

Zum Einfluss physikalischer Größen auf den Wissenserwerb beim Physikalernen in der einfachen Thermodynamik

A. Crossley, E. Starauschek

Pädagogische Hochschule Ludwigsburg
Institut für Naturwissenschaften und Technik, Physik
Reuteallee 46
71634 Ludwigsburg
crossley@ph-ludwigsburg.de

Kurzfassung

Beeinflusst die Verwendung unterschiedlicher physikalischer Größen bei einer sonst annähernd identischen Sachstruktur den Wissenserwerb beim Physikalernen? Am Beispiel der einfachen Wärmelehre wurde untersucht, ob diese bei Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Mittelstufe (N=81) zu Unterschieden beim Wissenserwerb führt. Der Zugang zur Wärmelehre erfolgt zum einen über das Größenpaar Temperatur und thermische Energie und zum anderen über die Temperatur und die Entropie. Zur Vermeidung von Konfundierungsproblematiken ist die Vergleichsuntersuchung als labornahe, auf Klassenebene experimentelle Studie angelegt. Die Instruktion erfolgt über ein siebenteiliges computergestütztes Lernprogramm. Mit Hilfe eines Lernprogramms konnten die Versuchsbedingungen, insbesondere die Lehrervariable, konstant gehalten werden. Die hier vorgestellten Daten der Pilotierung weisen auf einen möglichen Einfluss der physikalisch-begrifflichen Sachstruktur hin. Lernende mit geringem Vorwissen zur Wärmelehre zeigen bei Verwendung der Entropie einen größeren Wissenserwerb als vergleichbare Lernende, die mit der thermischen Energie instruiert wurden.

1. Einleitung

Lernprozesse sind komplexe Geschehnisse, die nicht durch einen monokausalen Faktor, z. B. die Steigerung der Motivation, erklärt werden können [1]. Verschiedene Einflussfaktoren waren bereits Gegenstand physikdidaktischer Forschung: Schülerinteressen [2], situiertes Lernen [3], selbstbestimmtes Lernen und Autonomieerleben [4], sinnstiftende Kontexte [5] und Anderes mehr. Das Anknüpfen an Alltagsvorstellungen ist dabei eine notwendige Bedingung für erfolversprechenden Physikunterricht [6,7]. Obwohl die Entwicklung von Sachstrukturen, die sich auch auf die Verwendung von physikalischen Größen bezieht, ein zentraler Bestandteil der Physikdidaktik ist, sind Studien zur Wirkung der Sachstruktur auf den Wissenserwerb, unter Berücksichtigung der Alltagsvorstellungen, innerhalb des komplexen Lehr-Lern-Geschehens in der empirischen physikdidaktischen Forschung bislang eher selten. Deshalb wurde untersucht, ob der physikalisch-begriffliche Aspekt der Sachstruktur, bei einem sonst annähernd identischen Unterricht, einen Einfluss auf den Wissenserwerb hat oder nicht.

2. Definition: Der physikalisch-begriffliche Aspekt der Sachstruktur

Was genau ist unter einer Sachstruktur beim Physikalernen zu verstehen? Ein Modell zu deren Präzisierung ist die Didaktische Rekonstruktion [32]. Die Didaktische Rekonstruktion beschreibt das Wechselspiel zwischen fachlicher Klärung und Elementari-

sierung, Erfassung der Schülerperspektiven und einer didaktischen Strukturierung des Unterrichts. Die fachliche Klärung, die zum Beispiel über die Analyse von Lehrbüchern erfolgen kann, führt zur *physikalischen Sachstruktur* der Inhalte. Die physikalische Sachstruktur wird in einem zweiten Schritt – der Elementarisierung – auf für den Unterricht relevante, physikalische Inhalte reduziert. Unter Berücksichtigung von Schülervorstellungen wird daraus in einem dritten Schritt eine Sachstruktur für den Unterricht entwickelt. Diese Sachstruktur des Unterrichts kann in Abgrenzung zur physikalischen Sachstruktur, in Anlehnung an Müller und Duit [8], auch als *unterrichtliche* oder *instruktionale Sachstruktur* bezeichnet werden: Welche Begriffe, Gesetze, Beispiele... werden wie und an welcher Stelle des Unterrichtsgangs eingesetzt?¹

Dass es für gleiche Themen im Schulunterricht verschiedene unterrichtliche Sachstrukturen gibt, ist evident. Allerdings ist auch eine physikalische Sachstruktur keineswegs eindeutig. So lässt sich z.B. ein physikalischer Sachverhalt oder ein Phänomenbereich mit unterschiedlichen physikalischen Größen beschreiben. Diese Beschreibungen sind physikalisch gleichwertig, da sie sich in der mathematischen Darstellung in einander überführen lassen. Die Freiheit der Wahl der physikalischen Größen soll als physikalisch-begrifflicher Aspekt der Sachstruktur bezeichnet werden [33]. Eine Unterrichtseinheit

¹ Weiter kann zwischen geplanter, idealtypischer und tatsächlich beobachtbarer Sachstruktur unterschieden werden.

kann sich also in der Verwendung der physikalischen Größen unterscheiden, in einem extremen Fall nur durch diese. Die unterrichtliche Sachstruktur könnte dabei gleich bleiben. Dies ist meist nur näherungsweise möglich, da der physikalisch-begriffliche Aspekt der Sachstruktur auch die unterrichtliche Sachstruktur beeinflusst.

3. Stand der Forschung und Entwicklung

Der Forschungsstand zur Wirkung des physikalisch-begrifflichen Aspekts der Sachstruktur auf den Wissenserwerb beim Physiklernen ist, wie oben schon angedeutet, eher dünn. Herdt und Wiesner führten Vergleichsuntersuchungen zur Optik durch [9,10,11], Bader zur Wärmelehre [12] und Gleixner zur Elektrizitätslehre [14]. Starauschek evaluierte den Karlsruher Physikkurs im Vergleich zu ‚traditionellem‘ Physikunterricht [13].

Die Ergebnisse dieser Arbeiten deuten auf einen Einfluss der Sachstrukturen und insbesondere den physikalisch-begrifflichen Aspekt einer Sachstruktur auf den Wissenserwerb hin. Allerdings weisen sie Konfundierungsproblematiken auf. Oft wurde der Einfluss der Lehrperson nur unzureichend kontrolliert. Eine Untersuchung zum Einfluss des physikalisch-begrifflichen Aspekts einer Sachstruktur auf den Wissenserwerb beim Physiklernen, die versucht, Konfundierungsproblematiken zu vermeiden, wurde bislang noch nicht durchgeführt. Es handelt sich um die grundlegende Frage, ob die Verwendung unterschiedlicher physikalischer Größen, bei einer sonst annähernd identischen unterrichtlichen Sachstruktur, einen Einfluss auf das Physiklernen hat oder nicht. Ob sich dies für alle Teilgebiete oder Phänomenbereiche der Physik realisieren lässt, kann bezweifelt werden. Für die Wärmelehre scheint dies in guter Näherung möglich zu sein.

In der Regel werden bei der Beschreibung von Prozessen und Phänomenen in der Thermodynamik, neben der Temperatur, die physikalischen Größen Wärme bzw. Wärmeenergie bzw. thermische Energie, Wärmemenge und innere Energie verwendet. Alternativ können thermische Phänomene aber auch mit dem Größenpaar Temperatur und Entropie beschrieben werden.²

Lernende deuten neue physikalische Größen mit ihrem Vorwissen. Die physikalisch äquivalenten physikalischen Sachstrukturen bieten Lernenden unterschiedliche Anknüpfungsmechanismen. In der Alltagssprache wird unter Wärme der Zustand des Warmseins verstanden [18], das Gegenteil von Kälte bzw. der obere Teil der Temperaturskala [19] oder auch einfach Energie. Die extensiven, mengenartigen Aspekte der Wärme sind ebenfalls in der Alltagssprache angelegt; sie führen aber eher zu der in der Schule wenig gebräuchlichen Größe Entropie als zur Energie. Der Alltagsbegriff der Wärme sollte

daher zum einen beim Physiklernen in zwei physikalische Größen umgedeutet werden: eine Größe, welche die intensiven Aspekte der Alltagswärme beschreibt, die Temperatur, und eine Größe, welche deren extensiven Aspekte fasst. Die Umdeutung kann in einem ersten didaktischen Schritt zur thermischen Energie³, aber auch zur Entropie vorgenommen werden. Eine konsequente extensive Deutung der Alltagswärme führt zur Entropie. Dies soll im Augenblick nicht weiter stören.

Bei der Umdeutung der energetischen Aspekte der Alltagswärme besteht ein Weg darin, das Wort *Wärme* beim Lernprozess zu vermeiden und stattdessen das Wort *thermische Energie* zu verwenden [20]. In der Umdeutung zur *Entropie* werden Wärme und Entropie synonym verwendet: Entropie ist die Alltagswärme [21].

Ein Unterrichtsgang zur Wärmelehre, der die Entropie verwendet, liegt mit dem Karlsruher Physikkurs vor [22]. Im Folgenden wird daher von der „energetisch-akalorischen Wärmelehre“ und der „entropischen Wärmelehre“ gesprochen.

Starauschek kommt in seiner Evaluationsuntersuchung zur Wärmelehre nach dem Karlsruher Kurs zu dem Schluss, dass die Schülerinnen und Schüler, die nach der entropischen Wärmelehre unterrichtet wurden, bessere Ergebnisse erzielen, als die traditionell unterrichteten Schülerinnen und Schüler. Des Weiteren weist Starauschek darauf hin, dass dieser Effekt auf den physikalisch-begrifflichen Aspekt der Sachstruktur zurückzuführen sein könnte [12].

Die Frage nach dem Einfluss der physikalischen Größen auf das Physiklernen lässt sich damit für die Wärmelehre präzisieren:

Führt die Verwendung des physikalischen Größenpaares Entropie und Temperatur zu einem höheren Wissenszuwachs, als die Verwendung des Größenpaares thermische Energie und Temperatur, wenn die unterrichtliche Sachstruktur annähernd gleich ist?

Wie bislang angedeutet, können beim Lernprozess unterschiedliche Assoziationsmechanismen zum Tragen kommen. Das Wort Energie trägt einen weiten semantischen Hof um sich. Das Wort Entropie ist so gut wie unbekannt. Um dies zu zeigen wurde Schülerinnen und Schülern (N=800) in den Klassenstufen 6, 8 und 9 ein Fragebogen zur thermischen Energie und zur Entropie vorgelegt. Darin wurden zwei Fragen zur thermischen Energie und zur Entropie gestellt:

1. Kennst Du den Begriff thermische Energie (Entropie)?
2. Wenn ja, dann erkläre, was Du darunter verstehst. Wenn nicht, beschreibe bitte kurz, was Du Dir darunter vorstellen könntest.

Unabhängig von der Schulart geben über 50% der Befragten aus Klassenstufe 8 und 9 an, den Begriff thermische Energie zu kennen oder schon einmal davon gehört zu haben. Ein Teil der Erklärungen

² An dieser Stelle wird nicht auf die Feinheiten der physikalischen Begriffsbildung eingegangen, in der zwischen Prozess- und Zustandsgrößen unterschieden wird.

³ Eigentlich nur Energie.

war physikalisch akzeptabel. Bei der Entropie zeigt sich ein anderes Bild: Nur am Gymnasium und ausschließlich in der Klassenstufe 9 gaben etwa 10% der Befragten an, den Entropiebegriff zu kennen. Eine Erklärung, was Entropie sei, konnte niemand abgeben. Die Assoziationen bzw. Assoziationshöfe der Schülerinnen und Schüler zu den beiden physikalischen Größen thermische Energie und Entropie unterscheiden sich, wie erwartet, deutlich. Die Entropie ist nicht Teil der Alltagssprache, die thermische Energie sehr wohl. Somit bieten diese unterschiedlichen physikalischen Größen für Novizen unterschiedliche Möglichkeiten, an ihr Vorwissen und damit an ihre vorhandenen mentalen Repräsentationen anzuknüpfen.

Ein größerer Wissenszuwachs könnte damit begründet werden, dass eine Umdeutung von Wärme in die Entropie deshalb störungsfreier gelingt, da zur Entropie keine Alltagsvorstellungen vorhanden sind.

4. Untersuchungsdesign, Stichprobe und Erhebungsumstände

Die Untersuchung ist auf Klassenebene als experimentelle, labornahe Studie mit Pre-, Post- und Follow-Up-Test angelegt. Durch den Einsatz eines Lernprogramms wird versucht, im schulischen Umfeld eine laborähnliche Situation herzustellen, die eine Kontrolle möglicher Einflussfaktoren, insbesondere der Lehrervariable, erlaubt und den Einfluss von Störvariablen minimiert. Die Sachstruktur mit den Ausprägungen entropische und energetisch-akalorische Wärmelehre, sowie das themenbezogene Vorwissen zur Wärmelehre mit den Ausprägungen hoch und niedrig, bilden die unabhängigen Variablen. Die abhängige Variable ist der Wissenszuwachs. Die Differenzierung des Vorwissens wurde mittels *split half* mit Hilfe der Pre-Test-Ergebnisse vorgenommen. Daraus ergibt sich das in Tabelle 1 abgebildete 2x2-Design, das varianzanalytisch ausgewertet wird.

Außerdem wurden mit dem Pre-Test folgende Kontrollvariablen erhoben:

1. Zwei Subskalen des KFT 4-12 Intelligenztests (je eine Subskala zur verbalen und nonverbalen Intelligenz) [29]
2. Die Noten im Fach Deutsch, Mathematik, Physik
3. Allgemeines Vorwissen zur Physik (TIMSS-

Items)

4. Das fachspezifische Selbstkonzept [27]
5. Die fachspezifische Selbstwirksamkeitserwartung [28]
6. Alter und Geschlecht
7. Das Interesse an Naturwissenschaften

Während der Instruktion wurden außerdem die Bearbeitungszeit über Logfiles, die intrinsische Motivation und das Interesse situativ über Kurzskalen erhoben [30]. Im Untersuchungszeitraum von September 2009 bis Mai 2010 fand die Hauptuntersuchung statt, an der insgesamt N=180 Schülerinnen und Schüler aus der gymnasialen Mittelstufe und der Realschule teilnahmen. Die Daten der Hauptuntersuchung werden zurzeit ausgewertet. Die hier vorgestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Pilotierungsdaten, die im Juni und Juli 2009 erhoben wurden. Dabei handelt es sich um Daten von Schülerinnen und Schülern des Gymnasiums (N=81), hauptsächlich aus der neunten Klassenstufe.

Die Instruktion erfolgte in drei Doppelstunden, in denen jeweils zwei Lernprogrammteile, in der ersten Unterrichtsstunde zusätzlich eine Einleitung, bearbeitet wurden. Im Anschluss an die Bearbeitung der Lernprogrammteile hatten die Schülerinnen und Schüler die Gelegenheit einem Betreuer Fragen zu stellen. Diese wurden entweder sofort beantwortet oder notiert. Die sofortigen Antworten erfolgten standardisiert. Sie waren in einer Voruntersuchung entwickelt worden. Die Antworten auf notierte Fragen werden in der folgenden Unterrichtsstunde gegeben, sodass eine Konstanz in den Antworten über alle Versuchsgruppen gewährleistet werden kann. Anschließend bearbeiteten die Schülerinnen und Schüler schriftlich standardisierte Übungsaufgaben zu den einzelnen Lernprogrammteilen. Die Lösungen konnten ebenfalls ohne viele Kommentare mit Standardlösungen verglichen werden (OHP-Präsentation). Auch an dieser Stelle war es möglich dem Betreuer Fragen zu stellen, die wiederum standardisiert bzw. zeitversetzt beantwortet wurden.

5. Das Lernprogramm

Um den Einfluss möglicher Störvariablen zu minimieren, erfolgte die Instruktion über ein linear strukturiertes, computergestütztes Lernprogramm, das von den Schülerinnen und Schülern an Einzelar-

| | | Sachstruktur | |
|---------------------------|--|--|--|
| Themenbezogenes Vorwissen | | Entropische Wärmelehre Vorwissen: Hoch | Energetisch-akalorische Wärmelehre Vorwissen: Hoch |
| | | Entropische Wärmelehre Vorwissen: Niedrig | Energetisch-akalorische Wärmelehre Vorwissen: Niedrig |

Tab.1: Untersuchungsdesign

beitsplätzen verwendet wurde. Das entwickelte Lernprogramm besteht aus sieben Programmteilen und liegt in zwei Varianten vor. Eine Version verwendet die physikalische Größe Entropie, die andere Version die thermische Energie. In Art, Umfang und Inhalt sind die Programmteile beider Versionen weitestgehend identisch. Jeder Programmteil besteht aus ca. dreißig „Seiten“ und erfordert eine Bearbeitungszeit von 15 bis 20 Minuten. Die einzelnen „Seiten“ der Lernprogrammteile enthalten bebilderte Texte, sogenannte Bildtexte, die dem Multimedia-Prinzip folgen [23]. Bei den verwendeten Bildern handelt es sich um kolorierte Handzeichnungen, die einen niedrigen Komplexitätsgrad aufweisen [24]. Der Umgang und die Navigation des Lernprogramms sind bewusst einfach gehalten. Auf jeder Seite des Lernprogramms sehen die Schülerinnen und Schüler ein Bild und hören dazu einen gesprochenen Text. Hierbei wird der Modalitätseffekt ausgenutzt [23]. Anschließend besteht die Möglichkeit, den Text erneut anzuhören, den Text zu lesen oder mit der nächsten Seite fortzufahren. Es können somit unterschiedliche Lernwege beschriftet und die Lernzeit individuell gewählt werden, wodurch ein selbstgesteuerter Lernprozess ermöglicht wird.

Mit einer Ausnahme weisen die einzelnen Lernprogrammteile beider Programmversionen gleiche Textoberflächenmerkmale auf. Sie unterscheiden sich nicht hinsichtlich der mittleren Satzlänge, des mittleren Anteils der Fachbegriffe, des mittleren Anteils der drei- und mehrsilbigen Worte, dem Grad der persönlichen Anrede und dem Grad der lokalen und globalen Textkohärenz. Lediglich der erste Programmteil, die Einleitung, unterscheidet sich deutlich von den anderen. Dieser Umstand liegt darin begründet, dass zur Einführung der thermischen Energie die Energie und ihre Energieformen erklärt werden muss. Dies ist bei der Entropie nicht notwendig.⁴ Im Anschluss an die Einleitung werden folgende Themen erklärt:

- Thermische Energie/Entropie und Temperatur
- Temperaturlausgleichsvorgänge
- Die Wärmepumpe
- Die absolute Temperatur
- Irreversible Prozesse
- Wärmeleitung und Temperaturempfinden

6. Testinstrumente

Der Fragebogen besteht aus insgesamt dreißig Items. Die Items sind erprobt [17,25,26]. Einige zusätzliche Items wurden konstruiert. Um bei beiden Treatmentgruppen einen gemeinsamen Pre-Test verwenden zu können, wurden zum einen, wenn möglich, offene Antwortformate gewählt. Zum anderen wurden Multiple-Choice-Items eingesetzt, in denen im Pre-Test das Wort „Wärme“ steht, das im Post-Test

⁴ Die Einleitung zur entropischen Wärmelehre besteht aus drei Bildtexten und weniger als zehn Sätzen, sodass eine aussagekräftige sprachstatistische Analyse nicht möglich ist.

durch die Worte „Entropie“ bzw. „thermische Energie“ ersetzt wird. Dieses Verfahren ist im Sinne der Forschungsfrage vertretbar, da überprüft werden soll, ob die Umdeutung des alltagssprachlichen Wortes Wärme in die physikalischen Größen zu unterschiedlichen Lernzuwächsen führt.

Aus den dreißig Items konnte bislang eine reliable Skala mit sieben Items gebildet werden (Pre-Test: $\alpha=.582$, Post-Test: $\alpha=.772$), in der die groben Lernziele des Lernprogramms mit je einem Item abgebildet werden.

7. Ergebnisse der Pilotierung

An der Pilotierung waren vier neunte Klassen des Gymnasiums beteiligt. Eine Versuchsgruppe wurde zusätzlich mit Schülern der achten Klassenstufe ergänzt. Die Ergebnisse von Pre- und Post-Test sowie der Wissenszuwachs sind in Abbildung 1 dargestellt. Als erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass es in beiden Treatment-Gruppen ein Wissenszuwachs zu verzeichnen gibt, was auf die Wirksamkeit der Intervention hinweist. Des Weiteren treten zwischen den Schülergruppen, die mit den unterschiedlichen Lernprogrammen zur energetisch-akalorischen und zur entropischen Wärmelehre gearbeitet haben, keine signifikanten Unterschiede beim Wissenszuwachs auf.

Der *spilt half* nach dem Vorwissen (Pre-Test) unterteilt die beiden Schülergruppen zusätzlich in zwei Teilgruppen, sodass insgesamt vier Gruppen vorliegen (vgl. Tab. 1). Dadurch ergibt sich die folgende Zellbesetzung:

$$N_{\text{entropisch, hoch}} = 18, N_{\text{entropisch, niedrig}} = 22$$

$$N_{\text{energetisch, hoch}} = 14, N_{\text{energetisch, niedrig}} = 27,$$

Abbildung 2 zeigt die Wissenszuwächse unter Berücksichtigung des Vorwissens. Bei hohem Vorwissen erzielt die Gruppe, die mit der energetisch-akalorischen Wärmelehre instruiert wurde, einen höheren Lernzuwachs, als die Gruppe mit der entropischen Wärmelehre. Dieser Unterschied ist allerdings statistisch nicht signifikant. Eine mögliche Erklärung zeigt ein Blick auf die absoluten Werte:

Entropische Wärmelehre, hohes Vorwissen:
Pre-Test: 5,04 Post-Test: 6,39

Energetisch-akalorische Wärmelehre, hohes Vorwissen:

Pre-Test: 4,53 Post-Test: 6,48

Es liegt ein Deckeneffekt vor. Die Daten für die Lernenden mit hohem Vorwissen lassen sich somit nicht sinnvoll interpretieren.

Beim Vergleich der Schülerinnen und Schüler mit niedrigem Vorwissen ist eine Aussage möglich.

Entropische Wärmelehre, niedriges Vorwissen:

Pre-Test: 2,56 Post-Test: 5,94

Energetisch-akalorische Wärmelehre, niedriges Vorwissen:

Pre-Test: 2,00 Post-Test: 4,37

Eine univariate Varianzanalyse zwischen den Treatmentgruppen mit niedrigem Vorwissen zeigt, dass die Schülergruppe, die mit dem Lernprogramm

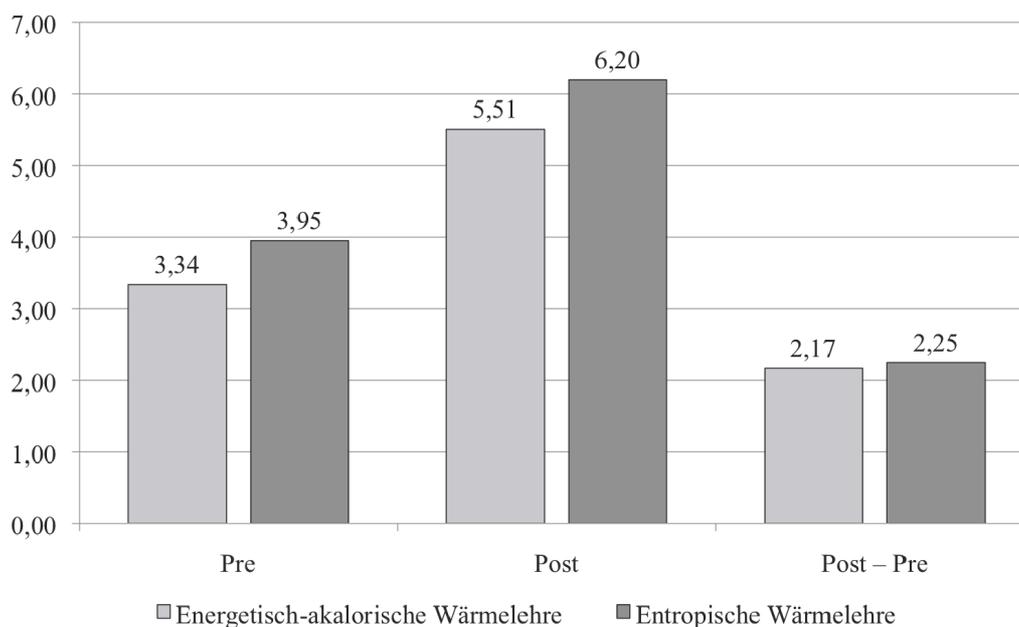


Abb. 1: Ergebnisse des Wissenszuwachs zur Wärmelehre, siebenstufige Skala

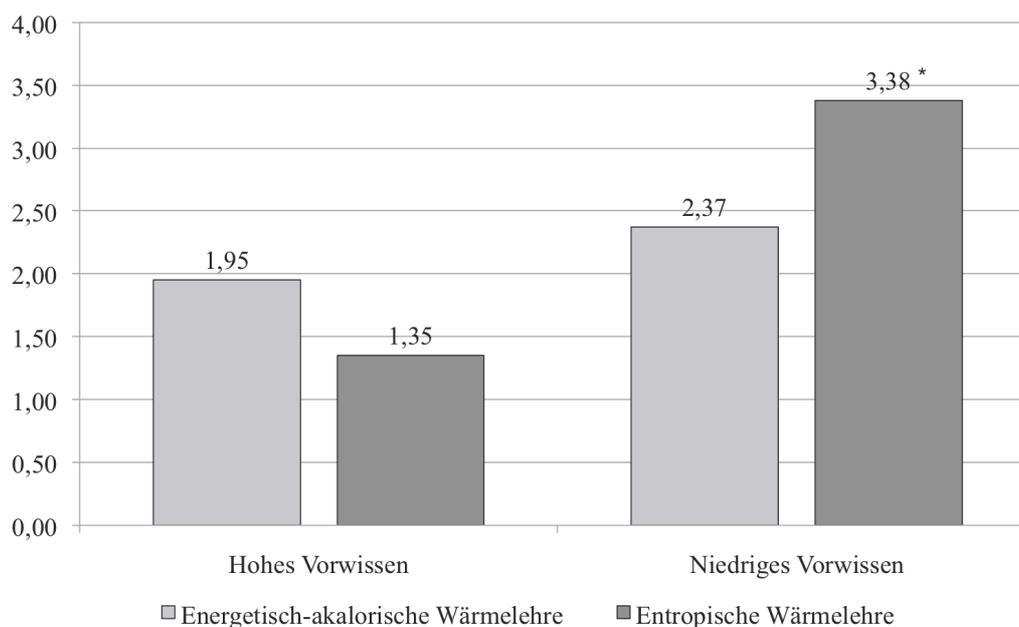


Abb. 2: Wissenszuwächse in der Wärmelehre differenziert nach dem Vorwissen

zur entropischen Wärmelehre arbeitet, einen signifikant höheren Lernzuwachs aufweist, als die Gruppe, die mit der energetisch-akalorischen Wärmelehre instruiert wird ($p=.020$, $\eta^2=.151$). Die Pilotierungsdaten bestätigen damit für Schülerinnen und Schüler mit geringem Vorwissen die Annahme, dass die entropische Wärmelehre zu höheren Lernzuwächsen führt.

8. Fazit

Wird das Vorwissen als moderierende Variable berücksichtigt, so zeigt sich ein Einfluss des physikalisch-begrifflichen Aspekts der Sachstruktur auf den Wissenserwerb beim Physiklernen in der einfachen

Wärmelehre. Dieses Ergebnis ist mit aller Vorsicht zu betrachten. Es bleibt abzuwarten, ob sich dieses vorläufige Ergebnis auch in der Hauptstudie und umfangreicheren Skalen zeigt.

9. Literatur

- [1] Duit, R. (2006): Schülervorstellungen und Lernen von Physik – Forschungsergebnisse und die Realität im Unterricht. In Didaktik in Forschung und Praxis, Band 29. Hamburg, Verlag Dr. Kovac.
- [2] Hoffmann, L., Häußler, P., Lehrke, M. (1998): Die IPN-Interessensstudie. Kiel, IPN.

- [3] Gerstmaier, J., Mandl, H. (1995): Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41, 6, S. 867-888.
- [4] Deci, E. L., Ryan, R. M. (1993): Die Selbstbestimmungstheorie der Motivation und ihre Bedeutung für die Pädagogik. *Zeitschrift für Pädagogik*, Nr. 2, S. 223-238.
- [5] Muckenfuß, H. (1995): Lernen im sinnstiftenden Kontext. Entwurf einer zeitgemäßen Didaktik des Physikunterrichts. Berlin, Cornelsen.
- [6] Duit, R. (1994): An Schülervorstellungen anknüpfend Physik lehren und lernen. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik*, 42(22), S. 4-6.
- [7] Duit, R. (2004a): Schülervorstellungen und Lernen von Physik. Piko-Brief Nr. 1. Kiel, IPN.
- [8] Duit, R. (2004b): Didaktische Rekonstruktion. Piko-Brief Nr. 2. Kiel, IPN.
- [9] Herdt, D. (1990): Einführung in die elementare Optik – Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrgangs. Essen, Westarp.
- [10] Wiesner, H. (1994): Ein neuer Optikkurs für die Sekundarstufe I, der sich an Lernschwierigkeiten und Schülervorstellungen orientiert. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 1994/22, S. 7-15.
- [11] Wiesner, H. (1995): Physikunterricht – an Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten orientieren. *Unterrichtswissenschaft. Zeitschrift für Lernforschung* 2, S. 127-144.
- [12] Starauschek, E. (2001): Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer Evaluationsstudie. Berlin, Logos Verlag.
- [13] Bader, M. (2001): Vergleichende Untersuchung eines neuen Lehrganges: Einführung in die mechanische Energie und Wärmelehre, Dissertation, LMU München.
- [14] Gleixner, Ch. (1998): Einleuchtende Elektrizitätslehre mit Potential - Untersuchungen zu Lernprozessen in der elementaren Elektrizitätslehre, Dissertation, LMU München.
- [15] Kircher, E., Schneider, W. (2003). *Physikdidaktik in der Praxis*. Springer, Berlin.
- [16] Duit, R. (1999): Die physikalische Sicht von Wärme und Energie verstehen. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 1999/53, S. 10-12.
- [17] Kesidou, S. (1990): Schülervorstellungen zur Irreversibilität. Kiel, IPN.
- [18] Duden (2006): *Deutsches Universalwörterbuch*. 6. Auflage, Mannheim, Dudenverlag.
- [19] Duit, R. (1986): Wärmeverstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik* 1986/13, S. 30-33.
- [20] Muckenfuß, H., Nordmeier, V. (2006): *Interaktiv Physik – Naturwissenschaftliches Arbeiten*, Band 1 und 2. Berlin, Cornelsen Verlag.
- [21] Job, G. (1972): *Neudarstellung der Wärmelehre – die Entropie als Wärme*. Frankfurt am Main, Akademische Verlagsgesellschaft.
- [22] Herrmann, F. (1998): *Der Karlsruher Physikkurs*. Köln, Aulis Verlag.
- [23] Mayer, R. E. (2001): *Multimedia Learning*. Cambridge, University Press.
- [24] Ballstaedt, S. (1997): *Wissensvermittlung – Die Gestaltung von Lernmaterial*. Weinheim, Beltz Verlag.
- [25] Starauschek, E. (2002): *Wärmelehre nach dem Karlsruher Physikkurs – Ergebnisse einer empirischen Studie*. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, Nr. 1, S. 12-18.
- [26] Einhaus E. (2007): *Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre – Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenz*. Berlin, Logos Verlag.
- [27] Helmke, A. (1992): *Determinanten der Schulleistung: Forschungsstand und Forschungsdefizit*. In G. Nold (Hrsg.), *Lernbedingungen und Lernstrategien*. Tübingen, Narr, S. 23-34.
- [28] Jerusalem, M., Satow, L. (1999): *Schulbezogene Selbstwirksamkeitserwartung*. In R. Schwarzer & M. Jerusalem (Hrsg.), *Skalen zur Erfassung von Lehrer- und Schülermerkmalen, Dokumentation der psychometrischen Verfahren im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Modellversuches 'Selbstwirksame Schule'*. Berlin, FU Berlin, S. 15-16.
- [29] Heller, K. A., Perleth, Ch. (2000): *Kognitiver Fähigkeitstest für 4.-12. Klassen, Revision (KFT 4-12+R)*. Göttingen, Hogrefe.
- [30] Berger, R., Hänze, M. (2004): *Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II – Einfluss auf Motivation, Lernen und Leistung*. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 10, S. 205-219.
- [31] Helmke, A. (2003): *Unterrichtsqualität*. Seelze, Kallmeyer.
- [32] Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H. & Komorek, M. (1997): *Das Modell der didaktischen Rekonstruktion – Ein theoretischer Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung*. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 3, S. 3-18.
- [33] Starauschek, E. (2010, im Druck): *Hat die physikalische Sachstruktur einen Einfluss auf das Lernen von Physik? Beitrag zum Tagungsband der GFD-Tagung 2009*. Berlin.