	35,0%	14	28,8%	15	80,8%	42	56,9%	33
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0	3,4%	2

Item 1b: Antwortverhalten beim Münchner Unterrichtskonzept differenziert den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	86,4%	38	50,0%	20	62,5%	5
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	13,6%	6	50,0%	20	37,5%	3
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0

Item 1b: Antwortverhalten beim konventionellen Unterrichtskonzept differenziert den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher wieder die gleiche Geschwindigkeit	35,3%	18	29,2%	14	9,1%	1
2. Das Auto hat nachher eine andere Geschwindigkeit	64,7%	33	70,8%	34	72,7%	8
3. Sonstige und keine Antwort	0%	0	0%	0	18,2%	2

Item 1b: Unterscheidung nach der angegebenen Geschwindigkeit und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch	40,2%	37	12,7%	14
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	28,3%	26	17,3%	19
3. Sonstige oder keine Antwort	31,5%	29	70,0%	77

Item 1b: Unterscheidung nach der angegebenen Geschwindigkeit und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch	30,0%	12	48,1%	25	1,9%	1	22,4%	13
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	35,0%	14	23,1%	12	17,3%	9	17,2%	10
3. Sonstige oder keine Antwort	35,0%	14	28,8%	15	80,8%	42	60,3%	35

Item 1b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Antwortverhalten beim Münchner Unterrichtskonzept differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch	56,8%	25	22,5%	9	37,5%	3
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	29,5%	13	27,5%	11	25,0%	2
3. Sonstige oder keine Antwort	13,6%	6	50,0%	20	37,5%	3

Item 1b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Geschwindigkeit
Antwortverhalten beim konventionellen Unterrichtskonzept differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit; Begründung: Energieerhaltungssatz oder das Auto ist nachher wieder gleich hoch.	15,7%	8	12,5%	6	0%	0
2. Das Auto hat nachher die gleiche Geschwindigkeit mit sonstiger oder keiner Begründung	19,6%	10	16,7%	8	9,1%	1
3. Sonstige oder keine Antwort	64,7%	33	70,8%	34	90,9%	10

Item 1b: Genaue Betrachtung der Begründungen:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	50,0%	37	0%	0	18,4%	14	2,9%	1
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat	12,2%	9	0%	0	0%	0	0%	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	4,1%	3	22,2%	4	14,5%	11	11,8%	4
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	13,5%	10	16,7%	3	51,3%	39	32,4%	11
5. Wegen der Hangabtriebskraft	2,7%	2	38,9%	7	1,3%	1	14,7%	5
6. Sonstige oder keine Begründung	17,6%	13	22,2%	4	14,5%	11	38,2%	13

Item 1cd: Unterscheidung nach der angegebenen Geschwindigkeit und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	30,0%	12	48,1%	25	3,8%	2	22,4%	13
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat	10,0%	4	9,6%	5	0%	0	0%	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	2,5%	1	11,5%	6	15,4%	8	12,1%	7
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	17,5%	7	11,5%	6	50,0%	26	41,4%	24
5. Wegen der Hangabtriebskraft	17,5%	7	3,8%	2	7,7%	4	3,4%	2
6. Sonstige oder keine Begründung	22,5%	9	15,4%	8	23,1%	12	20,7%	12

Item 1b:
Begründungen beim Münchner Unterrichtskonzept differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen											
	AB				C				DE			
	v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich	
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	62,5	25	0	0	31,0	9	0	0	60,0	3	0	0
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat	10,0	4	0	0	13,8	4	0	0	20,0	1	0	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	2,5%	1	25,0	1	6,9	2	9,1	1	0	0	66,7	2
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	10,0	4	25,0	1	17,2	5	18,2	2	20,0	1	0	0
5. Wegen der Hangabtriebskraft	0	0	25,0	1	6,9%	2	54,5	6	0	0	0	0
6. Sonstige oder keine Begründung	15,0	6	25,0	1	24,1	7	18,2	2	0	0	33,3	1

Item 1b:

Begründungen beim konventionellen Unterrichtskonzept differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen											
	AB				C				DE			
	v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich		v ist nachher gleich		v ist nachher nicht gleich	
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	44,4	8	3,0	1	42,9	6	0	0	0	0	0	0
2. Da das Auto nachher wieder die gleiche Höhe hat.	0	0	0	0	0	0	14,7	5	0	0	0	0
3. Da sich die Geschwindigkeit während der Fahrt verändert	27,8	5	12,1	4	0	0	52,9	18	100,0	1	0	0
4. Wegen der Steilheit / Länge der Bahn	11,1	2	69,7	23	21,4	3	8,8	3	0	0	50,0	4
5. Wegen der Hangabtriebskraft	0	0	6,1	2	0	0	23,5	8	0	0	12,5	1
6. Sonstige oder keine Begründung	16,7	3	9,1	3	35,7	5	0	0	0	0	37,5	3

Item 2:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	48,9%	45	3,6%	4
2. Die Energie wird durch Arbeit geändert	14,1%	13	18,2%	20
3. Energie ist gleich gespeicherter Arbeit	0%	0	14,5%	16
4. Um Arbeit zu verrichten braucht man Energie	8,7%	8	14,5%	16
5. Arbeit und Energie haben die gleichen Formeln	4,3%	4	6,4%	7
6. Arbeit und Energie ist das Gleiche	2,2%	2	18,2%	20
7. Sonstige oder keine Antwort	21,7%	20	24,5%	27

Item 2:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	55,0%	22	44,2%	23	5,8%	3	1,7%	1
2. Die Energie wird durch Arbeit geändert	12,5%	5	15,4%	8	13,5%	7	22,4%	13
3. Energie ist gleich gespeicherter Arbeit	0%	0	0%	0	17,3%	9	12,1%	7
4. Um Arbeit zu verrichten braucht man Energie	5,0%	2	11,5%	6	19,2%	10	10,3%	6
5. Arbeit und Energie haben die gleichen Formeln	0%	0	7,7%	4	5,8%	3	6,9%	4
6. Arbeit und Energie ist das Gleiche	2,5%	1	1,9%	1	11,5%	6	24,1%	14
7. Sonstige oder keine Antwort	25,0%	10	19,2%	10	26,9%	14	22,4%	13

Item 2:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	68,2%	30	30,0%	12	37,5%	3
2. Die Energie wird durch Arbeit geändert	13,6%	6	15,0%	6	12,5%	1
3. Energie ist gleich gespeicherter Arbeit	0%	0	0%	0	0%	0
4. Um Arbeit zu verrichten braucht man Energie	9,1%	4	10,0%	4	0%	0
5. Arbeit und Energie haben die gleichen Formeln	2,3%	1	7,5%	3	0%	0
6. Arbeit und Energie ist das Gleiche	0%	0	5,0%	2	0%	0
7. Sonstige oder keine Antwort	6,8%	3	32,5%	13	50,0%	4

Item 2:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	5,9%	3	2,1%	1	0%	0
2. Die Energie wird durch Arbeit geändert	11,8%	6	27,1%	13	9,1%	1
3. Energie ist gleich gespeicherter Arbeit	23,5%	12	8,3%	4	0%	0
4. Um Arbeit zu verrichten braucht man Energie	11,8%	6	18,8%	9	9,1%	1
5. Arbeit und Energie haben die gleichen Formeln	9,8%	5	4,2%	2	0%	0
6. Arbeit und Energie ist das Gleiche	17,6%	9	20,8%	10	9,1%	1
7. Sonstige oder keine Antwort	19,6%	10	18,8%	9	72,7%	8

Item 3:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (W = ΔE)	47,8%	44	20,9%	23
2. Sonstige oder keine Antwort	52,2%	48	79,1%	87

Item 3:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (W = ΔE)	47,5%	19	48,1%	25	15,4%	8	25,9%	15
2. Sonstige oder keine Antwort	52,5%	21	51,9%	27	84,6%	44	74,1%	43

Item 3:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (W = ΔE)	61,4%	27	40,0%	16	12,5%	1
2. Sonstige oder keine Antwort	38,6%	17	60,0%	24	87,5%	7

Item 3:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (W = ΔE)	19,6%	10	22,9%	11	18,2%	2
2. Sonstige oder keine Antwort	80,4%	41	77,1%	37	81,8%	9

Item 4 a:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (W = ΔE)	75,0%	69	54,5%	60
2. Sonstige oder keine Antwort	25,0%	23	45,5%	50

Item 4 a:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (W = ΔE)	85,0%	34	67,3%	35	44,2%	23	63,8%	37
2. Sonstige oder keine Antwort	15,0%	6	32,7%	17	55,8%	29	36,2%	21

Item 4 a:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort ($W = \Delta E$)	86,4%	38	67,5%	27	50,0%	4
2. Sonstige oder keine Antwort	13,6%	6	32,5%	13	50,0%	4

Item 4 a:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort ($W = \Delta E$)	52,9%	27	56,3%	27	54,5%	6
2. Sonstige oder keine Antwort	47,1%	24	43,8%	21	45,5%	5

Item 4 b:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Richtige Antwort mit $\Delta E = W$	69,6%	64	39,1%	43
2. Richtige Antwort gerechnet über die Anzahl der Flaschen	3,3%	3	4,5%	5
3. Sonstige oder keine Antwort	27,2%	25	56,4%	62

Item 4 b:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort mit $\Delta E = W$	87,5%	35	55,8%	29	32,7%	17	44,8%	26
2. Richtige Antwort gerechnet über die Anzahl der Flaschen	0%	0	5,8%	3	5,8%	3	3,4%	2
3. Sonstige oder keine Antwort	12,5%	5	38,5%	20	61,5%	32	51,7%	30

Item 4 b:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort mit $\Delta E = W$	75,0%	33	70,0%	28	37,5%	3
2. Richtige Antwort gerechnet über die Anzahl der Flaschen	4,5%	2	0%	0	12,5%	1
3. Sonstige oder keine Antwort	20,5%	9	30,0%	12	50,0%	4

Item 4 b:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort mit $\Delta E = W$	51,0%	26	29,2%	14	27,3%	3
2. Richtige Antwort gerechnet über die Anzahl der Flaschen	5,9%	3	4,2%	2	0%	0
3. Sonstige oder keine Antwort	43,1%	22	66,7%	32	72,7%	8

Item 5a: Unterscheidung ausschließlich nach der Höhe:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch	69,6%	64	37,3%	41
2. Sonstige und keine Antwort	30,4%	28	62,7%	69

Item 5a: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Höhe

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch	62,5%	25	75,0%	39	38,5%	20	36,2%	21
2. Sonstige und keine Antwort	37,5%	15	25,0%	13	61,5%	32	63,8%	37

Item 5a und b : Unterscheidung nach der angegebenen Höhe und der zugehörigen Begründung

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch	79,5%	35	60,0%	24	62,5%	5
2. Sonstige und keine Antwort	20,5%	9	40%	16	37,5%	3

Item 5a und b: Unterscheidung nach der angegebenen Höhe und der zugehörigen Begründung

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch	43,1%	22	31,3%	15	36,4%	4
2. Sonstige und keine Antwort	56,8%	29	68,8%	33	63,7%	7

Item 5a und b : Unterscheidung nach der angegebenen Höhe und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch wegen des Energieerhaltungssatzes	45,7%	42	14,5%	16
2. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch mit keiner oder sonstiger Begründung	23,9%	22	22,7%	25
3. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite nicht gleich hoch, mit keiner oder sonstiger Begründung	30,4%	28	62,7%	69

Item 5a und b : Unterscheidung nach der angegebenen Höhe und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch wegen des Energieerhaltungssatzes	37,5%	15	51,9%	27	13,5%	7	15,5%	9
2. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch, mit keiner oder sonstiger Begründung	25,0%	10	23,1%	12	25,0%	13	20,7%	12
3. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite nicht gleich hoch mit keiner oder sonstiger Begründung	37,5%	15	25,0%	13	61,5%	32	63,8%	37

Item 5a und b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Höhe
Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch wegen des Energieerhaltungssatzes	59,1%	26	35,0%	14	25,0%	2
2. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch, mit keiner oder sonstiger Begründung	20,5%	9	25,0%	10	37,5%	3
3. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite nicht gleich hoch mit keiner oder sonstiger Begründung	20,5%	9	40,0%	16	37,5%	3

Item 5a und b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Höhe
Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch wegen des Energieerhaltungssatzes	23,5%	12	6,3%	3	9,1%	1
2. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite gleich hoch mit keiner oder sonstiger Begründung	19,6%	10	25,0%	12	27,3%	3
3. Der Pendelkörper kommt auf der anderen Seite nicht gleich hoch, mit keiner oder sonstiger Begründung	56,9%	29	68,8%	33	63,6%	7

Item 5a und b: Genaue Betrachtung der Begründungen:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch		Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	65,6%	42	3,6%	1	39,0%	16	0%	0
2. Das kürzere Seil hat mehr Energie (Schwung)	0%	0	10,7%	3	4,9%	2	20,3%	14
3. Da nur das untere Stück des Seils schwingen kann	0%	0	0%	0	0%	0	10,1%	7
4. Sonstige oder keine Begründung	34,4%	22	85,7%	24	56,1%	23	69,6%	48

Item 5a und b:
Begründungen der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen											
	AB				C				DE			
	Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch		Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch		Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch	
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	74,3	26	0	0	58,3	14	6,3%	1	40,0	2	0	0
2. Das kürzere Seil hat mehr Energie (Schwung)	0	0	22,2%	2	0	0	0	0	0	0	33,3%	1
3. Da nur das untere Stück des Seils schwingen kann	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4. Sonstige oder keine Begründung	25,7	9	77,8	7	41,7	10	93,8	15	60,0	3	66,7	2

Item 5a und b:

Begründungen der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen											
	AB				C				DE			
	Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch		Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch		Pendel kommt gleich hoch		Pendel kommt nicht gleich hoch	
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des Energieerhaltungssatzes	54,5	12	0%	0	20,0	3	0%	0	25,0	1	0%	0
2. Das kürzere Seil hat mehr Energie (Schwung)	0	0	10,3%	3	0	0	27,3%	9	0	0	28,6%	2
3. Da nur das untere Stück des Seils schwingen kann	0	0	3,4%	1	6,7	1	18,2%	6	25,0	1	0	0
4. Sonstige oder keine Begründung	45,5	10	86,2%	25	73,3	11	54,5%	18	50,0	2	71,4%	5

Item 6:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Nennung des Energieerhaltungssatzes	10,9%	10	2,7%	3
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und /oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat	32,6%	30	3,6%	4
3. Nur Nennung von Energiearten	15,2%	14	8,2%	9
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit	0%	0	9,1%	10
5. Energie ist gespeicherte Arbeit	0%	0	25,5%	28
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten	0%	0	6,4%	7
7. Energie ist Kraft	16,3%	15	11,8%	13
8. Sonstige und keine Antwort	25,0%	23	32,7%	36

Item 6:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Nennung des Energieerhaltungssatzes	12,5%	5	9,6%	5	3,8%	2	1,7%	1
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und /oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat	27,5%	11	36,5%	19	1,9%	1	5,2%	3
3. Nur Nennung von Energiearten	20,0%	8	11,5%	6	9,6%	5	6,9%	4
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit	0%	0	0%	0	9,6%	5	8,6%	5
5. Energie ist gespeicherte Arbeit	0%	0	0%	0	21,2%	11	29,3%	17
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten	0%	0	0%	0	5,8%	3	6,9%	4
7. Energie ist Kraft	17,5%	7	15,4%	8	13,5%	7	10,3%	6
8. Sonstige und keine Antwort	22,5%	9	26,9%	14	34,6%	18	31,0%	18

Item 6:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Nennung des Energieerhaltungssatzes	13,6%	6	10,0%	4		
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und /oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat	31,8%	14	32,5%	13	37,5%	3
3. Nur Nennung von Energiearten	18,2%	8	12,5%	5	12,5%	1
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit	0%	0	0%	0	0%	0
5. Energie ist gespeicherte Arbeit	0%	0	0%	0	0%	0
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten	0%	0	0%	0	0%	0
7. Energie ist Kraft	18,2%	8	15,0%	6	12,5%	1
8. Sonstige und keine Antwort	18,2%	8	30,0%	12	37,5%	3

Item 6:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Nennung des Energieerhaltungssatzes	2,0%	1	4,2%	2	0%	0
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und /oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat	5,9%	3	2,1%	1	0%	0
3. Nur Nennung von Energiearten	9,8%	5	8,3%	4	0%	0
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit	7,8%	4	12,5%	6	0%	0
5. Energie ist gespeicherte Arbeit	27,5%	14	27,1%	13	9,1%	1
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten	5,9%	3	6,3%	3	9,1%	1
7. Energie ist Kraft	9,8%	5	12,5%	6	18,2%	2
8. Sonstige und keine Antwort	31,4%	16	27,1%	13	63,6%	7

Item 7:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	52,2%	48	2,7%	3
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg	7,6%	7	0%	0
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg	8,7%	8	41,8%	46
4. Beim Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.	8,7%	8	10,9%	12
5. Arbeit ist Kraft	4,3%	4	11,8%	13
6. Sonstige oder keine Antwort	18,5%	17	32,7%	36

Item 7:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	45,0%	18	57,7%	30	1,9%	1	3,4%	2
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg	7,5%	3	7,7%	4	0%	0	0%	0
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg	12,5%	5	5,8%	3	40,4%	21	43,1%	25
4. Beim Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.	10,0%	4	7,7%	4	7,7%	4	13,8%	8
5. Arbeit ist Kraft	5,0%	2	3,8%	2	13,5%	7	10,3%	6
6. Sonstige oder keine Antwort	20,0%	8	17,3%	9	36,5%	19	29,3%	17

Item 7:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	54,5%	24	50,0%	20	50,0%	4
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg	11,4%	5	5,0%	2	0%	0
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg	6,8%	3	12,5%	5	0%	0
4. Beim Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.	6,8%	3	10,0%	4	12,5%	1
5. Arbeit ist Kraft	4,5%	2	5,0%	2	0%	0
6. Sonstige oder keine Antwort	15,9%	7	17,5%	7	37,5%	3

Item 7:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach dem zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)	3,9%	2	2,1%	1	0%	0
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg	0%	0	0%	0	0%	0
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg	41,2%	21	45,8%	22	27,3%	3
4. Beim Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.	5,9%	3	14,6%	7	18,2%	2
5. Arbeit ist Kraft	11,8%	6	10,4%	5	18,2%	2
6. Sonstige oder keine Antwort	37,3%	19	27,1%	13	36,4%	4

Item 8:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. $\Delta E_h = \Delta E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$	87,0%	80	45,5%	50
Sonstige oder keine Antwort	13,0%	12	54,5%	60

Item 8:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. $\Delta E_h = \Delta E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$	92,5%	37	82,7%	43	38,5%	20	51,7%	30
Sonstige oder keine Antwort	7,5%	3	17,3%	9	61,5%	32	48,3%	28

Item 8:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. $\Delta E_h = \Delta E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$	90,9%	40	82,5%	33	87,5%	7
Sonstige oder keine Antwort	9,1%	4	17,5%	7	12,5%	1

Item 8:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. $\Delta E_h = \Delta E_{kin} = \frac{1}{2} mv^2$	54,9%	28	41,7%	20	18,2%	2
Sonstige oder keine Antwort	45,1%	23	58,3%	28	81,8%	9

Item 9:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Die Gesamtenergie ist konstant	88,0%	81	38,2%	42
2. Die Energie ist konstant	2,2%	2	14,5%	16
3. Die Gesamtenergie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird.	0%	0	7,3%	8
4. Die Energie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird	0%	0	8,2%	9
5. Energieumwandlungen sind möglich	3,3%	3	3,6%	4
6. Sonstige und keine Antwort	6,5%	6	28,2%	31

Item 9:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Die Gesamtenergie ist konstant	92,5%	37	84,6%	44	36,5%	19	39,7%	23
2. Die Energie ist konstant	2,5%	1	1,9%	1	7,7%	4	20,7%	12
3. Die Gesamtenergie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird	0%	0	0%	0	9,6%	5	5,2%	3
4. Die Energie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird.	0%	0	0%	0	11,5%	6	5,2%	3
5. Energieumwandlungen sind möglich	0%	0	5,8%	3	1,9%	1	5,2%	3
6. Sonstige und keine Antwort	5,0%	2	7,7%	4	32,7%	17	24,1%	14

Item 9:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Gesamtenergie ist konstant	95,5%	42	82,5%	33	75,0%	6
2. Die Energie ist konstant	0%	0	5,0%	2	0%	0
3. Die Gesamtenergie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird	0%	0	0%	0	0%	0
4. Die Energie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird.	0%	0	0%	0	0%	0
5. Energieumwandlungen sind möglich	0%	0	2,5%	1	25,0%	2
6. Sonstige und keine Antwort	4,5%	2	10,0%	4	0%	0

Item 9:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

	zusammengefasste IQ-Klassen					
	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Gesamtenergie ist konstant	31,4%	16	50,0%	24	18,2%	2
2. Die Energie ist konstant	13,7%	7	12,5%	6	27,3%	3
3. Die Gesamtenergie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird	15,7%	8	0%	0	0%	0
4. Die Energie ist konstant, wenn keine Arbeit verrichtet wird.	7,8%	4	8,3%	4	9,1%	1
5. Energieumwandlungen sind möglich	2,0%	1	4,2%	2	9,1%	1
6. Sonstige und keine Antwort	29,4%	15	25,0%	12	36,4%	4

Item 10:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe						Kontrollgruppe					
	linkes Bild		mittleres Bild		rechtes Bild		linkes Bild		mittleres Bild		rechtes Bild	
	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	54,3	50	46,7	43	100,0	92	44,5	49	39,1	43	95,5	105
2. Sonstige oder keine Antwort	45,7	42	53,3	49	0	0	55,5	61	60,9	67	4,5	5

Item 10 linkes Bild:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	50,0%	20	57,7%	30	32,7%	17	55,2%	32
2. Sonstige oder keine Antwort	50,0%	20	42,3%	22	67,3%	35	44,8%	26

Item 10 mittleres Bild:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	40,0%	16	51,9%	27	36,5%	19	41,4%	24
2. Sonstige oder keine Antwort	60,0%	24	48,1%	25	63,5%	33	58,6%	34

Item 10 rechtes Bild

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	100	40	100	52	98,1%	51	93,1%	54
2. Sonstige oder keine Antwort	0	0	0	0	1,9%	1	6,9%	4

Item 10 linkes Bild:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	54,5%	24	55,0%	22	50,0%	4
2. Sonstige oder keine Antwort	45,5%	20	45,0%	18	50,0%	4

Item 10 linkes Bild:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	43,1%	22	41,7%	20	63,6%	7
2. Sonstige oder keine Antwort	56,9%	29	58,3%	28	36,4%	4

Item 10 mittleres Bild:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	38,6%	17	52,5%	21	62,5%	5
2. Sonstige oder keine Antwort	61,4%	27	47,5%	19	37,5%	3

Item 10 mittleres Bild:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	37,3%	19	39,6%	19	45,5%	5
2. Sonstige oder keine Antwort	62,7%	32	60,4%	29	54,5%	6

Item 10 rechtes Bild:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	100%	44	100%	40	100%	8
2. Sonstige oder keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0

Item 10 rechtes Bild:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Temperatur	98,0%	50	91,7%	44	100%	11
2. Sonstige oder keine Antwort	2,0%	1	8,3%	4	0%	0

Item 11a:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Richtiger Ansatz ($W = \Delta E_i$)	57,6%	53	10,9%	12
2. Sonstige oder keine Antwort	42,4%	39	89,1%	98

Item 11a:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtiger Ansatz ($W = \Delta E_i$)	57,5%	23	57,7%	30	13,5%	7	8,6%	5
2. Sonstige oder keine Antwort	42,5%	17	42,3%	22	86,5%	45	91,4%	53

Item 11a:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtiger Ansatz ($W = \Delta E_i$)	56,8%	25	57,5%	23	62,5%	5
2. Sonstige oder keine Antwort	43,2%	19	42,5%	17	37,5%	3

Item 11a:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtiger Ansatz ($W = \Delta E_i$)	7,8%	4	14,6%	7	9,1%	1
2. Sonstige oder keine Antwort	92,2%	47	85,4%	41	90,9%	10

Item 11b:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Die Umgebung wurde vernachlässigt	29,3%	27	20,9%	23
2. Der Körper gibt Wärme ab	39,1%	36	17,3%	19
3. Wegen Messfehlern	2,2%	2	6,4%	7
4. Sonstige oder keine Antwort	29,3%	27	55,5%	61

Item 11b:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Die Umgebung wurde vernachlässigt	30,0%	12	28,8%	15	15,4%	8	25,9%	15
2. Der Körper gibt Wärme ab	40,0%	16	38,5%	20	21,2%	11	13,8%	8
3. Wegen Messfehlern	2,5%	1	1,9%	1	7,7%	4	5,2%	3
4. Sonstige oder keine Antwort	27,5%	11	30,8%	16	55,8%	29	55,2%	32

Item 11b:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Umgebung wurde vernachlässigt	45,5%	20	15,0%	6	12,5%	1
2. Der Körper gibt Wärme ab	34,1%	15	42,5%	17	50,0%	4
3. Wegen Messfehlern	2,3%	1	2,5%	1	0%	0
4. Sonstige oder keine Antwort	18,2%	8	40,0%	16	37,5%	3

Item 11b:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Umgebung wurde vernachlässigt	25,5%	13	20,8%	10	0%	0
2. Der Körper gibt Wärme ab	17,6%	9	20,8%	10	0%	0
3. Wegen Messfehlern	7,8%	4	6,3%	3	0%	0
4. Sonstige oder keine Antwort	49,0%	25	52,1%	25	100%	11

Item 12:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Wärme = $\Delta E_i - W$	9,8%	9	2,7%	3
2. Wärme = ΔE_i	34,8%	32	3,6%	4
3. Wärme = E_i	17,4%	16	6,4%	7
4. Wärme ist gleich der Temperatur	8,7%	8	7,3%	8
5. Die Wärme ist eine Energieart	0%	0	18,2%	20
6. Wärme entsteht bei der Reibung	1,1%	1	4,5%	5
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht	0%	0	6,4%	7
8. Sonstige und keine Antwort	28,3%	26	50,9%	56

Item 12:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wärme = $\Delta E_i - W$	15,0%	6	5,8%	3	5,8%	3	0%	0
2. Wärme = ΔE_i	40,0%	16	30,8%	16	1,9%	1	5,2%	3
3. Wärme = E_i	10,0%	4	23,1%	12	7,7%	4	5,2%	3
4. Wärme ist gleich der Temperatur	5,0%	2	11,5%	6	7,7%	4	6,9%	4
5. Die Wärme ist eine Energieart	0%	0	0%	0	15,4%	8	20,7%	12
6. Wärme entsteht bei der Reibung	2,5%	1	0%	0	1,9%	1	6,9%	4
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht	0%	0	0%	0	11,5%	6	1,7%	1
8. Sonstige und keine Antwort	27,5%	11	28,8%	15	48,1%	25	53,4%	31

Item 12:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Wärme = $\Delta E_i - W$	4,5%	2	17,5%	7	0%	0
2. Wärme = ΔE_i	45,5%	20	30,0%	12	0%	0
3. Wärme = E_i	11,4%	5	20,0%	8	37,5%	3
4. Wärme ist gleich der Temperatur	9,1%	4	5,0%	2	25,0%	2
5. Die Wärme ist eine Energieart	0%	0	0%	0	0%	0
6. Wärme entsteht bei der Reibung	0%	0	2,5%	1	0%	0
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht	0%	0	0%	0	0%	0
8. Sonstige und keine Antwort	29,5%	13	25,0%	10	37,5%	3

Item 12:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Wärme = $\Delta E_i - W$	5,9%	3	0%	0	0%	0
2. Wärme = ΔE_i	2,0%	1	4,2%	2	9,1%	1
3. Wärme = E_i	9,8%	5	2,1%	1	9,1%	1
4. Wärme ist gleich der Temperatur	5,9%	3	8,3%	4	9,1%	1
5. Die Wärme ist eine Energieart	21,6%	11	18,8%	9	0%	0
6. Wärme entsteht bei der Reibung	3,9%	2	4,2%	2	9,1%	1
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht	3,9%	2	10,4%	5	0%	0
8. Sonstige und keine Antwort	47,1%	24	52,1%	25	63,6%	7

Item 13:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (0 K)	34,8%	32	20,0%	22
2. Sonstige oder keine Antwort	65,2%	60	80,0%	88

Item 13:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (0 K)	25,0%	10	42,3%	22	7,7%	4	31,0%	18
2. Sonstige oder keine Antwort	75,0%	30	57,7%	30	92,3%	48	69,0%	40

Item 13:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (0 K)	38,6%	17	30,0%	12	37,5%	3
2. Sonstige oder keine Antwort	61,4%	27	70,0%	28	62,5%	5

Item 13:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort (0 K)	19,6%	10	22,9%	11	9,1%	1
2. Sonstige oder keine Antwort	80,4%	41	77,1%	37	90,9%	10

Item 14:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Das Metall wird heißer (ohne Begründung)	7,6%	7	28,2%	31
2. Das Metall wird heißer wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit	64,1%	59	31,8%	35
3. Das Metall wird heißer wegen seiner spezifischen Wärmekapazität	8,7%	8	10,0%	11
4. Das Metall wird heißer, da es schneller (besser) die Wärme aufnehmen kann	2,2%	2	9,1%	10
5. Das Plastik wird heißer	1,1%	1	,9%	1
6. Beide werden gleich heiß	6,5%	6	3,6%	4
7. Sonstige und keine Antwort	9,8%	9	16,4%	18

Item 14:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Das Metall wird heißer (ohne Begründung)	2,5%	1	11,5%	6	38,5%	20	19,0%	11
2. Das Metall wird heißer wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit	75,0%	30	55,8%	29	21,2%	11	41,4%	24
3. Das Metall wird heißer wegen seiner spezifischen Wärmekapazität	5,0%	2	11,5%	6	5,8%	3	13,8%	8
4. Das Metall wird heißer, da es schneller (besser) die Wärme aufnehmen kann	5,0%	2	0%	0	9,6%	5	8,6%	5
5. Das Plastik wird heißer	2,5%	1	0%	0	1,9%	1	0%	0
6. Beide werden gleich heiß	7,5%	3	5,8%	3	3,8%	2	3,4%	2
7. Sonstige und keine Antwort	2,5%	1	15,4%	8	19,2%	10	13,8%	8

Item 14:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Metall wird heißer (ohne Begründung)	6,8%	3	7,5%	3	12,5%	1
2. Das Metall wird heißer wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit	61,4%	27	65,0%	26	75,0%	6
3. Das Metall wird heißer wegen seiner spezifischen Wärmekapazität	9,1%	4	10,0%	4	0%	0
4. Das Metall wird heißer, da es schneller (besser) die Wärme aufnehmen kann	2,3%	1	2,5%	1	0%	0
5. Das Plastik wird heißer	0%	0	2,5%	1	0%	0
6. Beide werden gleich heiß	11,4%	5	2,5%	1	0%	0
7. Sonstige und keine Antwort	9,1%	4	10,0%	4	12,5%	1

Item 14:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Das Metall wird heißer (ohne Begründung)	31,4%	16	27,1%	13	18,2%	2
2. Das Metall wird heißer wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit	31,4%	16	37,5%	18	9,1%	1
3. Das Metall wird heißer wegen seiner spezifischen Wärmekapazität	11,8%	6	8,3%	4	9,1%	1
4. Das Metall wird heißer, da es schneller (besser) die Wärme aufnehmen kann	7,8%	4	10,4%	5	9,1%	1
5. Das Plastik wird heißer	0%	0	2,1%	1	0%	0
6. Beide werden gleich heiß	3,9%	2	4,2%	2	0%	0
7. Sonstige und keine Antwort	13,7%	7	10,4%	5	54,5%	6

Item 15a: Unterscheidung ausschließlich nach der Temperatur

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Die Temperatur des Satelliten ist höher als 12°C.	0%	0	2,7%	3
2. Die Temperatur des Satelliten beträgt 12°C.	3,3%	3	6,4%	7
3. Die Temperatur des Satelliten ist geringer als 12°C, aber größer als 3 K.	30,4%	28	30,0%	33
4. Die Temperatur des Satelliten beträgt zirka 3K.	63,0%	58	60,9%	67
5. Sonstige oder keine Antwort	3,3%	3	0 %	0

Item 15a: Unterscheidung ausschließlich nach der Temperatur

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Die Temperatur des Satelliten ist höher als 12°C.	0%	0	0%	0	1,9%	1	3,4%	2
2. Die Temperatur des Satelliten beträgt 12°C.	2,5%	1	3,8%	2	5,8%	3	6,9%	4
3. Die Temperatur des Satelliten ist geringer als 12°C, aber größer als 3 K.	37,5%	15	25,0%	13	28,8%	15	31,0%	18
4. Die Temperatur des Satelliten beträgt zirka 3K.	57,5%	23	67,3%	35	63,5%	33	58,6%	34
5. Sonstige oder keine Antwort	2,5%	1	3,8%	2	0%	0	0	0%

Item 15a und b : Unterscheidung ausschließlich nach der Temperatur

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Temperatur des Satelliten ist höher als 12°C.	0%	0	0%	0	0%	0
2. Die Temperatur des Satelliten beträgt 12°C.	2,3%	1	5,0%	2	0%	0
3. Die Temperatur des Satelliten ist geringer als 12°C, aber größer als 3 K.	25,0%	11	37,5%	15	25,0%	2
4. Die Temperatur des Satelliten beträgt zirka 3K.	70,5%	31	55,0%	22	62,5%	5
5. Sonstige oder keine Antwort	2,3%	1	2,5%	1	12,5%	1

Item 15a und b : Unterscheidung ausschließlich nach der Temperatur

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Temperatur des Satelliten ist höher als 12°C.	3,9%	2	2,1%	1	0%	0
2. Die Temperatur des Satelliten beträgt 12°C.	3,9%	2	10,4%	5	0%	0
3. Die Temperatur des Satelliten ist geringer als 12°C, aber größer als 3 K.	27,5%	14	33,3%	16	27,3%	3
4. Die Temperatur des Satelliten beträgt zirka 3K.	64,7%	33	54,2%	26	72,7%	8
5. Sonstige oder keine Antwort	0%	0	0%	0	0%	0

Item 15a und b : Unterscheidung nach der angegebenen Temperatur und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. 3 K, wegen der Wärmestrahlung	18,5%	17	1,8%	2
2. 3 K, da der Satellit mit der Umgebung ins thermische Gleichgewicht kommt.	5,4%	5	0%	0
3. 3 K Der Satellit nimmt die Temperatur der Umgebung an	25,0%	23	29,1%	32
4. 3 K, da der Satellit Wärme abgibt	7,6%	7	10,9%	12
5. 3 K, mit sonstiger oder keiner Begründung	6,5%	6	19,1%	21
6. Falsche Antwort, mit sonstiger oder keiner Begründung	37,0%	34	39,1%	43

Item 15a und b : Unterscheidung nach der angegebenen Temperatur und der zugehörigen Begründung
Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. 3 K, wegen der Wärmestrahlung	25,0%	10	13,5%	7	0%	0	3,4%	2
2. 3 K, da der Satellit mit der Umgebung ins thermische Gleichgewicht kommt.	7,5%	3	3,8%	2	0%	0	0%	0
3. 3 K Der Satellit nimmt die Temperatur der Umgebung an	17,5%	7	30,8%	16	30,8%	16	27,6%	16
4. 3 K, da der Satellit Wärme abgibt	5,0%	2	9,6%	5	13,5%	7	8,6%	5
5. 3 K, mit sonstiger oder keiner Begründung	2,5%	1	9,6%	5	19,2%	10	19,0%	11
6. Falsche Antwort, mit sonstiger oder keiner Begründung	42,5%	17	32,7%	17	36,5%	19	41,4%	24

Item 15a und b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Temperatur
Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. 3 K, wegen der Wärmestrahlung	29,5%	13	10,0%	4	0%	0
2. 3 K, da der Satellit mit der Umgebung ins thermische Gleichgewicht kommt.	6,8%	3	5,0%	2	0%	0
3. 3 K Der Satellit nimmt die Temperatur der Umgebung an	22,7%	10	20,0%	8	62,5%	5
4. 3 K, da der Satellit Wärme abgibt	4,5%	2	12,5%	5	0%	0
5. 3 K, mit sonstiger oder keiner Begründung	6,8%	3	7,5%	3	0%	0
6. Falsche Antwort, mit sonstiger oder keiner Begründung	29,5%	13	45,0%	18	37,5%	3

Item 15a und b: Unterscheidung ausschließlich nach der angegebenen Temperatur
Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. 3 K, wegen der Wärmestrahlung	2,0%	1	2,1%	1	0%	0
2. 3 K, da der Satellit mit der Umgebung ins thermische Gleichgewicht kommt.	0%	0	0%	0	0%	0
3. 3 K Der Satellit nimmt die Temperatur der Umgebung an	35,3%	18	20,8%	10	36,4%	4
4. 3 K, da der Satellit Wärme abgibt	9,8%	5	12,5%	6	9,1%	1
5. 3 K, mit sonstiger oder keiner Begründung	17,6%	9	18,8%	9	27,3%	3
6. Falsche Antwort, mit sonstiger oder keiner Begründung	35,3%	18	45,8%	22	27,3%	3

Item 16:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. $\Delta E_i = Q + W$	10,0%	4	1,9%	1	0%	0	0%	0
2. E_i ist die Energie, die ein Körper in sich hat	27,5%	11	23,1%	12	7,7%	4	19,0%	11
3. E_i ist die Energie, die ein Körper hat	7,5%	3	5,8%	3	13,5%	7	10,3%	6
4. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen der Teilchenbewegung hat	5,0%	2	5,8%	3	9,6%	5	6,9%	4
5. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen seiner Temperatur hat	2,5%	1	3,8%	2	0%	0	0%	0
6. $E_i =$ Summe über die Energien aller Teilchen ($E_{kin} + E_{pot}$)	15,0%	6	25,0%	13	0%	0	0%	0
7. E_i ist gleich der Wärme	5,0%	2	7,7%	4	13,5%	7	13,8%	8
8. Sonstige und keine Antwort	27,5%	11	26,9%	14	55,8%	29	50,0%	29

Item 16:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. $\Delta E_i = Q + W$	6,8%	3	5,0%	2	0%	0
2. E_i ist die Energie, die ein Körper in sich hat	29,5%	13	22,5%	9	12,5%	1
3. E_i ist die Energie, die ein Körper hat	6,8%	3	7,5%	3	0%	0
4. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen der Teilchenbewegung hat	4,5%	2	5,0%	2	12,5%	1
5. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen seiner Temperatur hat	2,3%	1	2,5%	1	12,5%	1
6. $E_i =$ Summe über die Energien aller Teilchen ($E_{kin} + E_{pot}$)	25,0%	11	20,0%	8	0%	0
7. E_i ist gleich der Wärme	4,5%	2	5,0%	2	25,0%	2
8. Sonstige und keine Antwort	20,5%	9	32,5%	13	37,5%	3

Item 16:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. $\Delta E_i = Q + W$	0%	0	0%	0	0%	0
2. E_i ist die Energie, die ein Körper in sich hat	7,8%	4	20,8%	10	9,1%	1
3. E_i ist die Energie, die ein Körper hat	13,7%	7	10,4%	5	9,1%	1
4. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen der Teilchenbewegung hat	7,8%	4	10,4%	5	0%	0
5. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen seiner Temperatur hat	0%	0	0%	0	0%	0
6. $E_i =$ Summe über die Energien aller Teilchen ($E_{kin} + E_{pot}$)	0%	0	0%	0	0%	0
7. E_i ist gleich der Wärme	9,8%	5	18,8%	9	9,1%	1
8. Sonstige und keine Antwort	60,8%	31	39,6%	19	72,7%	8

Item 17:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Versuchsgruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Richtige Antwort	18,5%	17	11,8%	13
2. Sonstige oder keine Antwort	81,5%	75	88,2%	97

Item 17:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort	22,5%	9	15,4%	8	9,6%	5	13,8%	8
2. Sonstige oder keine Antwort	77,5%	31	84,6%	44	90,4%	47	86,2%	50

Item 17:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort	34,1%	15	2,5%	1	12,5%	1
2. Sonstige oder keine Antwort	65,9%	29	97,5%	39	87,5%	7

Item 17:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort	15,7%	8	10,4%	5	0%	0
2. Sonstige oder keine Antwort	84,3%	43	89,6%	43	100%	11

Item 18:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Wegen des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre	38,0%	35	0%	0
2. Da der Vorgang irreversibel ist	26,1%	24	0%	0
3. Da die innere Energie des Autos nicht in mechanische Energie umgewandelt werden kann	3,3%	3	10,0%	11
4. Wegen der Reibung	3,3%	3	10,0%	11
5. Da das Auto niemand anschiebt	5,4%	5	13,6%	15
6. Weil es kein perpetuum mobile gibt	1,1%	1	9,1%	10
7. Sonstige und keine Antwort	22,8%	21	57,3%	63

Item 18:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre	45,0%	18	32,7%	17	0%	0	0%	0
2. Da der Vorgang irreversibel ist	35,0%	14	19,2%	10	0%	0	0%	0
3. Da die innere Energie des Autos nicht in mechanische Energie umgewandelt werden kann	0%	0	5,8%	3	7,7%	4	12,1%	7
4. Wegen der Reibung	0%	0	5,8%	3	9,6%	5	10,3%	6
5. Da das Auto niemand anschiebt	5,0%	2	5,8%	3	15,4%	8	12,1%	7
6. Weil es kein perpetuum mobile gibt	0%	0	1,9%	1	7,7%	4	10,3%	6
7. Sonstige und keine Antwort	15,0%	6	28,8%	15	59,6%	31	55,2%	32

Item 18:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre	47,7%	21	27,5%	11	37,5%	3
2. Da der Vorgang irreversibel ist	27,3%	12	30,0%	12	0%	0
3. Da die innere Energie des Autos nicht in mechanische Energie umgewandelt werden kann	2,3%	1	2,5%	1	12,5%	1
4. Wegen der Reibung	2,3%	1	5,0%	2	0%	0
5. Da das Auto niemand anschiebt	0%	0	7,5%	3	25,0%	2
6. Weil es kein perpetuum mobile gibt	2,3%	1	0%	0	0%	0
7. Sonstige und keine Antwort	18,2%	8	27,5%	11	25,0%	2

Item 18:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre	0%	0	0%	0	0%	0
2. Da der Vorgang irreversibel ist	0%	0	0%	0	0%	0
3. Da die innere Energie des Autos nicht in mechanische Energie umgewandelt werden kann	9,8%	5	10,4%	5	9,1%	1
4. Wegen der Reibung	5,9%	3	14,6%	7	9,1%	1
5. Da das Auto niemand anschiebt	17,6%	9	10,4%	5	9,1%	1
6. Weil es kein perpetuum mobile gibt	3,9%	2	14,6%	7	9,1%	1
7. Sonstige und keine Antwort	62,7%	32	50,0%	24	63,6%	7

Item 19a:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Die Kufen fühlen sich kälter an.	95,7%	88	90,0%	99
2. Die Kufen fühlen sich wärmer an	1,1%	1	3,6%	4
3. Sonstige oder keine Antwort	3,3%	3	6,4%	7

Auf die Abhängigkeit des Antwortverhaltens von Item 19a. wurde verzichtet, das nahezu alle Schüler die Ak. 1 gewählt haben.

Item 19a:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung der Begründung: Schüler die angaben, dass die Kufen kälter sind.

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	43,2%	38	10,1%	10
2. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	15,9%	14	14,1%	14
3. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	6,8%	6	22,2%	22
4. Die Metallkufen sind im Schnee	4,5%	4	9,1%	9
5. Die Temperatur wird vom Menschen falsch wahrgenommen	2,3%	2	2,0%	2
6. Sonstige oder keine Begründung	27,3%	24	42,4%	42

Item 19a:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung der Begründung und des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	59,0%	23	30,6%	15	2,1%	1	17,3%	9
2. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	12,8%	5	18,4%	9	8,5%	4	19,2%	10
3. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	7,7%	3	6,1%	3	23,4%	11	21,2%	11
4. Die Metallkufen sind im Schnee	5,1%	2	4,1%	2	10,6%	5	7,7%	4
5. Die Temperatur wird vom Menschen falsch wahrgenommen			4,1%	2	2,1%	1	1,9%	1
6. Sonstige oder keine Begründung	15,4%	6	36,7%	18	53,2%	25	32,7%	17

Item 19a:

Begründungen bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:
Nur Schüler die angaben, dass die Kufen kälter sind.

	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	58,1%	25	34,2%	13	0%	0
2. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	14,0%	6	18,4%	7	14,3%	1
3. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	2,3%	1	10,5%	4	14,3%	1
4. Die Metallkufen sind im Schnee	2,3%	1	5,3%	2	14,3%	1
5. Die Temperatur wird vom Menschen falsch wahrgenommen	2,3%	1	0%	0	14,3%	1
6. Sonstige oder keine Begründung	20,9%	9	31,6%	12	42,9%	3

Item 19a:

Begründungen bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:
Nur Schüler die angaben, dass die Kufen kälter sind.

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	12,5%	6	4,8%	2	22,2%	2
2. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	6,3%	3	23,8%	10	11,1%	1
3. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	25,0%	12	21,4%	9	11,1%	1
4. Die Metallkufen sind im Schnee	6,3%	3	9,5%	4	22,2%	2
5. Die Temperatur wird vom Menschen falsch wahrgenommen	2,1%	1	2,4%	1	0%	0
6. Sonstige oder keine Begründung	47,9%	23	38,1%	16	33,3%	3

Item 19 b:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Die Temperatur der Kufen ist höher als die Temperatur der Sitzfläche	4,5%	4	5,1%	5
2. Die Temperatur der Kufen ist gleich der Temperatur der Sitzfläche.	55,7%	49	15,2%	15
3. Die Temperatur der Kufen ist geringer als die Temperatur der Sitzfläche	38,6%	34	78,8%	78
4. Sonstige oder keine Antwort	1,1%	1	1,0%	1

Item 19b:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Die Temperatur der Kufen ist höher als die Temperatur der Sitzfläche	10,3%	4	0%	0	6,4%	3	3,8%	2
2. Die Temperatur der Kufen ist gleich der Temperatur der Sitzfläche	59,0%	23	53,1%	26	8,5%	4	21,2%	11
3. Die Temperatur der Kufen ist geringer als die Temperatur der Sitzfläche	28,2%	11	46,9%	23	85,1%	40	73,1%	38
4. Sonstige oder keine Antwort	2,6%	1	0%	0	0%	0	1,9%	1

Item 19 b:

Antwortverhalten der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Temperatur der Kufen ist höher als die Temperatur der Sitzfläche	4,7%	2	5,3%	2	0%	0
2. Die Temperatur der Kufen ist gleich der Temperatur der Sitzfläche.	65,1%	28	50,0%	19	28,6%	2
3. Die Temperatur der Kufen ist geringer als die Temperatur der Sitzfläche	27,9%	12	44,7%	17	71,4%	5
4. Sonstige oder keine Antwort	2,3%	1	0%	0	0%	0

Item 19 b:

Antwortverhalten der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Die Temperatur der Kufen ist höher als die Temperatur der Sitzfläche	4,2%	2	7,1%	3	0%	0
2. Die Temperatur der Kufen ist gleich der Temperatur der Sitzfläche	22,9%	11	9,5%	4	0%	0
3. Die Temperatur der Kufen ist geringer als die Temperatur der Sitzfläche	72,9%	35	83,3%	35	88,9%	8
4. Sonstige oder keine Antwort	0%	0	0%	0	11,1%	1

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung der Begründung:

Schüler die angaben, dass Kufen und Sitzfläche die gleiche Temperatur haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	55,1%	27	46,7%	7
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	0%	0	0%	0
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	6,1%	3	0%	0
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	0%	0	6,7%	1
5. Die Metallkufen sind im Schnee	0%	0	6,7%	1
6. Sonstige oder keine Antwort	38,8%	19	40,0%	6

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung der Begründung und des Geschlechts:

Schüler die angaben, dass Kufen und Sitzfläche die gleiche Temperatur haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	52,2%	12	57,7%	15	25,0%	1	54,5%	6
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	4,3%	1	7,7%	2	0%	0	0%	0
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	0%	0	0%	0	0%	0	9,1%	1
5. Die Metallkufen sind im Schnee	0%	0	0%	0	25,0%	1	0%	0
6. Sonstige oder keine Antwort	43,5%	10	34,6%	9	50,0%	2	36,4%	4

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens der Versuchsgruppe unter Berücksichtigung der Begründung differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

Schüler, die angaben, dass Kufen und Sitzfläche die gleiche Temperatur haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	60,7%	17	52,6%	10	0%	0
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	0%	0	0%	0	0%	0
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	0%	0	10,5%	2	50,0%	1
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	0%	0	0%	0	0%	0
5. Die Metallkufen sind im Schnee	0%	0	0%	0	0%	0
6. Sonstige oder keine Antwort	39,3%	11	36,8%	7	50,0%	1

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens der Kontrollgruppe unter Berücksichtigung der Begründung differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

Schüler die angaben, dass Kufen und Sitzfläche die gleiche Temperatur haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	54,5%	6	25,0%	1	0%	0
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	0%	0	0%	0	0%	0
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	0%	0	0%	0	0%	0
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an.	9,1%	1	0%	0	0%	0
5. Die Metallkufen sind im Schnee	9,1%	1	0%	0	0%	0
6. Sonstige oder keine Antwort	27,3%	3	75,0%	3	0%	0

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung der Begründung:

Schüler die angaben, dass die Kufen eine geringere Temperatur als die Sitzfläche haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	0%	0	0%	0
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	23,5%	8	10,3%	8
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	17,6%	6	17,9%	14
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	14,7%	5	29,5%	23
5. Die Metallkufen sind im Schnee	17,6%	6	10,3%	8
6. Sonstige oder keine Antwort	26,5%	9	32,1%	25

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung der Begründung und des Geschlechts:

Schüler die angaben, dass die Kufen eine geringere Temperatur als die Sitzfläche haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	0%	0	0%	0	0%	0	0%	0
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	45,5%	5	13,0%	3	5,0%	2	15,8%	6
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	0%	0	26,1%	6	7,5%	3	28,9%	11
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an	9,1%	1	17,4%	4	30,0%	12	28,9%	11
5. Die Metallkufen sind im Schnee	27,3%	3	13,0%	3	15,0%	6	5,3%	2
6. Sonstige oder keine Antwort	18,2%	2	30,4%	7	42,5%	17	21,1%	8

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens der Versuchsgruppe unter Berücksichtigung der Begründung differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

Schüler die angaben, dass die Kufen eine geringere Temperatur als die Sitzfläche haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	0%	0	0%	0	0%	0
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	25,0%	3	29,4%	5	0%	0
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	25,0%	3	17,6%	3	0%	0
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an.	0%	0	23,5%	4	20,0%	1
5. Die Metallkufen sind im Schnee	8,3%	1	17,6%	3	40,0%	2
6. Sonstige oder keine Antwort	41,7%	5	11,8%	2	40,0%	2

Item 19 b und c:

Vergleich des Antwortverhaltens der Kontrollgruppe unter Berücksichtigung der Begründung differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

Schüler, die angaben, dass die Kufen eine geringere Temperatur als die Sitzfläche haben:

(Nur solche Schüler, die beim Item 19a angaben, dass sich die Kufen kälter als das Holz anfühlen.)

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Überall ist die gleiche Umgebungstemperatur	0%	0	0%	0	0%	0
2. Metall ist ein besserer Wärmeleiter	20,0%	7	0%	0	1	12,5%
3. Metall hat eine andere spezifische Wärmekapazität	11,4%	4	22,9%	8	2	25,0%
4. Metall nimmt Kälte leichter (schneller) an.	25,7%	9	28,6%	10	4	50,0%
5. Die Metallkufen sind im Schnee	8,6%	3	11,4%	4	1	12,5%
6. Sonstige oder keine Antwort	34,3%	12	37,1%	13	0%	0

Item 20:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Richtige Antwort ($E_h = \Delta E_i$)	68,5%	63	3,6%	4
2. Sonstige oder keine Antwort	31,5%	29	96,4%	106

Item 20:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort ($E_h = \Delta E_i$)	75,0%	30	63,5%	33	1,9%	1	5,2%	3
2. Sonstige oder keine Antwort	25,0%	10	36,5%	19	98,1%	51	94,8%	55

Item 20:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort ($E_h = \Delta E_i$)	77,3%	34	60,0%	24	62,5%	5
2. Sonstige oder keine Antwort	22,7%	10	40,0%	16	37,5%	3

Item 20:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Richtige Antwort ($E_h = \Delta E_i$)	3,9%	2	4,2%	2	0%	0
2. Sonstige oder keine Antwort	96,1%	49	95,8%	46	100%	11

Item 21:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

	Versuchsgruppe		Kontrollgruppe	
	%	N	%	N
1. Wegen des nullten Hauptsatzes der Wärmelehre	6,5%	6	0%	0
2. Da Thermometer und Körper ins thermische Gleichgewicht gelangen	27,2%	25	0%	0
3. Thermometer und Körper gleichen ihre Temperatur an	26,1%	24	5,5%	6
4. Das Thermometer nimmt die Temperatur des Körpers an	6,5%	6	25,5%	28
5. Die Temperatur des Körpers wird auf das Thermometer übertragen	0%	0	4,5%	5
6. Funktionsweise des Thermometers erklärt	14,1%	13	31,8%	35
7. Sonstige und keine Antwort	19,6%	18	32,7%	36

Item 21:

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen unter Berücksichtigung des Geschlechts:

	Versuchsgruppe				Kontrollgruppe			
	Mädchen		Jungen		Mädchen		Jungen	
	%	N	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des nullten Hauptsatzes der Wärmelehre	5,0%	2	7,7%	4	0%	0	0%	0
2. Da Thermometer und Körper ins thermische Gleichgewicht gelangen	35,0%	14	21,2%	11	0%	0	0%	0
3. Thermometer und Körper gleichen ihre Temperatur an	27,5%	11	25,0%	13	5,8%	3	5,2%	3
4. Das Thermometer nimmt die Temperatur des Körpers an	0%	0	11,5%	6	25,0%	13	25,9%	15
5. Die Temperatur des Körpers wird auf das Thermometer übertragen	0%	0	0%	0	3,8%	2	5,2%	3
6. Funktionsweise des Thermometers erklärt	17,5%	7	11,5%	6	32,7%	17	31,0%	18
7. Sonstige und keine Antwort	15,0%	6	23,1%	12	32,7%	17	32,8%	19

Item 21:

Antwortverhalten bei der Versuchsgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des nullten Hauptsatzes der Wärmelehre	6,8%	3	7,5%	3	0%	0
2. Da Thermometer und Körper ins thermische Gleichgewicht gelangen	40,9%	18	12,5%	5	25,0%	2
3. Thermometer und Körper gleichen ihre Temperatur an	25,0%	11	30,0%	12	12,5%	1
4. Das Thermometer nimmt die Temperatur des Körpers an	4,5%	2	10,0%	4	0%	0
5. Die Temperatur des Körpers wird auf das Thermometer übertragen	0%	0	0%	0	0%	0
6. Funktionsweise des Thermometers erklärt	11,4%	5	20,0%	8	0%	0
7. Sonstige und keine Antwort	11,4%	5	20,0%	8	62,5%	5

Item 21:

Antwortverhalten bei der Kontrollgruppe differenziert nach den zusammengefassten IQ-Klassen:

zusammengefasste IQ-Klassen	AB		C		DE	
	%	N	%	N	%	N
1. Wegen des nullten Hauptsatzes der Wärmelehre	0%	0	0	0	0%	0
2. Da Thermometer und Körper ins thermische Gleichgewicht gelangen	0%	0	0	0	0%	0
3. Thermometer und Körper gleichen ihre Temperatur an	5,9%	3	4,2%	2	9,1%	1
4. Das Thermometer nimmt die Temperatur des Körpers an	35,3%	18	14,6%	7	27,3%	3
5. Die Temperatur des Körpers wird auf das Thermometer übertragen	5,9%	3	4,2%	2	0%	0
6. Funktionsweise des Thermometers erklärt	33,3%	17	35,4%	17	9,1%	1
7. Sonstige und keine Antwort	19,6%	10	41,7%	20	54,5%	6

Korrelationstabelle für die Versuchsgruppe:

Item	1a	1a*	1b	1b*	2	3	4a	4b	5a	5b*	6	7	8	9
1a		0,000	0,000	0,000	0,372	0,015	0,363	0,685	0,044	0,021	0,858	0,001	0,197	0,200
1a*	0,000		0,000	0,000	0,090	0,040	0,512	0,680	0,000	0,000	0,609	0,002	0,201	0,119
1b	0,000	0,000		0,000	0,044	0,082	0,003	0,845	0,012	0,004	0,637	0,167	0,417	0,341
1b*	0,000	0,000	0,000		0,050	0,066	0,002	0,780	0,000	0,000	0,807	0,156	0,257	0,518
2	0,372	0,090	0,044	0,050		0,724	0,129	0,808	0,111	0,078	0,248	0,177	0,830	0,115
3	0,015	0,040	0,082	0,066	0,724		0,630	0,137	0,528	0,006	0,053	0,024	0,090	0,416
4a	0,363	0,512	0,003	0,002	0,129	0,630		0,108	0,295	0,575	0,532	0,143	0,475	0,123
4b	0,685	0,680	0,845	0,780	0,808	0,137	0,108		0,506	0,558	0,367	0,989	0,719	0,148
5a	0,044	0,000	0,012	0,000	0,111	0,528	0,295	0,506		0,000	0,178	0,211	0,266	0,351
5b	0,021	0,000	0,004	0,000	0,078	0,006	0,575	0,558	0,000		0,024	0,106	0,489	0,272
6	0,858	0,609	0,637	0,807	0,248	0,053	0,532	0,367	0,178	0,024		0,667	0,125	0,224
7	0,001	0,002	0,167	0,156	0,177	0,024	0,143	0,989	0,211	0,106	0,667		0,894	0,056
8	0,197	0,201	0,417	0,257	0,830	0,090	0,475	0,719	0,266	0,489	0,125	0,894		0,397
9	0,200	0,119	0,341	0,518	0,115	0,416	0,123	0,148	0,351	0,272	0,224	0,056	0,397	
10li	0,142	0,256	0,428	0,667	0,577	0,971	0,809	0,227	0,055	0,120	0,483	0,002	0,746	0,402
10mi	0,072	0,182	0,803	0,216	0,762	0,813	0,278	0,284	0,622	0,834	0,963	0,112	0,706	0,033
10re	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11a	0,844	0,735	0,854	0,042	0,513	0,883	0,273	0,551	0,329	0,120	0,727	0,957	0,496	0,476
11b	0,327	0,184	0,480	0,040	0,094	0,248	0,768	0,828	0,158	0,266	0,545	0,009	0,365	0,001
12	0,746	0,293	0,431	0,529	0,257	0,189	0,083	0,585	0,028	0,049	0,103	0,546	0,357	0,815
13	0,072	0,182	0,609	0,636	0,579	0,237	0,613	0,388	0,725	0,024	0,749	0,858	0,445	0,309
14*	0,120	0,093	0,515	0,665	0,144	0,756	0,540	0,944	0,605	0,713	0,044	0,436	0,023	0,380
15a	0,667	0,303	0,109	0,083	0,736	0,415	0,529	0,922	0,712	0,946	0,654	0,304	0,718	0,974
15b	0,509	0,292	0,012	0,004	0,007	0,391	0,249	0,832	0,558	0,325	0,437	0,734	0,942	0,529
16	0,071	0,178	0,223	0,320	0,367	0,063	0,028	0,577	0,877	0,697	0,775	0,216	0,166	0,568
17	0,115	0,280	0,012	0,039	0,064	0,640	0,438	0,393	0,204	0,210	0,205	0,929	0,077	0,418
18	0,005	0,006	0,010	0,013	0,051	0,022	0,141	0,074	0,314	0,013	0,680	0,139	0,604	0,000
19a	0,738	0,421	0,791	0,618	0,275	0,144	0,205	0,964	0,165	0,017	0,151	0,108	0,532	0,694
19a*	0,036	0,127	0,108	0,409	0,578	0,545	0,000	0,180	0,220	0,014	0,703	0,699	0,150	0,017
19b	0,234	0,520	0,797	0,683	0,617	0,548	0,154	0,952	0,877	0,311	0,043	0,953	0,055	0,106
19b*	0,285	0,222	0,601	0,798	0,596	0,447	0,389	0,588	0,417	0,662	0,698	0,328	0,898	0,000
20	0,188	0,356	0,167	0,333	0,018	0,197	0,154	0,466	0,289	0,337	0,602	0,130	0,140	0,249
21	0,197	0,407	0,005	0,010	0,151	0,382	0,805	0,366	0,718	0,650	0,158	0,074	0,721	0,247

Item	10li	10mi	10re	11a	11b	12	13	14*	15a	15b	16	17	18	19a	19a*	19b	19b*	20	21
1a	0,142	0,072	-	0,844	0,327	0,746	0,072	0,120	0,667	0,509	0,071	0,115	0,005	0,738	0,036	0,243	0,285	0,188	0,197
1a*	0,256	0,182	-	0,735	0,184	0,293	0,182	0,093	0,303	0,292	0,178	0,280	0,006	0,421	0,127	0,520	0,222	0,356	0,407
1b	0,428	0,803	-	0,854	0,480	0,431	0,609	0,515	0,109	0,012	0,223	0,012	0,010	0,791	0,108	0,797	0,601	0,167	0,005
1b*	0,667	0,216	-	0,042	0,040	0,529	0,636	0,665	0,083	0,004	0,320	0,039	0,013	0,618	0,409	0,683	0,798	0,333	0,010
2	0,577	0,762	-	0,513	0,094	0,257	0,579	0,144	0,736	0,007	0,367	0,064	0,051	0,275	0,578	0,617	0,596	0,018	0,151
3	0,971	0,813	-	0,883	0,248	0,189	0,237	0,756	0,415	0,391	0,063	0,640	0,022	0,144	0,545	0,548	0,447	0,197	0,382
4a	0,809	0,278	-	0,273	0,768	0,083	0,613	0,540	0,529	0,249	0,028	0,438	0,141	0,205	0,000	0,154	0,389	0,154	0,805
4b	0,227	0,284	-	0,551	0,828	0,585	0,388	0,944	0,922	0,832	0,577	0,393	0,074	0,964	0,180	0,952	0,588	0,466	0,366
5a	0,055	0,622	-	0,329	0,158	0,028	0,725	0,605	0,712	0,558	0,887	0,204	0,314	0,165	0,220	0,877	0,417	0,289	0,718
5b	0,120	0,834	-	0,120	0,266	0,049	0,024	0,713	0,946	0,325	0,697	0,210	0,013	0,017	0,014	0,311	0,662	0,337	0,650
6	0,483	0,963	-	0,727	0,545	0,103	0,749	0,044	0,654	0,437	0,775	0,205	0,680	0,151	0,703	0,043	0,698	0,602	0,158
7	0,002	0,112	-	0,957	0,009	0,546	0,858	0,436	0,304	0,734	0,216	0,929	0,139	0,108	0,699	0,953	0,328	0,130	0,074
8	0,746	0,706	-	0,496	0,365	0,357	0,445	0,023	0,718	0,942	0,166	0,077	0,604	0,532	0,150	0,055	0,898	0,140	0,721
9	0,402	0,033	-	0,476	0,001	0,815	0,309	0,380	0,974	0,529	0,568	0,418	0,000	0,694	0,017	0,106	0,000	0,249	0,247
10li		0,000	-	0,613	0,761	0,165	0,789	0,620	0,635	0,925	0,042	0,897	0,249	0,503	0,398	0,475	0,281	0,428	0,316
10mi	0,000		-	0,923	0,805	0,317	0,076	0,613	0,076	0,710	0,231	0,269	0,143	0,507	0,135	0,592	0,170	0,803	0,061
10re	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11a	0,613	0,923	-		0,891	0,652	0,874	0,509	0,149	0,223	0,364	0,512	0,044	0,166	0,013	0,172	0,239	0,000	0,347
11b	0,761	0,805	-	0,891		0,303	0,894	0,273	0,437	0,070	0,692	0,596	0,076	0,860	0,730	0,068	0,012	0,027	0,679
12	0,165	0,317	-	0,652	0,303		0,882	0,657	0,000	0,058	0,075	0,022	0,149	0,677	0,584	0,668	0,115	0,418	0,597
13	0,789	0,076	-	0,874	0,894	0,882		0,460	0,367	0,747	0,253	0,239	0,234	0,175	0,241	0,758	0,403	0,325	0,208
14*	0,620	0,613	-	0,509	0,273	0,657	0,460		0,989	0,470	0,520	0,150	0,552	0,981	0,000	0,592	0,065	0,730	0,353
15a	0,635	0,076	-	0,149	0,437	0,000	0,367	0,989		0,000	0,592	0,523	0,737	0,000	0,901	0,140	0,497	0,983	0,429
15b	0,925	0,710	-	0,223	0,070	0,058	0,747	0,470	0,000		0,973	0,141	0,062	0,956	0,251	0,315	0,291	0,308	0,750
16	0,042	0,231	-	0,364	0,692	0,075	0,253	0,520	0,592	0,973		0,295	0,366	0,949	0,077	0,978	0,045	0,040	0,668
17	0,897	0,269	-	0,512	0,596	0,022	0,239	0,150	0,523	0,141	0,295		0,283	0,623	0,036	0,740	0,720	0,052	0,824
18	0,249	0,143	-	0,044	0,076	0,149	0,234	0,552	0,737	0,062	0,366	0,283		0,749	0,166	0,308	0,064	0,313	0,466
19a	0,503	0,507	-	0,166	0,860	0,677	0,175	0,981	0,000	0,956	0,949	0,623	0,749		0,480	0,002	0,824	0,332	0,530
19a*	0,398	0,135	-	0,013	0,730	0,584	0,241	0,000	0,901	0,251	0,077	0,036	0,166	0,480		0,350	0,000	0,003	0,634
19b	0,475	0,592	-	0,172	0,068	0,668	0,758	0,592	0,140	0,315	0,978	0,740	0,308	0,002	0,350		0,000	0,346	0,571
19b*	0,281	0,170	-	0,239	0,012	0,115	0,403	0,065	0,497	0,291	0,045	0,720	0,064	0,824	0,000	0,000		0,143	0,670
20	0,428	0,803	-	0,000	0,027	0,418	0,325	0,730	0,983	0,308	0,040	0,052	0,313	0,332	0,003	0,346	0,143		0,218
21	0,316	0,061	-	0,347	0,679	0,597	0,208	0,353	0,429	0,750	0,668	0,824	0,466	0,530	0,634	0,571	0,670	0,218	

Korrelationstabelle für die Kontrollgruppe

Item	1a	1a*	1b	1b*	2	3	4a	4b	5a	5b*	6	7	8	9
1a		0,000	0,000	0,003	0,572	0,956	0,292	0,903	0,571	0,199	0,715	0,562	0,065	0,829
1a*	0,000		0,000	0,000	0,734	0,001	0,281	0,355	0,067	0,008	0,691	0,911	0,011	0,170
1b	0,000	0,000		0,000	0,274	0,238	0,231	0,734	0,535	0,065	0,084	0,474	0,024	0,613
1b*	0,003	0,000	0,000		0,334	0,000	0,032	0,229	0,038	0,005	0,020	0,684	0,014	0,310
2	0,572	0,734	0,274	0,334		0,545	0,907	0,286	0,824	0,480	0,002	0,126	0,004	0,243
3	0,956	0,001	0,238	0,000	0,545		0,831	0,150	0,239	0,487	0,053	0,950	0,009	0,236
4a	0,292	0,281	0,231	0,032	0,907	0,831		0,779	0,517	0,746	0,865	0,126	0,780	0,964
4b	0,903	0,355	0,734	0,229	0,286	0,150	0,779		0,457	0,143	0,077	0,514	0,261	0,116
5a	0,571	0,067	0,535	0,038	0,824	0,239	0,517	0,457		0,000	0,636	0,419	0,084	0,074
5b	0,199	0,008	0,065	0,005	0,480	0,487	0,746	0,143	0,000		0,508	0,557	0,031	0,114
6	0,715	0,691	0,084	0,020	0,002	0,053	0,865	0,077	0,636	0,508		0,011	0,003	0,488
7	0,562	0,911	0,474	0,684	0,126	0,950	0,126	0,514	0,419	0,557	0,011		0,003	0,014
8	0,065	0,011	0,024	0,014	0,004	0,009	0,780	0,261	0,084	0,031	0,003	0,003		0,806
9	0,829	0,170	0,613	0,310	0,243	0,236	0,964	0,116	0,074	0,114	0,488	0,014	0,806	
10li	0,723	0,918	0,978	0,960	0,594	0,289	0,624	0,535	0,060	0,006	0,557	0,863	0,381	0,812
10mi	0,164	0,047	0,519	0,042	0,395	0,151	0,318	0,611	0,694	0,521	0,996	0,640	0,831	0,480
10re	0,568	0,856	0,828	0,550	0,077	0,283	0,037	0,585	0,897	0,937	0,269	0,121	0,802	0,865
11a	0,258	0,516	0,592	0,640	0,749	0,262	0,132	0,224	0,334	0,590	0,161	0,922	0,118	0,524
11b	0,319	0,012	0,064	0,006	0,245	0,309	0,219	0,481	0,440	0,419	0,066	0,752	0,098	0,015
12	0,814	0,240	0,034	0,216	0,266	0,412	0,394	0,746	0,343	0,167	0,517	0,182	0,005	0,003
13	0,353	0,001	0,064	0,000	0,903	0,010	1,000	0,197	0,639	0,127	0,403	0,000	0,338	0,004
14*	0,349	0,194	0,402	0,157	0,677	0,477	0,279	0,097	0,755	0,395	0,110	0,854	0,853	0,546
15a	0,703	0,051	0,021	0,002	0,118	0,560	0,209	0,010	0,735	0,202	0,333	0,496	0,351	0,141
15b	0,555	0,575	0,093	0,124	0,327	0,649	0,431	0,171	0,934	0,829	0,314	0,333	0,305	0,423
16	0,896	0,240	0,373	0,118	0,101	0,247	0,066	0,187	0,079	0,106	0,048	0,725	0,087	0,552
17	0,197	0,005	0,369	0,011	0,877	0,017	0,590	0,089	0,481	0,630	0,080	0,412	0,067	0,470
18	0,823	0,883	0,328	0,753	0,170	0,101	0,624	0,571	0,576	0,714	0,100	0,852	0,135	0,735
19a	0,023	0,109	0,000	0,120	0,129	0,369	0,019	0,485	0,765	0,717	0,002	0,098	0,947	0,950
19a*	0,761	0,277	0,735	0,123	0,522	0,943	0,093	0,503	0,496	0,247	0,743	0,717	0,701	0,849
19b	0,311	0,127	0,132	0,047	0,550	0,818	0,537	0,383	0,757	0,643	0,293	0,682	0,088	0,197
19b*	0,967	0,116	0,436	0,014	0,428	0,074	0,225	0,042	0,230	0,697	0,347	0,033	0,155	0,503
20	0,173	0,105	0,131	0,053	0,671	0,145	0,063	0,721	0,112	0,271	0,815	0,826	0,852	0,938
21	0,108	0,024	0,015	0,008	0,324	0,107	0,179	0,179	0,740	0,012	0,629	0,031	0,184	0,399

Item	10li	10mi	10re	11a	11b	12	13	14*	15a	15b	16	17	18	19a	19a*	19b	19b*	20	21
1a	0,723	0,164	0,568	0,258	0,319	0,814	0,353	0,349	0,703	0,555	0,896	0,197	0,823	0,023	0,761	0,311	0,967	0,173	0,108
1a*	0,918	0,047	0,856	0,516	0,012	0,240	0,001	0,194	0,051	0,575	0,240	0,005	0,883	0,109	0,277	0,127	0,116	0,105	0,024
1b	0,978	0,519	0,828	0,592	0,064	0,034	0,064	0,402	0,021	0,093	0,373	0,369	0,328	0,000	0,735	0,132	0,436	0,131	0,015
1b*	0,960	0,042	0,550	0,640	0,006	0,216	0,000	0,157	0,002	0,124	0,118	0,011	0,753	0,120	0,123	0,047	0,014	0,053	0,008
2	0,594	0,395	0,077	0,749	0,245	0,266	0,903	0,677	0,118	0,327	0,101	0,877	0,170	0,129	0,522	0,550	0,428	0,671	0,324
3	0,289	0,151	0,283	0,262	0,309	0,412	0,010	0,477	0,560	0,649	0,247	0,017	0,101	0,369	0,943	0,818	0,074	0,145	0,107
4a	0,624	0,318	0,037	0,132	0,219	0,394	1,000	0,279	0,209	0,431	0,066	0,590	0,624	0,019	0,093	0,537	0,225	0,063	0,179
4b	0,535	0,611	0,585	0,224	0,481	0,746	0,197	0,097	0,010	0,171	0,187	0,089	0,571	0,485	0,503	0,383	0,042	0,721	0,179
5a	0,060	0,694	0,897	0,334	0,440	0,343	0,639	0,755	0,735	0,934	0,079	0,481	0,576	0,765	0,496	0,757	0,230	0,112	0,740
5b	0,006	0,521	0,937	0,590	0,419	0,167	0,127	0,395	0,202	0,829	0,106	0,630	0,714	0,717	0,247	0,643	0,697	0,271	0,012
6	0,557	0,996	0,269	0,161	0,066	0,517	0,403	0,110	0,333	0,314	0,048	0,080	0,100	0,002	0,743	0,293	0,347	0,815	0,629
7	0,863	0,640	0,121	0,922	0,752	0,182	0,000	0,854	0,496	0,333	0,725	0,412	0,852	0,098	0,717	0,682	0,033	0,826	0,031
8	0,381	0,831	0,802	0,118	0,098	0,005	0,338	0,853	0,351	0,305	0,087	0,067	0,135	0,947	0,701	0,088	0,155	0,852	0,184
9	0,812	0,480	0,865	0,524	0,015	0,003	0,004	0,546	0,141	0,423	0,552	0,470	0,735	0,950	0,849	0,197	0,503	0,938	0,399
10li		0,057	0,258	0,832	0,239	0,188	0,924	0,627	0,883	0,326	0,551	0,287	0,070	0,056	0,408	0,336	0,351	0,212	0,101
10mi	0,057		0,371	0,092	0,456	0,112	0,494	0,311	0,272	0,337	0,613	0,578	0,192	0,353	0,057	0,160	0,061	0,649	0,039
10re	0,258	0,371		0,505	0,538	0,418	1,000	0,712	0,885	0,733	0,079	0,562	0,011	0,784	0,309	0,893	0,026	0,045	0,003
11a	0,832	0,092	0,505		0,966	0,734	0,284	0,513	0,371	0,081	0,711	0,014	0,002	0,617	0,879	0,870	0,091	0,000	0,278
11b	0,239	0,456	0,538	0,966		0,214	0,135	0,218	0,356	0,822	0,013	0,017	0,351	0,707	0,096	0,956	0,705	0,443	0,485
12	0,188	0,112	0,418	0,734	0,214		0,587	0,467	0,326	0,844	0,012	0,524	0,024	0,475	0,903	0,040	0,780	0,253	0,127
13	0,924	0,494	1,000	0,284	0,135	0,587		0,099	0,044	0,413	0,035	0,301	0,282	0,217	0,189	0,763	0,461	0,308	0,781
14*	0,627	0,311	0,712	0,513	0,218	0,467	0,099		0,105	0,120	0,004	0,280	0,206	0,761	0,001	0,207	0,045	0,602	0,981
15a	0,883	0,272	0,885	0,371	0,356	0,326	0,044	0,105		0,000	0,055	0,471	0,127	0,488	0,636	0,680	0,499	0,798	0,937
15b	0,326	0,337	0,733	0,081	0,822	0,844	0,413	0,120	0,000		0,304	0,932	0,210	0,515	0,830	0,183	0,977	0,575	0,162
16	0,551	0,613	0,079	0,711	0,013	0,012	0,035	0,004	0,055	0,304		0,856	0,095	0,309	0,274	0,963	0,134	0,130	0,550
17	0,287	0,578	0,562	0,014	0,017	0,524	0,301	0,280	0,471	0,932	0,856		0,176	0,446	0,035	0,645	0,729	0,016	0,258
18	0,070	0,192	0,011	0,002	0,351	0,024	0,282	0,206	0,127	0,210	0,095	0,176		0,000	0,395	0,727	0,073	0,035	0,004
19a	0,056	0,353	0,784	0,617	0,707	0,475	0,217	0,761	0,488	0,515	0,309	0,446	0,000		0,216	0,000	0,346	0,000	0,116
19a*	0,408	0,057	0,309	0,879	0,096	0,903	0,189	0,001	0,636	0,830	0,274	0,035	0,395	0,216		0,397	0,000	0,741	0,161
19b	0,336	0,160	0,893	0,870	0,956	0,040	0,763	0,207	0,680	0,183	0,963	0,645	0,727	0,000	0,397		0,000	0,621	0,194
19b*	0,351	0,061	0,026	0,091	0,705	0,780	0,461	0,045	0,499	0,977	0,134	0,729	0,073	0,346	0,000	0,000		0,902	0,083
20	0,212	0,649	0,045	0,000	0,443	0,253	0,308	0,602	0,798	0,575	0,130	0,016	0,035	0,000	0,741	0,621	0,902		0,520
21	0,101	0,039	0,003	0,278	0,485	0,127	0,781	0,981	0,937	0,162	0,550	0,258	0,004	0,116	0,161	0,194	0,083	0,520	

Bei den mit “*” gekennzeichneten Items wurde die von den Schülern/Schülerinnen angegebene Begründung mit berücksichtigt. Die grauen Unterlegungen zeigen Korrelationen an.

Mit Hilfe der Korrelationstabellen kann man zwar erkennen, welche Items miteinander korrelieren, Aufschlüsse über die Zusammenhänge sind damit aber nicht möglich. Um zu verstehen, welche Zusammenhänge die Schüler/innen zwischen mechanischer Energie, Arbeit, Energieerhaltungssatz der Mechanik, Wärme und inneren Energie sehen, werden im folgenden die Zusammenhänge der Items 2,6,7,9,12,und 16 näher betrachtet.

Auszug aus der Korrelationstabelle:

Versuchsgruppe:

Item	Item 2 (Zusammenhang von W und E)	Item 6 (Vorstellung von der mech. E)	Item 7 (Vorstellung von der W)	Item 9 (Vorstellung vom E – Erhaltungssatz)	Item 12 (Vorstellung von Q)	Item 16 (Vorstellung von E _i)
2		0,248	0,177	0,115	0,257	0,367
6	0,248		0,667	0,224	0,103	0,775
7	0,177	0,667		0,056	0,546	0,216
9	0,115	0,224	0,056		0,815	0,568
12	0,257	0,103	0,546	0,815		0,075
16	0,367	0,775	0,216	0,568	0,075	

Kontrollgruppe:

Item	Item 2 (Zusammenhang von W und E)	Item 6 (Vorstellung von der mech. E)	Item 7 (Vorstellung von der W)	Item 9 (Vorstellung vom E – Erhaltungssatz)	Item 12 (Vorstellung von Q)	Item 16 (Vorstellung von E _i)
2		0,002	0,126	0,243	0,266	0,101
6	0,002		0,011	0,488	0,517	0,048
7	0,126	0,011		0,014	0,182	0,725
9	0,243	0,488	0,014		0,003	0,552
12	0,266	0,517	0,182	0,003		0,012
16	0,101	0,048	0,725	0,552	0,012	

Auffallend ist, dass bei der Versuchsgruppe im Gegensatz zur Kontrollgruppe überhaupt keine Korrelation zwischen den ausgewählten Items besteht. Um dies zu verstehen wird das tatsächliche Antwortverhalten der Schüler/innen mit dem Antwortverhalten verglichen, das sich ergeben würde, wenn man annimmt, dass sich die Grundgesamtheiten der beiden gerade untersuchten Items überhaupt nicht unterscheiden würden. Dieses Antwortverhalten entspricht der Annahme, dass die Nullhypothese, „Die Verteilung der Grundgesamtheiten unterscheiden sich nicht“ richtig ist.

Zusammenhang von Item 6 (mechanische Energie) und Item 7 (Arbeit):

Anhand der beiden untenstehenden Tabellen kann man das Antwortverhalten beider Gruppen ablesen. Die in Klammern angegebenen Zahlen geben die Schülerzahlen wieder, die sich ergeben würden, wenn sich die Grundgesamtheiten der beiden Items überhaupt nicht unterscheiden würden

Ak zu Item 6:

1. Nennung des Energieerhaltungssatzes
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und /oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat
3. Nur Nennung von Energiearten
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit
5. Energie ist gespeicherte Arbeit
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten
7. Energie ist Kraft
8. Sonstige und keine Antwort

Ak zu Item 7:

1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg
4. Beim Verrichten von Arbeit wird eine Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.
5. Arbeit ist Kraft
6. Sonstige oder keine Antwort

Versuchsgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
	N	N	N	N	N	N	N	N	
Item 7									
1	6 (5,2)	17 (15,7)	8 (7,3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (7,8)	11 (12,0)	48
2	2 (0,8)	2 (2,3)	1 (1,1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (1,1)	2 (3,6)	7
3	0 (0,9)	2 (2,6)	1 (1,1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (1,1)	2 (1,8)	8
4	1 (0,9)	1 (2,6)	3 (1,1)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (1,1)	2 (1,8)	8
5	0 (0,4)	1 (1,3)	0 (0,6)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (0,6)	1 (0,9)	4
6	1 (1,8)	7 (5,5)	1 (2,6)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (2,8)	5 (4,3)	17
Σ	10	30	14	0	0	0	15	23	

Kontrollgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	Σ
	N	N	N	N	N	N	N	N	
Item 7									
1	0 (0,1)	0 (0,1)	0 (0,3)	0 (0,3)	0 (0,8)	0 (0,2)	1 (0,4)	2 (1,0)	3
2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
3	1 (1,3)	2 (1,7)	6 (3,8)	4 (4,2)	12 (11,7)	6 (2,9)	4 (5,4)	11 (15,1)	46
4	0 (0,3)	0 (0,4)	2 (1,0)	2 (1,1)	4 (3,1)	0 (0,8)	0 (1,4)	4 (3,9)	12
5	0 (0,4)	0 (0,5)	0 (1,1)	1 (1,2)	1 (3,3)	1 (0,8)	7 (1,5)	3 (4,3)	13
6	2 (1,0)	2 (1,3)	1 (2,9)	3 (3,3)	11 (9,2)	0 (2,3)	1 (4,3)	16 (11,8)	36
Σ	3	4	9	10	28	7	13	36	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Energie- und Arbeitsvorstellung korrelieren nicht miteinander. Die Antwortverteilung stimmt annähernd mit der Antwortverteilung überein, die sich unter der Annahme ergibt, dass sich die Verteilung der Grundgesamtheiten nicht unterscheiden. Das bedeutet, dass bei den Schülern/Schülerinnen Energie- und Arbeitsvorstellung voneinander unabhängig sind. Von den 55 Schülern/Schülerinnen, die die Arbeit als Energieänderung deuten⁷⁷, beschreiben 26 Schüler/innen die Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, der Lage bzw. Bewegung eines Körpers oder anhand von Energiearten⁷⁸.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Energie- und Arbeitsvorstellung korrelieren miteinander. Bei etlichen Kombinationen weicht das tatsächliche Antwortverhalten deutlich von dem Antwortverhalten ab, welches man erwartet wenn man annimmt, dass die Nullhypothese richtig ist. Von den 46 Schülern/Schülerinnen, die die Arbeit als Produkt aus Kraft und Weg definieren, beschreiben 22 Schüler/innen die Energie mit Hilfe des Arbeitsbegriffs⁷⁹. Weiterhin fällt auf, dass mehr Schüler/innen als erwartet Energie, Arbeit und Kraft als Synonyme ansehen.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Im Gegensatz zur Versuchsgruppe, wo die Aussagen zum Energie- und Arbeitsbegriff nicht miteinander korrelieren, liegt bei der Kontrollgruppe ein signifikanter Zusammenhang vor. Während bei der Versuchsgruppe die Energievorstellung als Basis für das Verständnis von Energie und Arbeit im Vordergrund steht, ist es bei der Kontrollgruppe die Arbeitsvorstellung.

Zusammenhang von Item 6 (mechanische Energie) und Item 9 (Energieerhaltungssatz):

Ak zu Item 6:

1. Nennung des Energieerhaltungssatzes
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und / oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat
3. Nur Nennung von Energiearten
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit
5. Energie ist gespeicherte Arbeit
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten
7. Energie ist Kraft
8. Sonstige und keine Antwort

Ak zu Item 9:

1. Die Gesamtenergie ist konstant
2. Die Energie ist konstant
3. Die Gesamtenergie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
4. Die Energie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
5. Energieumwandlungen sind möglich
6. Sonstige und keine Antwort

⁷⁷ Item 7, Ak. 1 und 2

⁷⁸ Item 6, Ak. 1, 2 und 3

⁷⁹ Item 6, Ak. 4,5, und 6

Versuchsgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 9	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	10 (8,8)	28 (26,4)	14 (12,3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	13 (13,2)	16 (20,3)	81
2	0 (0,22)	0 (0,65)	0 (0,3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2	2
3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
5	0 (0,3)	1 (0,9)	0 (0,5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0,5)	2 (0,8)	3
6	0 (0,7)	1 (2,0)	0 (0,9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (1,0)	3 (1,5)	6
Σ	10	30	14	0	0	0	15	23	

Kontrollgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 9	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	3 (1,1)	1 (1,5)	1 (3,4)	2 (3,8)	16 (10,7)	1 (2,7)	7 (5,0)	11 (13,7)	42
2	0 (0,4)	1 (0,6)	2 (1,3)	2 (1,5)	4 (4,1)	0 (1,1)	1 (1,9)	6 (5,2)	16
3	0 (0,2)	0 (0,3)	1 (0,7)	1 (0,7)	0 (2,0)	1 (0,5)	2 (1,0)	3 (2,6)	8
4	0 (0,2)	1 (0,3)	1 (0,7)	0 (0,8)	0 (2,3)	1 (0,6)	1 (1,1)	5 (2,9)	9
5	0 (0,1)	0 (0,1)	0 (0,3)	0 (0,4)	2 (1,0)	1 (0,3)	0 (0,5)	1 (1,3)	4
6	0 (0,8)	1 (1,1)	4 (2,5)	5 (2,8)	6 (7,9)	3 (2,0)	2 (3,7)	10 (10,1)	31
Σ	3	4	9	10	28	7	13	36	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Energieerhaltungs- und Energievorstellung korrelieren nicht miteinander. Von den 81 Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig haben, beschreiben 52 Schüler/innen die Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, der Bewegung bzw. Lage eines Körpers oder durch die Nennung von Energiearten. Kein/e Schüler/in benutzt zur Beschreibung der Energie den Arbeitsbegriff.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Energieerhaltungs- und Energievorstellung korrelieren nicht miteinander. Von den 42 Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergeben⁸⁰ beschreibt die größte Gruppe die Energie als gespeicherte Arbeit. Mit 16 Schüler/innen ist diese Gruppe deutlich größer als erwartet. Das heißt, dass die Schüler/innen, die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergegeben haben, sich stärker an die Schuldefinition der Energie anlehnen, als ihre Mitschüler/innen. Von den Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig haben, beschreiben 5 Schüler/innen die Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, der Bewegung bzw. Lage eines Körpers oder durch die Nennung von Energiearten. Im Vergleich dazu beschreiben 19 Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig haben, die Energie mit Hilfe des Arbeitsbegriffs⁸¹.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Für beide Gruppen besteht zwischen der Energievorstellung und der Kenntnis des Energieerhaltungssatzes keine Korrelation. Die beiden Gruppen unterscheiden sich deutlich in ihrem Antwortverhalten. Von den Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergeben können, beschreiben die meisten Schüler/innen der Versuchsgruppe die Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, der Bewegung bzw. Lage eines Körpers oder durch die Nennung von

⁸⁰ Item 9, Ak 1

⁸¹ Item 6, Ak. 4, 5 und 6

Energiearten. Bei der Kontrollgruppe nimmt fast die Hälfte der Schüler/innen den Arbeitsbegriff zu Hilfe.

Zusammenhang von Item 6 (mechanische Energie) und Item 2 (Korrelation von Energie und Arbeit):

Ak zu Item 6:

1. Nennung des Energieerhaltungssatzes
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und /oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat
3. Nur Nennung von Energiearten
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit
5. Energie ist gespeicherte Arbeit
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten
7. Energie ist Kraft
8. Sonstige und keine Antwort

Ak. zu Item 2:

1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Die Energie wird durch Arbeit geändert
3. Energie ist gleich gespeicherter Arbeit
4. Um Arbeit zu verrichten braucht man Energie
5. Arbeit und Energie haben die gleichen Formeln
6. Arbeit und Energie ist das gleiche
7. Sonstige oder keine Antwort

Versuchsgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 2	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	6 (4,9)	13 (14,7)	8 (6,8)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	8 (7,3)	10 (11,3)	45
2	1 (1,4)	7 (4,2)	3 (2,0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (2,1)	2 (3,3)	13
3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
4	0 (0,9)	2 (2,6)	0 (1,2)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (1,3)	3 (2,0)	8
5	2 (0,4)	1 (1,3)	0 (0,6)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0,7)	1 (1,0)	4
6	0 (0,2)	2 (0,7)	0 (0,3)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0,3)	0 (0,5)	2
7	1 (2,2)	5 (6,5)	3 (3,0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	4 (3,3)	7 (5,0)	20
Σ	10	30	14	0	0	0	15	23	

Kontrollgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 2	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	0 (0,1)	0 (0,2)	0 (0,3)	1 (0,4)	0 (1,0)	0 (0,3)	0 (0,5)	3 (1,3)	4
2	0 (0,5)	1 (0,7)	2 (1,6)	5 (1,8)	5 (5,1)	0 (1,3)	1 (2,4)	6 (6,5)	20
3	0 (0,4)	0 (0,6)	0 (1,3)	0 (1,5)	13 (4,1)	1 (1,0)	0 (1,9)	2 (5,2)	16
4	1 (0,4)	1 (0,6)	3 (1,3)	0 (1,5)	0 (4,1)	1 (1,0)	3 (1,9)	7 (5,2)	16
5	1 (0,2)	0 (0,3)	1 (0,6)	1 (0,6)	1 (1,8)	0 (0,5)	1 (0,8)	2 (2,3)	7
6	0 (0,5)	2 (0,7)	2 (1,6)	2 (1,8)	3 (5,1)	4 (1,3)	2 (2,4)	5 (6,5)	20
7	1 (0,7)	0 (1,0)	1 (2,2)	1 (2,5)	6 (6,9)	1 (1,7)	6 (3,2)	11 (8,8)	27
Σ	3	4	9	10	28	7	13	36	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Energievorstellung und die Vorstellung vom Zusammenhang von Energie und Arbeit korrelieren nicht miteinander. Das liegt sicherlich daran, dass kein/e Schüler/in die mechanische Energie mit Hilfe des Arbeitsbegriffs beschreiben hat.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Energievorstellung und die Vorstellung über den Zusammenhang von Energie und Arbeit korrelieren miteinander. Es fällt auf, dass wesentlich mehr Schüler/innen als nach der Gleichverteilung der Grundgesamtheiten zu erwarten die Energie als gespeicherte Arbeit ansehen.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Im Gegensatz zur Versuchsgruppe, wo die Aussagen zum Energiebegriff und zum Zusammenhang zwischen der Energie und der Arbeit nicht miteinander korrelieren, liegt bei der Kontrollgruppe ein signifikanter Zusammenhang vor. Ein Grund dafür ist, dass etliche Schüler/innen der Kontrollgruppe die Energie über die Arbeit definieren und damit bereits bei der Erklärung des Energiebegriffs einen, für sie wesentlichen Zusammenhang zwischen der Energie und der Arbeit nennen. Die Versuchsgruppe hingegen definiert den Energiebegriff völlig unabhängig vom Arbeitsbegriff.

Zusammenhang von Item 7 (Arbeit) und Item 2 (Zusammenhang von Energie und Arbeit):

Ak zu Item 7:

1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg
4. Beim Verrichten von Arbeit wird eine Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.
5. Arbeit ist Kraft
6. Sonstige oder keine Antwort

Ak. zu Item 2:

1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Die Energie wird durch Arbeit geändert
3. Energie ist gleich gespeicherter Arbeit
4. Um Arbeit zu verrichten braucht man Energie
5. Arbeit und Energie haben die gleichen Formeln
6. Arbeit und Energie ist das gleiche
7. Sonstige oder keine Antwort

Versuchsgruppe:

Item 7	1	2	3	4	5	6	
Item 2	N	N	N	N	N	N	Σ
1	28 (23,5)	5 (3,4)	2 (3,9)	2 (3,9)	2 (2,0)	6 (8,3)	45
2	8 (6,8)	1 (1,0)	1 (1,1)	0 (1,1)	0 (0,6)	3 (2,4)	13
3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
4	3 (4,2)	0 (0,6)	1 (0,7)	3 (0,7)	0 (0,3)	1 (1,5)	8
5	1 (2,1)	0 (0,3)	0 (0,3)	0 (0,3)	1 (0,2)	2 (0,7)	4
6	1 (1,0)	0 (0,2)	1 (0,2)	0 (0,2)	0 (0,1)	0 (0,4)	2
7	7 (10,4)	1 (1,5)	3 (1,7)	3 (1,7)	1 (0,9)	5 (4,0)	20
Σ	48	7	8	8	4	17	

Kontrollgruppe:

Item7	1	2	3	4	5	6	
Item 2	N	N	N	N	N	N	Σ
1	1 (0,1)	0 (0)	1 (1,7)	0 (0,4)	1 (0,5)	1 (1,3)	4
2	0 (0,5)	0 (0)	6 (8,4)	4 (2,2)	2 (2,4)	8 (6,5)	20
3	0 (0,4)	0 (0)	9 (6,7)	1 (1,7)	1 (1,9)	5 (5,2)	16
4	1 (0,4)	0 (0)	4 (6,7)	1 (1,7)	0 (1,9)	10 (5,2)	16
5	0 (0,2)	0 (0)	3 (2,9)	1 (0,8)	1 (0,8)	2 (2,3)	7
6	1 (0,5)	0 (0)	13 (8,4)	2 (2,2)	2 (2,4)	2 (6,5)	20
7	0 (0,7)	0 (0)	10 (11,3)	3 (2,9)	6 (3,2)	8 (8,8)	27
Σ	3	0	46	12	13	36	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Die Arbeitsvorstellung und die Angabe des Zusammenhangs von Energie und Arbeit korrelieren nicht miteinander. Von den 45 Schülern/Schülerinnen, die den Zusammenhang von Arbeit und Energie über die Formel $W = \Delta E$ angeben⁸², definieren 33 Schüler/innen auch genau so die Arbeit⁸³. Das sind mehr Schüler/innen als zu erwarten sind, wenn man annimmt, dass die Grundgesamtheiten gleich verteilt sind.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Die Arbeitsvorstellung und die Angabe des Zusammenhangs von Energie und Arbeit korrelieren nicht miteinander. Von den 46 Schülern/Schülerinnen die die Arbeit als Produkt von Kraft und Weg definieren⁸⁴, gibt die Hälfte der Schüler/innen an, dass Energie und Arbeit das Gleiche sei, oder erkennen gar keinen Zusammenhang zwischen der Energie und der Arbeit⁸⁵.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei beiden Gruppen korreliert die Arbeitsvorstellung und die Angabe des Zusammenhangs von Energie und Arbeit nicht miteinander.

⁸² Item 2, Ak 1

⁸³ Item 7, Ak. 1 und 2

⁸⁴ Item 7, Ak. 3

⁸⁵ Item 2, Ak 6 und 7

Zusammenhang von Item 7 (Arbeit) und Item 9 (Energieerhaltungssatz):

Ak zu Item 7:

1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg
4. Beim Verrichten von Arbeit wird ein Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.
5. Arbeit ist Kraft
6. Sonstige oder keine Antwort

Ak. zu Item 9:

1. Die Gesamtenergie ist konstant
2. Die Energie ist konstant
3. Die Gesamtenergie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
4. Die Energie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
5. Energieumwandlungen sind möglich
6. Sonstige und keine Antwort

Versuchsgruppe:

Item 7	1	2	3	4	5	6	
Item 9	N	N	N	N	N	N	Σ
1	45 (42,3)	6 (6,2)	6 (7,0)	7 (7,0)	3 (3,5)	14 (15)	81
2	0 (1,)	0 (0,2)	0 (0,2)	0 (0,2)	1 (0,1)	1 (0,4)	2
3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
5	1 (1,6)	0 (0,2)	0 (0,3)	0 (0,3)	0 (0,1)	2 (0,6)	3
6	2 (3,1)	1 (0,5)	2 (0,5)	1 (0,5)	0 (0,3)	0 (1,1)	6
Σ	48	7	8	8	4	17	

Kontrollgruppe:

Item 7	1	2	3	4	5	6	
Item 9	N	N	N	N	N	N	Σ
1	1 (1,1)	0 (0)	20 (18,0)	2 (4,6)	4 (5,0)	15 (13,7)	42
2	2 (0,4)	0 (0)	5 (6,7)	5 (1,7)	2 (1,9)	2 (5,2)	16
3	0 (0,2)	0 (0)	5 (3,3)	0 (0,9)	3 (0,9)	0 (2,6)	8
4	0 (0,2)	0 (0)	3 (3,7)	0 (1,0)	1 (1,1)	5 (2,9)	9
5	0 (0,1)	0 (0)	1 (1,7)	2 (0,4)	0 (0,5)	1 (1,3)	4
6	0 (0,8)	0 (0)	12 (13,0)	3 (3,4)	3 (3,7)	13 (10,1)	31
Σ	3	0	46	12	13	36	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Energieerhaltungs- und Arbeitsvorstellung korrelieren nicht miteinander. Von den 81 Schüler/innen, die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergegeben haben⁸⁶, beschreibt die Mehrzahl, nämlich 51 Schüler/innen die Arbeit als Energieänderung⁸⁷. Fast alle 48 Schüler/innen, die die Arbeit als Energieänderung ansehen⁸⁸, können auch den Energieerhaltungssatz richtig beschreiben.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Energieerhaltungs- und Arbeitsvorstellung korrelieren miteinander. Von den 42 Schüler/innen, die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergegeben haben⁸⁹, beschreibt nur einer die Arbeit als Energieänderung⁹⁰, 20 Schüler/innen definieren die Arbeit als Kraft mal Weg und 19 Schüler/innen haben ein völlig falsches Bild von der Arbeit⁹¹. Von den 46 Schüler/innen, die die Arbeit mit Hilfe des Produkts aus Kraft und Weg beschreiben, können weniger als die Hälfte den Energieerhaltungssatz richtig angeben.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Im Gegensatz zur Versuchsgruppe korrelieren bei der Kontrollgruppe Energieerhaltungs- und Arbeitsvorstellung miteinander. Von den Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig angegeben haben, beschreiben bei der Versuchsgruppe rund 63 % die Arbeit als Energieänderung, bei der Kontrollgruppe sind es hingegen nur 0,02 %⁹². Im Vergleich dazu geben von den Schülern/Schülerinnen die den Energieerhaltungssatz richtig wiedergegeben haben, nur 0,07 % der Versuchsgruppe, aber 48 % der Kontrollgruppe als einzige Beschreibung für die Arbeit das Produkt aus Kraft und Weg an.

Die meisten Schüler/innen der Versuchsgruppe beschreiben die Arbeit als Energieänderung. Von diesen Schülern/Schülerinnen geben 93,8 % den Energieerhaltungssatz richtig an. Bei der Kontrollgruppe ist die häufigste genannte Ak. bei der Frage nach der Arbeit die Ak "Arbeit ist gleich Kraft mal Weg". Von diesen Schülern/Schülerinnen können nur 43 % den Energieerhaltungssatz richtig angeben.

Zusammenhang von Item 6 (mechanische Energie) und Item 16 (innere Energie):

Ak zu Item 6:

1. Nennung des Energieerhaltungssatzes
2. Energie ist bei der Bewegung eines Körpers da und / oder Energie hat ein Körper wenn er eine bestimmte Höhe hat
3. Nur Nennung von Energiearten
4. Man erhält Energie beim Verrichten von Arbeit
5. Energie ist gespeicherte Arbeit
6. Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten
7. Energie ist Kraft
8. Sonstige und keine Antwort

⁸⁶ Item 9, Ak 1

⁸⁷ Item 7, Ak. 1 und 2

⁸⁸ Item 7, Ak. 1

⁸⁹ Item 9, Ak 1

⁹⁰ Item 7, Ak. 1 und 2

⁹¹ Item 7, Ak 5 und 6

⁹² Item7, Ak 1 und 2

Ak. zu Item 16:

1. $\Delta E_i = Q + W$
2. E_i ist die Energie, die ein Körper in sich hat
3. E_i ist die Energie, die ein Körper hat
4. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen der Teilchenbewegung hat
5. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen seiner Temperatur hat
6. $E_i =$ Summe über die Energien aller Teilchen ($E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}}$)
7. E_i ist gleich der Wärme
8. Sonstige und keine Antwort

Versuchsgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 16	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	0 (0,5)	2 (1,6)	1 (0,8)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (0,8)	0 (1,3)	5
2	4 (2,5)	10 (7,5)	2 (3,5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (3,8)	4 (5,8)	23
3	0 (0,7)	1 (2,0)	2 (0,9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (1,0)	3 (1,5)	6
4	1 (0,5)	1 (1,6)	1 (0,7)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0,8)	1 (1,3)	5
5	0 (0,3)	1 (1,0)	1 (0,5)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0,5)	0 (0,8)	3
6	3 (2,1)	6 (6,2)	4 (2,9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (3,1)	5 (4,8)	19
7	1 (0,7)	2 (2,0)	0 (0,9)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (1,0)	1 (1,5)	6
8	1 (2,7)	7 (8,2)	3 (3,8)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	5 (4,1)	9 (6,3)	25
Σ	10	30	14	0	0	0	15	23	

Kontrollgruppe:

Item 6	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 16	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
2	1 (0,4)	1 (0,5)	0 (1,2)	0 (1,4)	8 (3,8)	1 (1,0)	2 (1,8)	2 (4,9)	15
3	1 (0,4)	0 (0,6)	1 (1,3)	1 (1,2)	7 (3,3)	0 (0,8)	2 (1,5)	1 (4,3)	13
4	0 (0,2)	0 (0,3)	0 (0,7)	0 (0,8)	5 (2,3)	0 (0,6)	2 (1,1)	2 (2,9)	9
5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
7	0 (0,4)	1 (0,5)	2 (1,2)	3 (1,4)	1 (3,8)	0 (1,0)	1 (1,8)	7 (4,9)	15
8	1 (1,6)	2 (2,1)	6 (4,7)	6 (5,3)	7 (14,8)	6 (3,7)	6 (6,9)	24 (19,0)	58
Σ	3	4	9	10	28	7	13	36	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Vorstellung von Energie - und innere Energie korrelieren nicht miteinander. Von den 42 Schüler/innen, die die innere Energie teilweise befriedigend erklären können⁹³, beschreiben 36 Schüler/innen die Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, anhand der Bewegung oder der Lage eines Körpers oder durch die Nennung von Energiearten⁹⁴.

⁹³ Item 16, Ak. 1,2,4 und 6

⁹⁴ Item 6, Ak. 1, 2 und 3

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Vorstellung von Energie - und innere Energie korrelieren miteinander. Von den 24 Schüler/innen, die die innere Energie teilweise befriedigend erklären können⁹⁵, beschreiben nur 2 Schüler/innen die Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, anhand der Bewegung oder der Lage eines Körpers oder durch die Nennung von Energiearten⁹⁶. 9 Schüler/innen dieser Gruppe beschreiben die Energie mit Hilfe des Arbeitsbegriffs.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei der Versuchsgruppe korrelieren im Gegensatz zur Kontrollgruppe die Energievorstellung und die Vorstellung von der inneren Energie nicht miteinander. Während bei der Versuchsgruppe 85,7 % der Schüler/innen, die die innere Energie teilweise richtig erklären, die mechanische Energie mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes, anhand der Bewegung/ der Lage eines Körpers oder anhand von Beispielen erklären, sind es bei der Kontrollgruppe nur 8,3 %. Dagegen beschreiben von dieser Schülergruppe 0 % der Versuchsgruppe und 37,5 % der Kontrollgruppe die Energie mit Hilfe der Arbeit.

Zusammenhang von Item 16 (innere Energie) und Item 12 (Wärme):

Ak zu Item 12:

1. Wärme = $\Delta E_i - W$
2. Wärme = ΔE_i
3. Wärme = E_i
4. Wärme ist gleich der Temperatur
5. Die Wärme ist eine Energieart
6. Wärme entsteht bei der Reibung
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht
8. Sonstige und keine Antwort

Ak. zu Item 16:

1. $\Delta E_i = Q + W$
2. E_i ist die Energie, die ein Körper in sich hat
3. E_i ist die Energie, die ein Körper hat
4. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen der Teilchenbewegung hat
5. E_i ist die Energie, die ein Körper wegen seiner Temperatur hat
6. $E_i =$ Summe über die Energien aller Teilchen ($E_{kin} + E_{pot}$)
7. E_i ist gleich der Wärme
8. Sonstige und keine Antwort

⁹⁵ Item 16, Ak. 1,2,4 und 6

⁹⁶ Item 6, Ak. 1, 2 und 3

Versuchsgruppe:

Item 12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 16	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	0 (0,5)	3 (1,7)	0 (0,9)	1 (0,4)	0 (0)	1 (0,1)	0 (0)	0 (1,4)	5
2	2 (2,3)	6 (8)	3 (4,0)	2 (2,0)	0 (0)	0 (0,3)	0 (0)	10 (6,5)	23
3	1 (0,6)	3 (2,1)	1 (1,0)	1 (0,5)	0 (0)	0 (0,1)	0 (0)	0 (1,7)	6
4	1 (0,5)	3 (1,7)	1 (0,7)	0 (0,4)	0 (0)	0 (0,1)	0 (0)	0 (1,4)	5
5	0 (0,3)	0 (1,0)	1 (0,5)	0 (0,3)	0 (0)	0 (0,0)	0 (0)	2 (0,8)	3
6	3 (1,9)	9 (6,6)	2 (3,3)	1 (1,7)	0 (0)	0 (0,2)	0 (0)	4 (5,4)	19
7	0 (0,6)	2 (2,1)	2 (1,0)	2 (0,5)	0 (0)	0 (0,1)	0 (0)	0 (1,7)	6
8	2 (2,4)	6 (9,0)	6 (4,3)	1 (2,2)	0 (0)	0 (0,3)	0 (0)	10 (7,1)	25
Σ	9	32	16	8	0	1	0	26	

Kontrollgruppe:

Item 12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 16	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
2	0 (0,4)	0 (0,5)	0 (1,0)	0 (1,1)	4 (2,7)	2 (0,7)	0 (1,0)	9 (7,6)	15
3	0 (0,4)	0 (0,5)	1 (0,8)	0 (0,9)	1 (2,4)	1 (0,6)	3 (0,8)	7 (6,6)	13
4	0 (0,2)	1 (0,3)	1 (0,6)	0 (0,7)	2 (1,6)	0 (0,4)	2 (0,6)	3 (4,6)	9
5	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
6	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
7	0 (0,4)	1 (0,5)	4 (1,0)	0 (1,1)	5 (2,7)	0 (0,7)	0 (1,0)	5 (7,6)	15
8	3 (1,6)	2 (2,1)	1 (3,7)	8 (4,2)	8 (10,5)	2 (2,6)	2 (3,7)	32 (29,5)	58
Σ	3	4	7	8	20	5	7	56	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Innere Energie - und Wärmeverstellung korrelieren nicht miteinander.

Auffallend ist, dass 16 Schüler/innen die Wärme der inneren Energie gleichsetzen, aber nur 6 Schüler/innen die innere Energie als Wärme ansehen. Von den 92 Schülern/Schülerinnen der Versuchsgruppe beschreiben 27 Schüler/innen⁹⁷ sowohl die innere Energie, als auch die Wärme teilweise richtig⁹⁸.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Innere Energie - und Wärmeverstellung korrelieren miteinander. 7 Schüler/innen setzen die Wärme der inneren Energie gleich. Im Gegenzug dazu sehen 15 Schüler/innen die innere Energie als Wärme an. Von den 110 Schülern/Schülerinnen der Kontrollgruppe gibt es nur einen Schüler⁹⁹, der sowohl die innere Energie, als auch die Wärme streckenweise richtig beschreiben kann¹⁰⁰.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Sowohl bei der Versuchsgruppe, als auch bei der Kontrollgruppe gibt es etliche Schüler/innen, die die innere Energie gleich der Wärme setzen und umgekehrt. Es ist anzunehmen, dass bei beiden Unterrichtskonzepten der Unterschied zwischen der Energie und der Energieänderung zu wenig betont wird. Bei der Versuchsgruppe kann fast ein Drittel der Schüler/innen sowohl die innere Energie, als auch die Wärme in Teilen physikalisch befriedigend beschreiben. Bei der Kontrollgruppe ist es

⁹⁷ 29,3 %

⁹⁸ beim Item 16, Ak 1, 2, 4, 6 und zugleich beim Item 12: Ak 1, 2

⁹⁹ 0,9 %

¹⁰⁰ bei Item 16, Ak 1, 2, 4, 6 und zugleich beim Item 12: Ak 1, 2

dagegen nur ein Schüler.

Zusammenhang von Item 12 (Wärme) und Item 9 (Energieerhaltungssatz der Mechanik):

Ak zu Item 12:

1. Wärme = $\Delta E_i - W$
2. Wärme = ΔE_i
3. Wärme = E_i
4. Wärme ist gleich der Temperatur
5. Die Wärme ist eine Energieart
6. Wärme entsteht bei der Reibung
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht
8. Sonstige und keine Antwort

Ak. zu Item 9:

1. Die Gesamtenergie ist konstant
2. Die Energie ist konstant
3. Die Gesamtenergie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
4. Die Energie ist konstant wenn keine Arbeit verrichtet wird
5. Energieumwandlungen sind möglich
6. Sonstige und keine Antwort

Versuchsgruppe:

Item 12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 9	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	9 (7,9)	31 (28,2)	13 (11,4)	6 (7,0)	0 (0)	1 (0,9)	0 (0)	21 (22,9)	81
2	0 (0,2)	0 (0,7)	1 (0,3)	0 (0,2)	0 (0)	0 (0,0)	0 (0)	1 (0,6)	2
3	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
4	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
5	0 (0,3)	0 (1,0)	1 (0,5)	1 (0,3)	0 (0)	0 (0,0)	0 (0)	1 (0,8)	3
6	0 (0,6)	1 (2,1)	1 (1,0)	1 (0,5)	0 (0)	0 (0,1)	0 (0)	3 (1,7)	6
Σ	9	32	16	8	0	1	0	26	

Kontrollgruppe:

Item 12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 9	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	0 (1,1)	2 (1,5)	4 (2,7)	2 (3,1)	7 (7,6)	2 (1,9)	3 (2,7)	22 (21,4)	42
2	0 (0,4)	1 (0,6)	1 (1,0)	1 (1,2)	1 (2,9)	1 (0,7)	1 (1,0)	10 (8,1)	16
3	3 (0,2)	0 (0,3)	0 (0,5)	1 (0,6)	3 (1,5)	0 (0,4)	0 (0,5)	1 (4,1)	8
4	0 (0,2)	0 (0,3)	1 (0,6)	1 (0,7)	2 (1,6)	1 (0,4)	2 (0,6)	2 (4,6)	9
5	0 (0,1)	0 (0,1)	0 (0,3)	0 (0,3)	1 (0,7)	1 (0,2)	0 (0,3)	2 (2,0)	4
6	0 (0,8)	1 (1,1)	1 (2,0)	3 (2,3)	6 (5,6)	0 (1,4)	1 (2,0)	19 (15,8)	31
Σ	3	4	7	8	20	5	7	56	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Energieerhaltungs- und Wärmeverstellung korrelieren nicht miteinander. Die tatsächliche Antwortverteilung stimmt gut mit der Antwortverteilung überein, die sich ergibt, wenn man annimmt, dass sich die Verteilung der Grundgesamtheiten nicht unterscheiden. Von den 81 Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig angeben, beschreiben etwa die Hälfte¹⁰¹ die Wärme annähernd richtig¹⁰².

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Energieerhaltungs- und Wärmeverstellung korrelieren miteinander. Von den 42 Schülern/Schülerinnen, die den Energieerhaltungssatz richtig angeben, beschreiben nur zwei Schüler/innen¹⁰³ die Wärme annähernd richtig¹⁰⁴.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Während bei der Versuchsgruppe zirka 43,5 % der Schüler/innen sowohl den Energieerhaltungssatz der Mechanik ganz richtig, als auch Wärmebegriff wenigstens teilweise richtig wiedergeben können, sind es bei der Kontrollgruppe nur 1,8 % der Schüler/innen.

Zusammenhang von Item 12 (Wärme) und Item 7 (Arbeit):

Ak zu Item 12:

1. Wärme = $\Delta E_i - W$
2. Wärme = ΔE_i
3. Wärme = E_i
4. Wärme ist gleich der Temperatur
5. Die Wärme ist eine Energieart
6. Wärme entsteht bei der Reibung
7. Die Wärme ist eine Energie, die bei der Reibung entsteht
8. Sonstige und keine Antwort

Ak zu Item 7:

1. Arbeit ist gleich der Energieänderung ($W = \Delta E$)
2. Arbeit ist gleich der Energieänderung und Arbeit ist Kraft mal Weg
3. Arbeit ist gleich Kraft mal Weg
4. Beim Verrichten von Arbeit wird eine Körper bewegt und/oder seine Lage geändert.
5. Arbeit ist Kraft
6. Sonstige oder keine Antwort

¹⁰¹ 49,4 %

¹⁰² Item 12, Ak 1 und 2

¹⁰³ 4,8 %

¹⁰⁴ Item 12, Ak 1 und 2

Versuchsgruppe:

Item 12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 7	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	6 (4,7)	22 (16,7)	7 (8,3)	4 (4,2)	0 (0)	0 (0,5)	0 (0)	9 (13,6)	48
2	0 (0,7)	1 (2,4)	1 (1,2)	1 (0,6)	0 (0)	0 (0,1)	0 (0)	4 (2,0)	7
3	0 (0,8)	3 (2,8)	1 (1,4)	2 (0,7)	0 (0)	0 (0,1)	0 (0)	2 (2,3)	8
4	1 (0,8)	1 (2,8)	3 (1,4)	1 (0,7)	0 (0)	0 (0,1)	0 (0)	2 (2,3)	8
5	0 (0,4)	1 (1,4)	1 (0,7)	0 (0,3)	0 (0)	0 (0,0)	0 (0)	2 (1,1)	4
6	2 (1,7)	4 (5,9)	3 (3,0)	0 (1,5)	0 (0)	1 (0,2)	0 (0)	7 (4,8)	17
Σ	9	32	16	8	0	1	0	26	

Kontrollgruppe:

Item 12	1	2	3	4	5	6	7	8	
Item 7	N	N	N	N	N	N	N	N	Σ
1	0 (0,1)	0 (0,1)	0 (0,2)	0 (0,2)	1 (0,5)	0 (0,1)	0 (0,2)	2 (1,5)	3
2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0
3	1 (1,3)	1 (1,7)	2 (2,9)	4 (3,3)	9 (8,4)	3 (4,2)	3 (1,7)	23 (23,4)	46
4	0 (0,3)	2 (0,4)	0 (0,8)	0 (0,9)	1 (2,2)	0 (0,5)	1 (0,8)	8 (6,1)	12
5	2 (0,4)	0 (0,5)	1 (0,8)	0 (0,9)	6 (2,4)	0 (0,6)	1 (0,8)	3 (6,6)	13
6	0 (1,0)	1 (1,3)	4 (2,3)	4 (2,6)	3 (6,5)	2 (1,6)	2 (2,3)	20 (18,3)	36
Σ	3	4	7	8	20	5	7	56	

Antwortverhalten der Versuchsgruppe:

Arbeits- und Wärmeverstellung korrelieren nicht miteinander. Von den 45 Schülern /Schülerinnen, die die Arbeit als Energieänderung definieren¹⁰⁵, beschreibt etwas mehr als die Hälfte, nämlich 29 Schüler/innen die Wärme entweder mit Hilfe des ersten Hauptsatzes der Wärmelehre oder anhand der Änderung der inneren Energie¹⁰⁶.

Antwortverhalten der Kontrollgruppe:

Arbeits- und Wärmeverstellung korrelieren nicht miteinander. Von den 46 Schülern/Schülerinnen, die die Arbeit mit Hilfe des Produkts aus Kraft und Weg beschreiben¹⁰⁷, wählen 41 Schüler/innen eine physikalisch völlig unbefriedigende Erklärung der Wärme¹⁰⁸.

Vergleich des Antwortverhaltens beider Gruppen:

Bei beiden Gruppen korrelieren Arbeits- und Wärmeverstellung nicht miteinander. Etwa die Hälfte der Schüler/innen der Versuchsgruppe, die die Arbeit dem zugrundegelegten Unterrichtskonzept adäquat mit $W = \Delta E$ beschreiben können, sind auch in der Lage die Wärme teilweise richtig zu beschreiben. Bei der Kontrollgruppe ist dazu fast kein/e Schüler/in, der/die die Arbeit als „F-s“ beschrieben hat, in der Lage, die Wärme entsprechend zu definieren.

¹⁰⁵ Item 7, Ak. 1 und 2

¹⁰⁶ Item 12, Ak. 1 und 2

¹⁰⁷ Item 7, Ak 3

¹⁰⁸ Item 12, Ak. 3,4,5,7 und 8

Zusammenfassung der Untersuchung zur Korrelation der einzelnen Items:

Bei der Versuchsgruppe korrelieren die Items, bei denen nach den physikalischen Begriffen Arbeit, mechanische Energie, Energieerhaltungssatz der Mechanik, innere Energie und Wärme gefragt wird, nicht miteinander. Bei der Kontrollgruppe korrelieren die Items der oben genannten physikalischen Begriffe häufig miteinander. Im Vergleich zur Kontrollgruppe gibt es deutlich mehr Schüler/innen, die mehrere Items gleichzeitig befriedigend beantworten können.

Diskussion:

Die fehlende Korrelation der physikalischen Begriffe bei der Versuchsgruppe zeigt, dass in dieser Gruppe die Vorstellung von den einzelnen Begriffen unabhängig von den anderen Begriffen ausgebildet ist. Das heißt aber nicht, dass das Antwortverhalten der Schüler/innen völlig willkürlich ist.

Wie bereits oben angedeutet, haben bei der Versuchsgruppe deutlich mehr Schüler/innen als bei der Kontrollgruppe gleichzeitig mehrere Items richtig beantwortet. Bei der Kontrollgruppe ist die Vorstellung der einzelnen physikalischen Begriffe teilweise voneinander abhängig. Aus den oberen Korrelationstabellen lassen sich aber keine eindeutigen Zusammenhänge ablesen.

Lebenslauf:

Name: **Martin Bader**

Geburtsdatum und –ort: 31.07.1961, Ulm/Donau
 Eltern: Helmut Bader, Dipl. Finanzwirt
 Gertrud Bader, geb. Kreher,
 Einzelhandelskauffrau

Familienstand: verheiratet mit Christiane Bader
 (Sozialpädagogin), zwei Kinder

Schule:

September 1967 – Juli 1971: Rektor Meinhard Mayer Grundschule
 Wullenstetten

September 1971 – Juli 1981
 Juni 1981 Nikolaus-Kopernikus-Gymnasium Weißenhorn
 Allgemeine Hochschulreife

Zivildienst:

August 1981 – September 1982 Werkstatt für Behinderte, Senden

Studium:

Oktober 1982 – Januar 1989
 Januar 1989 TU München, Studium der allgemeinen Physik
 Abschluß als Diplom Physiker

Referendariat:

Februar 1989 – Januar 1991
 Januar 1991 Referendariat am Oskar-von-Miller Gymnasium
 in München
 2. Staatsexamen für das Lehramt an Gymnasien,
 Fächerkombination Mathematik/ Physik

Berufstätigkeit:

Februar 1991 – Juli 1993
 seit August 1993
 seit August 1995 StR z.A. am Gymnasium Unterhaching
 StR am Illertal-Gymnasium Vöhringen
 Zeitprüfer beim 1. Staatsexamen im Fach
 Didaktik der Physik an der Universität
 Augsburg

seit September 1997 Lehrauftrag an der Universität Augsburg im
 Fachbereich Didaktik der Physik