

Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs - Ergebnisse einer empirischen Studie -

Erich Starauschek

Abteilung Didaktik der Physik, Universität Karlsruhe, 76128 Karlsruhe
(Eingegangen: 21.05.2002; Angenommen: 18.07.2002)

Kurzfassung

Im Karlsruher Physikkurs wird die Wärmelehre in der Sekundarstufe I mit Hilfe der mengenartigen Größe Entropie unterrichtet. Vergleichende Tests zur Lernleistung zeigen, dass der Unterricht der Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs eher als die traditionellen Zugänge geeignet ist, Konzeptwechselprozesse bei Schülern einzuleiten: Schüler, die nach dem Karlsruher Physikkurs unterrichtet werden, erklären Temperatenausgleichsprozesse und die Wärmeempfindung häufiger mit physikalischen Konzepten als traditionell unterrichtete Schüler.

1. Einleitung

Der Karlsruher Physikkurs stellt die Physik mit einer veränderten Sachstruktur dar, mit der sich eine vertikale Vernetzung zwischen verschiedenen Teilgebieten der Physik zeigt [1]. Die neue Struktur hat ihren Ursprung in der Thermodynamik und ist eine konsequente Neuinterpretation der sogenannten GIBBSschen Fundamentalform [1], die auch „differential form of the fundamental equation“ [2] genannt wird. Damit können die gängigen Teilbereiche des Physikunterrichts umstrukturiert werden. Dies bringt neue Konzepte und Metaphern sowie eine veränderte Sprache der Physik mit sich. Der Ansatz wird mittlerweile seit zehn Jahren in größerem Umfang regulär an Gymnasien in Baden-Württemberg in der Sekundarstufe I und in Klasse 11 unterrichtet und ist als Karlsruher Physikkurs (KPK) bekannt [3].

Im Unterrichtsgang werden mengenartige Größen in den Mittelpunkt gestellt. Die meisten extensiven Größen der Physik sind mengenartige Größen, etwa die Energie oder die elektrische Ladung. Man kann sie sich als ein „Etwas“ oder als einen „Stoff“ veranschaulichen, das oder der in einem physikalischen System mehr, weniger oder gar nicht enthalten ist. Das „Etwas“ kann in ein System hinein- oder herausfließen, im System entstehen oder verschwinden. Mathematisch lassen sich mengenartige Größen über eine Kontinuitätsgleichung definieren. Die durchgängig auftretende Metapher des Karlsruher Kurses ist damit die des „Stoffes“, mit der sich Mengen veranschaulichen lassen.

Zu einer extensiven Größe findet sich meist eine intensive Partnergröße. Haben die intensiven Partnergrößen an zwei Stellen des Raumes unterschiedliche Werte, so kann der zur extensiven Größe gehörige Strom von selbst von der Stelle, an der die intensive Partnergröße den höheren Wert hat, zu der Stelle fließen, an der die intensive Partnergröße den niedrigeren Wert hat. Die Differenz zwischen den intensiven Partnergrößen wird dabei als Antrieb für den Strom interpretiert. Für dieses Konzept hat sich der Name Strom-Antrieb-Modell eingebürgert. Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von Lehrsätzen zum Strom-Antrieb-Modell aus verschiedenen Teilgebieten der Physik. Die vertikale Vernetzung zeigt sich hierbei aus sprachlicher Sicht.

Physikalische Aspekte der Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs: In der Wärmelehre nach dem KPK wird die Entropie als mengenartige Größe zu Beginn eingeführt. Aus der Sicht der traditionellen Physik scheint die Interpretation der Entropie als mengenartige Größe, die mit der Metapher des „Stoffes“ in Verbindung gebracht wird, ein Anachronismus aus den Tagen LAVOISIERS zu sein, der durch die statistisch geprägte Auffassung der Entropie oder durch die Entropie als Zustandsgröße überwunden ist [4]. Eine Analyse zeigt hingegen, dass die Auffassung von der Entropie als mengenartiger Größe gleichberechtigt neben den gängigen Interpretationen der Entropie in der Physik steht [5; 6 S. 128]. Auch historisch findet sich die Entropie

Tabelle 1 Sprachliche Beschreibung des Strom-Antrieb-Modells im Karlsruher Physikkurs

Hydrodynamik:	Flüssigkeiten und Gase fließen von selbst von Stellen höheren Drucks zu Stellen niedrigeren Drucks	Der Druckunterschied ist ein Antrieb für Flüssigkeits- und Gasströme
Wärmelehre:	Entropie fließt von selbst von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur	Der Temperaturunterschied ist ein Antrieb für einen Entropiestrom
Elektrizitätslehre:	Elektrische Ladung fließt von selbst von Stellen höheren Potentials zu Stellen niedrigeren Potentials	Der Potenzialunterschied ist ein Antrieb für einen elektrischen Strom

als mengenartige Größe; bislang sind diese Impulse nicht in den Diskurs der Physik eingeflossen [5, 7, 8].

Fachdidaktische Aspekte der Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs: Im KPK wird eine Umdeutung der Alltagsvorstellung „Wärme“ vorgeschlagen. Die Entropie sei das, was in der Alltagssprache mit dem Wort „Wärme“ bezeichnet wird. Die Umdeutung der „Wärme“ scheint möglich, da Untersuchungen zum Alltagskonzept der „Wärme“ zeigen, dass das Alltagskonzept einen „mengenartigen“, extensiven Aspekt aufweist; es finden sich aber ebenso energetische und intensive Aspekte [9].

Als problematisch wird in der Literatur die Umdeutung angesichts des historisch gewachsenen Kanons der Physik angesehen: „Wärme“ ist in der Physik ein Name für eine energetische Prozessgröße. Eine „entropische“ Auffassung der „Wärme“ könne nicht in das Curriculum der Fachwissenschaft Physik integriert werden [10].

Ein Neuansatz für die Wärmelehre ist jedoch notwendig, da weder Schüler [11] noch Studenten [12] im traditionellen Unterricht der Wärmelehre in ausreichendem Maß physikalische Konzepte entwickeln. Schüler erkennen den Unterschied zwischen Prozessgröße und Zustandsgröße nur unzureichend. Sie verstehen in der Regel auch nicht, wie sich die Wärmemenge als zentrale Größe der Kalorimetrie von den Größen Wärme und innerer Energie unterscheidet.

In der deutschen Physikdidaktik wurde in den 70er Jahren eine Debatte um die physikalischen Konzepte in der Wärmelehre geführt. Die sprachliche Nähe der Bezeichnungen der Größen der Wärmelehre und die Alltagsvorstellungen der Schüler zur „Wärme“, die sich stark von den Konzepten der traditionellen Wärmelehre unterscheiden, haben sich als Ursachen der Schwierigkeiten erwiesen [13]. Daher liegt es nahe, eine Wärmelehre ohne das Wort „Wärme“ zu entwerfen und sie konsistent mit Hilfe der Energie zu formulieren [14]. Entwürfe für die Schule liegen vor [15]; an Erfahrungsberichten oder an empirischen Studien über den Unterrichtserfolg mangelt es. Wirkungen können erwartet werden, wenn die Wärmelehre begrifflich vereinfacht und vereindeutigt wird; dies zeigt sich bei einer Studie über einen Kurs zur Wärmelehre aus der Lehrerbildung, in dem allein die Energie und das Teilchenbild Eingang fanden [16]. Da Schüler der Sekundarstufe I das Teilchenbild in der Regel nicht zur physikalischen Argumentation verwenden, verschließt sich dieser Weg für die allgemeinbildende Schulphysik.

2. Zur empirischen Untersuchung

Allgemeines: Die Physik der Sekundarstufe I an Gymnasien in Baden-Württemberg kann nach dem KPK unterrichtet werden [17, S. 286]. Daher finden sich in Baden-Württemberg die meisten Schüler, die nach dem KPK unterrichtet werden. Eine vergleichende Fragebogenuntersuchung fand dort am Ende

des Schuljahres 1997/98 in Klasse 9 statt (quasiexperimentelles Treatment-Kontrollgruppen-Design). Die ausführliche Darlegung der Ergebnisse der Untersuchung findet sich in [18].

Stichprobe: Die Stichprobe der Schüler, die nach dem Karlsruher Physikkurs unterrichtet wurde (s. Tabelle 2), ist hinsichtlich der Verteilung des Unterrichts auf das Schuljahr (s. unten) und hinsichtlich der behandelten Unterrichtsthemen (s. unten) nur bedingt mit der Stichprobe der traditionell unterrichteten Schüler vergleichbar.

Verteilung der Unterrichtsstunden: Den Schülern beider Gruppen wurden etwa 20 Unterrichtsstunden zur Wärmelehre erteilt. Die traditionell unterrichteten Schüler und ein Teil der Karlsruher Schüler wurden zwei Stunden pro Woche im Fach Physik unterrichtet, d.h. der Unterricht fand innerhalb von drei Monaten statt. Der größere Teil der Schüler der Karlsruher Stichprobe wurde hingegen nur eine Stunde pro Woche unterrichtet, d.h. der Unterricht zog sich über ein Schulhalbjahr hin (s. Tabelle 3).

Tabelle 2 Stichprobe und Vergleichsgruppe, Gymnasium, Baden-Württemberg, Klasse 10, 1998

Zahl der Schüler	KPK	TRD
Gesamt	155	75
Jungen	71	45
Mädchen	84	30

KPK: Karlsruher Physikkurs, TRD: Traditioneller Unterricht.

Tabelle 3 Zahl der Schüler nach Unterrichtsstunden

	KPK einstündig	KPK zweistündig	TRD zweistündig
Zahl der Schüler	93	62	75

KPK: Karlsruher Physikkurs, TRD: Traditioneller Unterricht.

Unterrichtsthemen: Auswahl und Konstruktion der Testaufgaben orientierten sich am traditionellen Lehrplan. Dort werden das Teilchenbild, Temperatur, innere Energie, Energieübertragung bei Temperaturengleichprozessen, Wärmekapazität, Wärmeleitung und Phasenübergänge behandelt. Die Lehrziele für die Karlsruher Schüler gleichen denen der traditionell unterrichteten Schüler hinsichtlich der Wärmeleitung und der Beschreibung der Temperaturengleichprozesse. Das Thema Phasenübergänge wurde nur in einer Karlsruher Klasse unterrichtet.

Testaufbau: Sechzehn überwiegend offene Fragen wurden gestellt.

- (a) Intensive und extensive Größe: Drei Fragen.
- (b) Temperaturengleichprozess: Vier Fragen.
- (c) Wärmeleitung und Wärmeempfinden: Drei Fragen.

- (d) Phasenübergänge: Fünf Fragen.

Zur Kontrolle wurde eine Frage zur Längenausdehnung von Metallen verwendet. Dieses Thema wird im Unterricht der Karlsruher Schüler nicht explizit behandelt.

Anmerkungen: (a) Irreversible Aspekte in der Wärmelehre wurden nicht untersucht. Die Ergebnisse einer kleinen Studie (N = 10) von KESIDOU & DUIT lassen vermuten, dass die Karlsruher Schüler die Irreversibilität von Prozessen häufiger als etwas „Selbstverständliches“ ansehen als traditionell unterrichtete Schüler [19].

(b) Die energetischen Aspekte spielen bei der vorliegenden Untersuchung ebenfalls eine untergeordnete Rolle. Erste Hinweise führen zu der Vermutung, dass die Karlsruher Schüler nicht zwischen Energie und Entropie trennen. Dies deutet sich auch in der Studie von KESIDOU & DUIT an [19].

Im Folgenden werden die Ergebnisse exemplarisch dargestellt. Die offenen Fragen wurden mit Hilfe eines aufwändigen induktiven Verfahrens ausgewertet, das sich aus der qualitativen Inhaltsanalyse ableitet [20]. Eine Intercoder-Reliabilität zwischen 90% und 95% wurde erzielt. Die Beschreibung des genauen Verfahrens findet sich in [18].

3. Ergebnisse

(a) *Intensive und extensive Größe:* (Die Testfragen und die weiteren Details, auf denen die folgenden Aussagen fußen, finden sich in [18].) Traditionell unterrichtete Schüler und Karlsruher Schüler erkennen die Temperatur als intensive Größe (jeweils ca. 90%). Ca. 80% der Schüler beider Gruppen entwickeln Vorstellungen von einer mengenartigen Größe X , die von einem Körper zum anderen fließt. X steht hierbei für Energie, Wärme, Wärmeenergie oder Entropie. Die Schüler erkennen, dass in einen größeren Körper „mehr an X “ als in einen kleineren Körper hineinfließen muss, damit der größere Körper die gleiche Temperatur wie der kleinere Körper hat. Bestehen die beiden Körper jedoch aus unterschiedlichen Stoffen, können Schüler beider Gruppen nicht mehr richtig vorhersagen, welcher Körper „mehr oder weniger an X “ enthält.

(b) *Temperaturlausgleichsprozesse:* Die folgende Aufgabe wurde den Schülern vorgelegt.

(i) [21] Eine Flasche mit lauwarmen Limonade wird in einen See mit kaltem Wasser eingetaucht.

- Was beobachtest Du?
- Wie erklärst Du Dir das?

Die Abkühlung der Flasche wurde von etwa 90% der Karlsruher Schüler und etwa 70% der traditionell unterrichteten Schüler vorhergesagt. Die richtigen Vorhersagen lassen sich in zwei Klassen einteilen: Vorhersagen, die in der Alltagssprache – Limonade wird kälter, die Limonadenflasche kühlt ab – oder die mit Hilfe der Temperatur – die Temperatur in der Flasche sinkt – formuliert sind.

Die Erklärungen der Beobachtung lassen sich ebenfalls grob in zwei Klassen einteilen: Erklärungen, deren Formulierung auf die Vorstellung einer mengenartigen Größe schließen lässt (Schülerzitat): „Die lauwarme Limonade gibt die Energie an den kalten

See ab.“ Oder (Schülerzitat): „Der See ist kälter und ich weiß, dass Entropie von Stellen höherer Temp. zu Stellen niedriger Temp. fließt.“ Die zweite Klasse bilden die übrigen Antworten.

Die Formulierungen der Karlsruher Schüler ähneln in der Regel dem Lehrsatz des Strom-Antriebs-Modells (s. Tabelle 1). Auf diesen Umstand weisen KESIDOU & DUIT ebenfalls hin [19]. Insgesamt geben 67% der Karlsruher Schüler eine Antwort, die man als physikalisch bezeichnen kann; nur 34% der Antworten der traditionell unterrichteten Schüler tun dies (χ^2 -Test, $df = 1$, $p < .001$; mittlerer bis großer Effekt [22]).

Bei einer zweiten Frage zum Temperaturlausgleich, bei der Eiswürfel mit einer Temperatur von -5°C in eine Umgebung mit der Temperatur von -10°C gebracht werden, erhält man ein ähnliches Bild: Ca. 70% der Schüler beider Gruppen machen die richtige Vorhersage. 48% der Karlsruher Schüler und 30% der traditionell unterrichteten Schüler begründen richtig (χ^2 -Test, $df = 1$, $p < .001$; mittlerer bis großer Effekt [22]).

(c) *Wärmeleitung und Wärmeempfinden:* Ca. 80% der Schüler beider Gruppen beantworten die beiden folgenden Fragen zur Wärmeleitfähigkeit richtig:

(ii) [24] Ein Metalllöffel, ein Holzlöffel und ein Plastiklöffel werden in heißes Wasser gelegt. Welcher der Löffel fühlt sich nach 15 Sekunden am heißesten an?

(iii) [16] Stell Dir zwei identische Eiswürfel vor. Die Eiswürfel sind so klein, daß sie in je einen Becher passen. Ein Eiswürfel wird in einem Metallbecher aufbewahrt, der andere in einem Plastikbecher. Stell Dir weiter vor, Du trägst die beiden Becher im Sommer mit Dir herum. Welcher Eiswürfel ist zuerst geschmolzen?

D.h. sie geben an, dass Metall Entropie, Wärme oder Energie besser leitet. Trotz der physikalischen Vorstellung zur Wärmeleitung, ist es für Schüler schwierig, die Empfindung von warm und kalt physikalisch zu erklären. BROOK et al. haben hierzu die folgende Testfrage gestellt:

(iv) [24] (Die Abbildung zur Aufgabe ist nicht dargestellt.) Es ist ein kalter Tag, Anna fährt trotzdem mit dem Fahrrad zu Schule. Sie bemerkt, dass sich das Metall der Lenkerstange viel kälter anfühlt als die weißen Plastikgriffe.

Bitte erkläre, warum dies so ist.

BROOK et al. finden bei dieser Frage nur in 6% der Antworten einen Wärmestrom, der von der Hand zum Lenker fließt [24]. Hingegen werden durch diese Aufgabe Kältevorstellungen hervorgerufen.

33% der Karlsruher Schüler geben Antworten, bei denen die Richtung des Entropiestromes von der Hand zum Lenker erkennbar ist. 5% an vergleichbaren Antworten finden sich bei den traditionell unterrichteten Schülern (s. Tabelle 4 und 5). Bei den Erklärungen benutzen 52% der traditionell unterrichteten Schüler die Kälte; nur 22% der Karlsruher Schüler greifen auf sie zurück.

Tabelle 4 Wärmeempfinden Aufgabe (iv): Kategorien und Beispiele Schülerantworten

Kategorie	Beispiele Schülerantworten
Etwas fließt aus der Umgebung in das Metall oder den Griff	Das Metall an ihrem Lenker nimmt viel mehr Kälte auf und ist daher kälter
Etwas fließt aus dem Metall oder dem Griff in die Umgebung	Metall gibt viel besser seine Energie an die Luft ab wie die Plastikgriffe
Es wird von „Leitung“ gesprochen. Die Richtung ist nicht erkennbar	Der ganze Lenker ist gleich kalt. Allerdings leitet das Metall die Kälte mehr als das Plastik und es fühlt sich so an als wären sie unterschiedlich kalt
Etwas fließt aus den Fingern in das Metall oder den Griff	Metall leitet die Entropie vom Finger besser als Plastik Weil das Metall ein besserer Wärmeleiter ist => sie nehmen die Energie (Wärme) der Hände viel schneller auf als die Plastikgriffe
Die Empfindung wird explizit durch Wärmeleitung aus den Fingern erklärt	Das Plastik leitet Entropie nicht so gut wie Metall, darum erwärmt es sich dort, wo Anna es anfasst => Anna fühlt ihre eigene Wärme. Im Metall fließt die Entropie fort und verteilt sich

Tabelle 5 Wärmeempfinden Aufgabe (iv): Ergebnisse

%	KPK N = 155	TRD N = 75
Etwas fließt aus der Umgebung in das Metall oder den Griff	16	29
Etwas fließt aus dem Metall oder dem Griff in die Umgebung	10	8
Es wird von „Leitung“ gesprochen. Die Richtung ist nicht erkennbar	25	35
Etwas fließt aus den Fingern in das Metall oder den Griff ⁺	19	4
Die Empfindung wird explizit durch Wärmeleitung aus den Fingern erklärt ⁺⁺	14	1
Anderes	11	20
Keine Angabe	4	3
	100	100

χ^2 -Test, df = 1, Kategorie⁺ und Kategorie⁺⁺ werden zu einer Kategorie zusammengefasst, *** p < .001; mittlerer bis großer Effekt [22]. KPK: Karlsruher Physikkurs, TRD: Traditioneller Unterricht.

(d) *Phasenübergänge*: Die Fragen zum Thema Phasenübergänge werden von den Schülern aus beiden Gruppen richtig beantwortet.

Die erste Aufgabe zu diesem Themenbereich fragt nach der Veränderung der Temperatur bei Erhöhung der Wärmezufuhr –

- (v) [25] (Die Abbildung zur Aufgabe ist nicht dargestellt.) 1. Ein Topf mit einer großen Menge Wasser steht auf einer elektrischen Kochplatte, der Schalter steht auf 3. Nach 5 Minuten siedet das Wasser, das Thermometer zeigt 100°C an. Was zeigt das Thermometer nach weiteren 5 Minuten an?
2. Der Topf wird wie bei (1) erwärmt. Wenn die Temperatur von 100°C erreicht ist, wird der Schalter auf 6 gedreht. Was zeigt das Thermometer nach weiteren 5 Minuten an?

– jeweils etwa 90% der Schüler geben bei Teil 1 100°C an; jeweils etwa 85% tun dies auch bei Teil 2. Die Ergebnisse lassen sich bei einer Veränderung des Aufgabenkontextes bestätigen.

- (vi) [24] (Die Abbildung zur Aufgabe ist nicht dargestellt.) Ein Koch stellt zwei Töpfe mit Kartoffeln und Wasser auf einen Herd, bis das Wasser kocht. Nachdem das Wasser in

beiden Töpfen kocht, dreht er die Gaszufuhr des rechten Brenners so niedrig, dass das Wasser gerade am Kochen gehalten wird. Er denkt, dass im Topf auf der großen Flamme die Kartoffeln schneller kochen. Seine Freundin ist anderer Meinung. Sie behauptet, daß für Kartoffeln in beiden Töpfen die Kochzeit gleich ist.

- (a) Was glaubst Du? Wer von den Beiden hat recht?
(b) Wie begründest Du Deine Antwort?

Auch in der Alltagssituation erkennen die Schüler beider Gruppen, dass die Temperatur bei einem Phasenübergang von der Wärmezufuhr unabhängig ist: 85% der Karlsruher Schüler und 88% der traditionell unterrichteten Schüler bestätigen die Aussagen der Freundin.

63% der Karlsruher Schüler und 55% der traditionell unterrichteten Schüler geben eine akzeptable Begründung. Die Verteilung der Antworten der Kategorien „Es kommt nur auf die Temperatur des Wassers an“, „Beide Töpfe haben die gleiche Temperatur“ und „Wasser kann nicht heißer werden als 100°C“ unterscheiden sich nicht signifikant.

Tabelle 6 Phasenübergänge Aufgabe (vii): Verteilung der Erklärungen

%	KPK N = 155	TRD N = 75
Die zeitliche Verzögerung durch das „Auftauen der Erbsen“ wird nicht begründet	18	19
Das „Abkühlen des Wassers“ durch die Erbsen oder die niedrigere Temperatur der Erbsen wird ohne Begründung genannt	39	20
Die zeitliche Verzögerung durch das „Auftauen der Erbsen“, „Abkühlen des Wassers“ wird mit dem „Fehlen von Wärme, Entropie, Energie...“ begründet	36	45
Argumente mit „Kälte“	6	13
Anderes	1	3
Keine Angabe	0	0
	100	100

χ^2 -Test, df = 4: Keine signifikanten Unterschiede. KPK: Karlsruher Physikkurs, TRD: Traditioneller Unterricht.

Die folgende Aufgabe zur Schmelzwärme –

(vii) [24] (Die Abbildung zur Aufgabe ist nicht dargestellt.) In zwei gleiche Töpfe P und Q wird die gleiche Menge an Wasser gleicher Temperatur gegeben. In den Topf P werden gefrorene Erbsen gegeben. In den Topf Q wird die gleiche Menge an frischen Erbsen gegeben. Die Töpfe werden auf zwei gleich große Heizplatten gestellt und auf der gleichen Stufe erhitzt.

Das Wasser im Topf mit den gefrorenen Erbsen braucht länger, um zu kochen.

Kannst Du Dir erklären, warum dies so ist? Schreibe bitte die Erklärung auf.

– gilt als richtig gelöst, wenn die Schüler schreiben, dass zusätzliche Wärme, Entropie, Energie... zugeführt werden muss, um die gefrorenen Erbsen aufzutauen. Es dauert dann länger, die gefrorenen Erbsen zu kochen. Die Konstanz der Temperatur beim Phasenübergang muss nicht eigens erwähnt werden, und die Schüler äußern sich hierzu auch nicht. Die Verteilungen der Antworten unterscheiden sich nicht signifikant (s. Tabelle 6).

4. Conclusio

Diskussion der Ergebnisse: Der Physikunterricht der Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs scheint in der Schulform des Gymnasiums geeignet zu sein, Konzeptwechselprozesse einzuleiten. Die große Zahl einstündig unterrichteter Karlsruher Schüler verleiht den Ergebnissen weiteres Gewicht. Die statistisch erhärtete Hypothese von der Wirksamkeit des Karlsruher Physikkurses wäre durch Schülerinterviews abzusichern. Ebenso wäre es aufschlussreich mit Pre-Post-Studien die Lernzuwächse der Karlsruher Schüler zu bestimmen.

Karlsruher Schüler scheinen ihr Wissen zur Wärmelehre in zentralen Fragen auch auf Szenarien übertragen zu können, die mit einem Phasenübergang verbunden sind, ohne dass das Thema Phasenübergang ausführlich im Unterricht behandelt wurde. Auch dieses Ergebnis ist weiter zu hinterfragen.

Weiterführende Forschungsfragen: Die Ursachen des Lernerfolges sind letztendlich kausal nicht geklärt. Es bieten sich mehrere Hypothesen an, die auch zusammenwirken können.

Übergeordnet lässt sich das Folgende sagen: Unterricht nach dem Karlsruher Physikkurs unterscheidet sich in seiner äußeren Form vermutlich nicht von traditionellem Unterricht. Die Sachstruktur jedoch scheint die Lernumgebung zu beeinflussen. In einer überwiegend frontal gestalteten Unterrichtssituation nimmt der Umfang der Lehrer-Schüler-Gespräche nach Einschätzung der Lehrer zu. Insgesamt lässt sich die statistisch erhärtete Hypothese vertreten, dass der Unterricht nach dem Karlsruher Kurs die Lernprozesse der Schüler durch eine redundante Sprache und ein verständliches Lehrbuch stützt [18]. Für die Wärmelehre lassen sich die folgenden konkreten Fragen stellen:

(a) Schüler übernehmen Erklärungen mit mengenartigen Größen gerne [26]. Zeigt sich eine vergleichbare Lernleistung, wenn man an Stelle der Entropie die Energie (oder die innere Energie oder die Wär-

meenergie) als alleinige mengenartige Größe verwendet?

(b) Inwieweit trägt die Verwendung des Terminus „Entropie“ zur Wirksamkeit des Karlsruher Kurses bei? Das Wort „Entropie“ ist in der Alltagssprache assoziativ weniger besetzt als das Wort „Energie“ oder das Wort „Wärme“. Daher ist es hinsichtlich der Wortwahl eine geeignete Bezeichnung.

(c) Welchen Einfluss hat die redundante Formulierung des Strom-Antrieb-Modells auf den Lernerfolg? Im Einzelnen: Ist es für die Lernenden eine hilfreiche Analogie? Zeigen sich die Wirkungen in der Wärmelehre nur, wenn der Karlsruher Kurs durchgängig unterrichtet wird? Oder lässt sich die Karlsruher Wärmelehre in den traditionellen Unterricht integrieren? Welche Teile aus dem Karlsruher Kurs müssen dann unterrichtet werden.

Abriss der Gesamtinterpretation des Physikunterrichts nach dem Karlsruher Physikkurs: Angesichts der Wirksamkeit des Unterrichts mit der Karlsruher Wärmelehre stellt sich zum einen die Frage, was den Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs vom traditionellen Unterricht unterscheidet, zum anderen wird nach dem Bildungswert der Entropie gefragt: Ist es wirklich notwendig, die Entropie als physikalische Größe in der Schule einzuführen? Diese beiden Fragen werden im Kontext der Evaluationsstudie über den gesamten Kurs ausführlich diskutiert [18, 27]. Hier soll nur ein kurzer Abriss gegeben werden.

Zur ersten Frage: Der Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs kann als ‚gelingendes Sprachspiel‘ interpretiert werden. Ein gelingendes Sprachspiel stützt einen Lernprozess. Beim Karlsruher Physikkurs scheint dies auf zweierlei Weisen zu geschehen: Erstens ist die Fachsprache verfügbar, sie kann erinnert werden, auch wenn sie nicht immer zur physikalischen Beschreibung von Vorgängen angewendet werden kann. Ein vergleichbarer Befund findet sich in Untersuchungen über den Zahlenerwerb von Grundschulkindern: Kinder kennen die Zahlworte und die Zahlenreihe bevor sie den Zahlbegriff entwickeln [28, 29]. Pointiert lässt sich damit sagen, dass *Nach-Sprechen* dem *Nach-Denken* vorausgeht. Hierfür sprechen auch andere Befunde der Gesamtstudie: Unterschiede zwischen Karlsruher und traditionell unterrichteten Schülern finden sich in der Elektrizitätslehre und in der Mechanik vor allem auf der sprachlichen Ebene. Karlsruher Schüler erkennen und verwenden häufiger physikalische Formulierungen als traditionell unterrichtete Schüler. Anders als in der Wärmelehre können sie Aufgaben zur Mechanik und zur Elektrizitätslehre nicht besser lösen.

Zweitens: Im Karlsruher Physikkurs können Lernende die Redundanz der Strukturen auf der sprachlichen Ebene erkennen (s. Tabelle 1). Für die Lernenden kann dies als Metabotschaft bedeuten, dass es etwas zu erkennen gibt: „Auch wenn ich, Schü-

rin oder Schüler, im Augenblick noch nicht alles verstehe, so kann ein Verstehen gelingen.'

Die Sprache der traditionellen Physik scheint diese beiden Stützfunktionen nicht aufzuweisen.

Die Frage nach dem Bildungswert der Entropie hängt eng mit der Hypothese vom gelingenden Sprachspiel im Physikunterricht zusammen. Die Position der Scientific Literacy distanziert sich von dem heimlichen oder offen vertretenem Ziel, Schüler auf ein mögliches Haupt- oder Nebenfachstudium Physik vorzubereiten. Übertragen auf die Ebene der Sprache bedeutet dies: das Sprachspiel der Physiker muss nicht das Sprachspiel des Physikunterrichts sein. Damit entstehen neue Freiräume in der Auswahl der Unterrichtsinhalte.

In der neueren Diskussion der Physikdidaktik zum Bildungswert des physikalischen Unterrichts findet

sich weiter neben dem Ziel des Erwerbs von angemessenen physikalischen Kenntnissen gleichberechtigt das Ziel, das Interesse am Fach zu fördern und die Einstellungen zum Fach positiv zu verändern [30]. Bei den Mädchen, die nach dem Karlsruher Physikkurs unterrichtet wurden, lässt sich gegenüber den traditionell unterrichteten Mädchen ein erhöhtes Selbstkonzept im Fach Physik nachweisen [18, 27]. Die Karlsruher Mädchen glauben, dass sie den Anforderungen des Physikunterrichts besser als die traditionell unterrichteten Mädchen gewachsen sind. Ihre Einstellung gegenüber dem Fach Physik hat sich positiv verändert. Damit erhält das gelingende Sprachspiel des Karlsruher Kurses seinen Bildungswert und damit auch die Entropie, die Bestandteil des Karlsruher Konzeptes ist.

5. Literatur

- [1] Falk, G. (1968). *Theoretische Physik II*. Berlin: Springer.
- [2] Callen, H.B. (1960). *Thermodynamics*. New York: Wiley.
- [3] Herrmann, F. (1998). *Der Karlsruher Physikkurs*. Köln: Aulis.
- [4] Strnad, J. (2000). On the Karlsruhe physics course. *European Journal of Physics* **21**, L33-L36.
- [5] Job, G. (1978). *Neudarstellung der Wärmelehre – die Entropie als Wärme*. Frankfurt a.M.: Akademische Verlagsgesellschaft.
- [6] Hund, F. (1969). *Grundbegriffe der Physik*. Mannheim: Bibliographisches Institut.
- [7] Callendar, H.L. (1911). The Caloric Theory of Heat and Carnot's Principle. *Proceedings of the Physical Society* **23**, 153-189.
- [8] Boccara, N. (1968). *Principes de la Thermodynamique Classiques*. Paris: Presses Universitaires de France.
- [9] Kesidou, S., Duit, R. & Glynn, S.M. (1995). Conceptual development in physics: Students' understanding of heat. In Glynn, S.M. & Duit, R. (Eds.): *Learning science in the schools: Research reforming practice*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 179-198.
- [10] Jung, W. (1976). Was ist Wärmeenergie? *Physik und Didaktik* **1**, 14-22.
- [11] Kesidou, S. & Duit, R. (1993). Student's conceptions of the second law of thermodynamics – an interpretive study. *Journal of Research in Science Teaching* **30**, 1, 85-106.
- [12] Berger, R. & Wiesner, H. (1997). Zum Verständnis grundlegender Begriffe und Phänomene der Thermodynamik bei Studierenden. Tagungsband zur Frühjahrstagung des Fachverbandes Didaktik der Physik in der DPG Berlin 1997, 736-741.
- [13] Rang, O. (1981). Physikalische Interpretation des Wortes Wärme. *physica didactica* **8**, 13-28.
- [14] Barrow, G.M. (1988). Thermodynamic Should Be Built on Energy – Not on Heat and Work. *Journal of Chemical Education* **65**, 122.
- [15] *Impulse*, Physik 1 (1993). Stuttgart: Klett.
- [16] Ma-Naim, C., Bar, V. & Finkental, M. (2001). The Initiation of Thermodynamic Theory from the Particulate Model for Preservice Teachers. In Pinto, R. & Surinach, S. (Eds.): *Teachers Proceedings of the International Conference Physics Teacher Education Beyond 2000*. Barcelona: CD Production Calidos.
- [17] *Bildungsplan* (1994). Ministerium für Kultus und Sport, Baden-Württemberg.
- [18] Starauschek, E. (2002). *Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer Evaluationsstudie*. Berlin: Logos Verlag.
- [19] Kesidou, S. & Duit, R. (1991). Wärme, Energie, Irreversibilität – Schülervorstellungen im herkömmlichen Unterricht und im Karlsruher Ansatz. *physica didactica* **18**, 2/3, 57-75.
- [20] Mayring, Ph. (1997). *Qualitative Inhaltsanalyse*. Weinheim: Beltz.
- [21] Fleischer, F. (1991). Lernschwierigkeiten bei der Behandlung von Grundbegriffen der Thermodynamik. *Physik in der Schule* **29**, 4, 140-144.
- [22] Cohen, J. (1992). A Power Primer. *Psychological Bulletin* **112**, 1, 155-159.
- [23] Lewis, E.L. & Linn, M.C. (1994). Heat energy and temperature concepts of adolescents, adults, and experts: Implications for curricular improvements. *Journal of Research in Science Teaching* **31**, 6, 657-677.
- [24] Brook, A. & Briggs, H. & Bell, B. & Driver, R. (1984). *Aspects of Secondary Students' Understanding of Heat*. Leeds: University of Leeds, Centre for Studies in Science and Mathematics Education.
- [25] Andersson, B.R. (1980). Some aspects of children's understanding of boiling point. In Archenhold, W.F., Driver, R., Orton, A. & Wood-Robinson, C. (Eds.): *Cognitive development re-*

search in science and mathematics. Proceedings of an international seminar. Leeds: University of Leeds, 252-259.

- [26] Duit, R. (1986). Wärmevorstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik/Chemie* **34**, 13, 30-33.
- [27] Starauschek, E. (2002). Ergebnisse einer Evaluationsstudie nach dem Karlsruher Physikkurs. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, **7**, 7-23.
- [28] Senftleben, H.G. (1996). Zahlenkenntnisse der

Schulanfänger. *Grundschulunterricht*, **43**, 5, 21-23.

- [29] Radatz, H., Schipper, W., Ebeling, A. & Dröge, R. (1996). *Handbuch für den Mathematikunterricht, 1. Schuljahr*. Hannover: Schrödel.
- [30] Duit, R. (2000). Konzeptwechsel und Lernen in den Naturwissenschaften in einem mehrperspektivischen Ansatz. In: Duit, R. & v. Rhöneck, Ch. (Hrsg.): *Ergebnisse fachdidaktischer und psychologischer Lehr-Lern-Forschung*. Kiel: IPN, 77-103.

6. Anhang: Klasseneffekte

Die Klasseneffekte für die Karlsruher Klassen sind der Vollständigkeit halber auf dem 10%-Signifikanzniveau angegeben. Eine Analyse für die traditionellen Klassen lohnt nicht, da die Datenbasis zu klein ist. Aus den Zahlenwerten lässt sich ablesen, dass eine traditionelle Klasse bei einigen Aufgaben signifikant schlechtere Ergebnisse erzielt als die beiden anderen Klassen (s. Tabelle A2).

Klasseneffekte bei den Karlsruher Klassen zeigen sich insbesondere bei der Aufgabe (iv) zum Wärmeempfinden. Eine Klasse weist mit 68% überdurchschnittlich häufig eine richtige Antwort auf, eine andere Klasse liegt mit 13% signifikant unter den Ergebnissen anderer Klassen.

Das Thema Phasenübergänge wurde nur in einer Karlsruher Klasse unterrichtet. Daher überraschen Klasseneffekte bei Aufgaben zu diesem Thema nicht. *Bemerkungen:* (a) Karlsruher Klassen: W1 - W7; traditionell unterrichtete Klassen: W8 - W9.

(b) Es wird der χ^2 -Test mit Kontinuitätskorrektur ($df=1$) verwendet, wenn nichts anderes angegeben ist. Dabei werden die folgenden Signifikanzniveaus angegeben: (t) $p < .10$, * $p < .05$, ** $p < .01$ und *** $p < .001$.

(c) Fehlt eine Tabelle, so sind keine signifikanten Unterschiede aufgetreten.

Ergebnisse der Aufgaben nach Klassen

Tabelle A1 Ergebnisse nach Klassen, KPK-Klassen

%	N	(i) a	(i) b	(ii)	(iii)
W1	22	95	86	100	82
W2	19	95	68	95	63
W3	19	95	79	84	74
W4	19	79	58	100	84
W5	24	88	63	100	67
W6	22	86	68	100	68
W7	30	83	60	97	73
%	(iv)	(v)	(vi) a	(vi) b	(vii)
W1	18	86	91	59	27
W2	32	74	95	58	37
W3	68	79	68	53	42
W4	26	89	95	79	32
W5	42	96	88	75	46
W6	41	73	59	32	32
W7	13	100	97	73	37

N: Zahl der Schüler einer Klasse.
Römische Ziffern: Aufgabennummern.

Tabelle A2 Ergebnisse nach Klassen, traditionell unterrichtete Klassen

%	N	(i) a	(i) b	(ii)	(iii)
W8	21	48	10	95	81
W9	27	85	56	100	81
W10	27	63	41	96	81
%	(iv)	(v)	(vi) a	(vi) a	(vii)
W8	0	95	86	52	24
W9	7	74	78	44	44
W10	7	85	100	59	63

N: Zahl der Schüler einer Klasse.
Römische Ziffern: Aufgabennummern.

Tabelle A3 Kruskal-Wallis-H-Test, KPK-Klassen

Aufgabe	χ^2	df	Asymptotische Signifikanz
(i) a	5.033	6	.540
(i) b	6.555	6	.364
(ii)	12.678	6	.048
(iii)	3.734	6	.713
(iv)	19.953	6	.003
(v)	13.660	6	.034
(vi) a	22.479	6	.001
(vi) b	14.995	6	.020
(vii)	2.362	6	.884

Bemerkung: Der χ^2 -Test ergab bei Aufgabe (ii) keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der einzelnen Klassen.

Signifikante Unterschiede zwischen den KPK-Klassen

Tabelle A4 Aufgabe (iv)

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
W1			**				
W2			(t)				
W3				*	*		***
W4							
W5							*
W6							(t)

Tabelle A5 Aufgabe (v)

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
W1							
W2							*
W3							*
W4						*	
W5						*	
W6							**

Tabelle A6 Aufgabe (vi) a

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
W1						*	
W2			(t)			*	
W3				(t)			*
W4					(t)		
W5							
W6							**

Tabelle A7 Aufgabe (vi) b

	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7
W1							
W2							
W3							
W4						*	
W5						(t)	
W6							**