

Wärmedämmung

Ein experimenteller Zugang

Verfasserin: Dr. habil. CHRISTEL KUTTER, Technische Universität Dresden, Institut für Angewandte Physik und Didaktik, Mommsenstraße 13, 01062 Dresden

Während sich Wirtschaft und Industrie darum bemühen, für jeden Zweck die am besten geeigneten wärmedämmenden Materialien zu suchen und einzusetzen, geht es in der Bevölkerung und mehr noch in der Schule um das Verständnis für solche Maßnahmen aus ökonomischer und ökologischer Sicht auf der Grundlage gesicherten Wissens über die Energieübertragung. Im vorliegenden Artikel geht es um Möglichkeiten der Festigung von Wissen zur Energieübertragung durch ein Praktikumsexperiment zur Wärmedämmung und um Möglichkeiten der Gestaltung eines solchen Experimentes im Physikunterricht.

1 Einführung

Der Mensch lebt, indem er Energie umsetzt. Und über das für sein Überleben notwendige Mindestmaß hinaus setzt er Energie ein, um die Bedingungen seines Lebens zu verbessern und seinen Lebensstandard zu erhöhen. Fossile Energieträger stehen nicht unbegrenzt zur Verfügung, deshalb musste man sich schon früh darauf besinnen, andere Möglichkeiten der Energiegewinnung zu ersinnen und zu nutzen. Man hat die Forschung im Hinblick auf regenerative Energieträger forciert und immer wieder Überlegungen angestellt, inwieweit die eingesetzte Energie noch besser genutzt werden kann. Rationeller Energieeinsatz hinsichtlich Wärmeübertragung heißt einerseits, eine möglichst gute Wärmeübertragung zu gewährleisten, andererseits gilt es, die Übertragung von Wärme möglichst zu unterbinden oder zumindest herabzusetzen.

Wärmedämmende Maßnahmen dienen in erster Linie wirtschaftlichen Zwecken, aber sie sind auch unter ökologischer Sicht unbedingt notwendig, denn sie sind ein ganz wesentlicher Beitrag zur Verringerung des Treibhauseffektes, des sauren Regens, des Ozonloches, der Verunreinigung von Wasser und Luft.

Wirtschaft, Industrie und jeder einzelne sind daher angehalten, die Energie rationell einzusetzen und konkrete Sparmaßnahmen abzuleiten, zumindest aber den energiesparenden Maßnahmen Verständnis entgegenzubringen.

2 Das Thema Wärmedämmung und seine Behandlung im Physikunterricht

Wärmeübertragung und Wärmedämmung sind Themen, die im Physikunterricht fast aller Bundesländer sowohl in Gymnasien als auch in Mittelschulen behandelt werden. Das liegt sicher nicht nur darin begründet, dass sich bei diesen Inhalten viele Begriffe, wie Wärme, Energie, Energieumwandlung, Wärmeleitung und Gesetze, wie die Berechnungsgleichung für Wärme und der Energieerhaltungssatz festigen und damit anwenden lassen, son-

dern auch darin, dass technisch die Wärmeübertragung und Wärmedämmung als Mittel des rationellen Energieeinsatzes sehr bedeutsam sind, und dass diese Themen geeignet sind, Einsichten in Zusammenhänge zu fördern und Einflüsse auf Verhaltensweisen zu ermöglichen. Das Thema wird in den Lehrplänen an verschiedenen Stellen eingebunden. Zum einen im Anschluss an die Arten der Wärmeübertragung (dabei muss der Energiebegriff noch nicht vorhanden sein), zum zweiten im Zusammenhang mit dem Begriff thermische Energie, Wirkungsgrad und zum dritten im Zusammenhang mit integrativen Themen wie beispielsweise Energie – Umwelt – Mensch.

Aus den Lehrplänen für Physik ist erkennbar, dass das Thema auch mehrfach, aber selbstverständlich auf unterschiedlichem Niveau behandelt wird. Das ist zu begrüßen, denn eine einmalige Behandlung eines physikalischen Inhalts trägt nicht zu gesicherten und anwendungsbereiten Kenntnissen und noch viel weniger zu Einsichten und positiven Verhaltensweisen bei. Die physikalischen Kenntnisse in immer neuen Zusammenhängen anzuwenden und Folgerungen hinsichtlich unterschiedlicher Merkmale ableiten zu lassen, sind Maßnahmen, die Physikverständnis fördern und Zusammenhänge verständlich werden lassen.

Eine Möglichkeit, das Thema zu durchdringen, ist mit einem Praktikumsexperiment gegeben.

Im Folgenden soll ein solches Experiment vorgestellt werden. Der Einsatz wird für die oberen Klassen der Sekundarstufe I vorgeschlagen. In diesen Klassenstufen ist ohnehin oftmals ein Praktikum empfohlen oder gar obligatorisch.

Folgende Ziele können mit einem Praktikumsexperiment zur Wärmedämmung angestrebt werden:

Die Schüler sollen erkennen, dass unterschiedliche Materialien die Wärme unterschiedlich gut leiten. Aus den aufgenommenen Abkühlungskurven für Wasser in unterschiedlich gedämmten Behältern können sie ablesen, welche Stoffe die Wärme gut und weniger gut leiten. Sie können die pro Zeiteinheit »verlustig« gegangene Wärme berechnen und Vergleiche hinsichtlich der Materialien anstellen; die Schüler sollen erkennen, dass die Dicke der

Dämmschicht einen Einfluss auf die Wärmedämmung hat. Je dicker die Dämmschicht, desto besser die Wärmedämmung. Ab einer bestimmten Schichtdicke lohnt die Wärmedämmung nicht mehr. Eine übertriebene Wärmedämmung würde zu einer Materialvergeudung führen.

Die Schüler erkennen, dass die Dämmschicht nicht von Fugen, Spalten etc. unterbrochen werden darf, da die Wärme an diesen Stellen leichter nach außen dringen kann (Wärmebrücken): Die Schüler sollen erkennen, dass die Temperatur in einem Behälter (Haus) erhalten bleibt, wenn soviel Wärme zugeführt wird, wie durch schlechte Wärmedämmung – durch Wärmeleitung, Wärmeströmung und Wärmestrahlung – abgegeben wird. Je besser die Wärmedämmung, desto geringer muss die Wärme sein, die zugeführt werden muss, um die Temperatur in einem Behälter zu erhalten. Die Schüler können einige Folgerungen ableiten, welchen Nutzen wärmedämmende Maßnahmen haben: Sie erkennen, dass bei der Bilanzierung des Nutzens der wärmedämmenden Maßnahmen beachtet werden muss, dass für die Herstellung des Dämmmaterials Energie, Rohstoffe und damit Kosten notwendig sind, und dass bei der Bilanzierung des ökologischen Nutzens die bei der Herstellung des Dämmmaterials entstehenden Schadstoffe in die Rechnung einbezogen werden müssen.

Die Schüler können die Experimente selbstständig aufbauen und unter Einsatz praxisbedeutsamer Dämmmaterialien entsprechend den Bedingungen selbstständig variieren bzw. weiter entwickeln. Sie können mit unterschiedlichen Temperaturmessgeräten umgehen und diese zweckmäßig einsetzen: Sie erkennen, dass mit unterschiedlichen Messverfahren gleiche Aussagen zur Qualität der Wärmedämmung, zur Energiebilanz beim Einsatz unterschiedlicher Dämmmaterialien gewonnen werden können.

3 Prinzipielle experimentelle Möglichkeiten für ein Praktikumsexperiment

Für die Untersuchung der Prozesse der Wärmedämmung haben Lehrmittelfirmen Experimentiergeräte entwickelt. Diese liefern zuverlässige Aussagen über wärmedämmende Materialien. Solche Geräte sind in der Regel jedoch für Demonstrationsexperimente (selten auch für die Hand des Schülers) entwickelt worden und damit nicht immer einfach in der Handhabung. Außerdem sind industriell gefertigte Experimentiergeräte fast immer kostenaufwendig.

Anliegen unserer Überlegungen ist es, Experimente zur Wärmedämmung mit einfachen Mitteln für Schüler zu entwickeln. Die Experimente sollen von den Schülern schnell und einfach aufgebaut und gehandhabt werden können und sichere Ergebnisse liefern. Die Experimente sollen bezüglich einzusetzender Dämmmaterialien leicht und ohne Zeitaufwand durch die Schüler variierbar und sicher sein. Über die Experimente sollen gleichzeitig unterschiedliche Messmethoden realisiert werden können, die gleiche Aussagen über die Qualität der Wärmedämmung zulassen. Die Experimente sollen parallel von mehreren Schülergruppen durchgeführt werden können, und sie müssen Schlussfolgerungen hinsichtlich wirtschaftlichen und ökologischen Einsatzes zulassen. Nicht

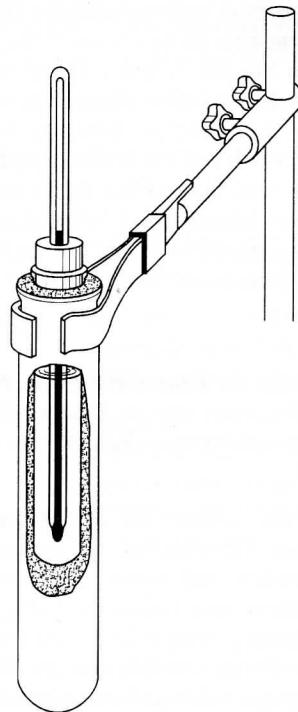


Abb. 1. Aufnahme von Abkühlungskurven (Messverfahren 1)

Zeit in min	2	4	6	8	10
Temperatur in °C	54	53	52,5	52	52

Tab. 1. Temperatur-Zeit-Daten für das Dämmmaterial Sägespäne

zuletzt sollen die Experimentiermaterialien (auch Dämmstoffe unterschiedlicher Dicke) für den Lehrer leicht und kostengünstig beschafft werden können.

Aus unserer Sicht stehen dafür folgende Möglichkeiten zur Untersuchung der Wärmedämmung zur Verfügung:

1. Man untersucht die Temperaturänderung im Inneren eines mehr oder weniger wärmedämmten Behälters in Abhängigkeit von der Zeit.

Dazu können die Schüler die Temperaturen zu unterschiedlichen Zeiten vergleichen, entsprechende Temperatur-Zeit-Diagramme erstellen und die Wärme berechnen, die in bestimmten Zeiten aufgrund vorhandener mehr oder weniger wärmedämmender Materialien durch Wärmeleitung, Wärmeströmung und Wärmestrahlung abgegeben wird.

Außerdem lässt sich untersuchen, welchen Einfluss die Größe der Wandflächen des Behälters und die Temperaturdifferenz zwischen außen und innen auf den Energietransport nach außen haben. Die Abbildung 1 zeigt den experimentellen Aufbau; in der Tabelle 1 sind die Messdaten für ein Experiment unter Nutzung des Dämmmaterials Sägespäne dargestellt.

Beispiele für Aufgabenstellungen:

- a) – Ermitteln Sie ein gut wärmedämmendes Material!
 - Untersuchen Sie dazu, welchen Einfluss die Art des zur Dämmung genutzten Materials auf die Wärmeabgabe hat!

- Nutzen Sie zwei unterschiedliche Dämmmaterialien! Zeichnen Sie die Temperatur-Zeit-Diagramme!
 - Berechnen Sie die Wärme, die in einer Zeit von 8 min von dem Behälter abgegeben worden ist!
- b) - Ermitteln Sie, welchen Einfluss die Dicke des Dämmmaterials auf die Wärmeabgabe hat!
- Stellen Sie fest, bei welcher Dicke eine Dämmung nicht mehr lohnend ist! Vergleichen Sie dazu die Temperaturdifferenzen bei unterschiedlicher Dicke der Dämmschicht und gleicher Abkühlungszeit!
2. Man untersucht die Temperatur an der äußeren Oberfläche des Behälters und im Inneren des mehr oder weniger wärme gedämmten Behälters in Abhängigkeit von der Zeit.

Dazu können die Schüler die Temperaturen auf den unterschiedlichen Oberflächen zu bestimmten Zeiten messen, vergleichen und somit die wärmedämmende Wirkung von Materialien zumindest halbquantitativ abschätzen. Sie können Temperatur-Zeit-Diagramme für die äußere Oberfläche erstellen und die Wärme berechnen, die in bestimmten Zeiten vorwiegend durch Wärmeleitung abgegeben wird. Man kann den Energieverlust einer gut gedämmten Wand und einer weniger gut gedämmten Wand vergleichen und eine relative Energieeinsparung bestimmen. Außerdem ist damit bis zu einem gewissen Grade die Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten k gegeben.

Die Schüler können mit einem geeigneten Thermometer feststellen, an welchen Stellen des Behälters die Wärmedämmung unzureichend ist. In Abbildung 2 ist die Ver-

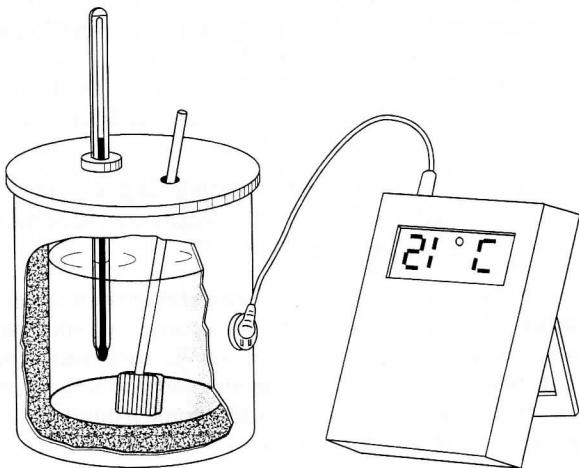


Abb. 2. Messen der Innen- und Außentemperatur (Messverfahren 2)

Dämmmaterial	Innentemperatur	Temperatur an der Oberfläche des Behälters
Styropor	46 °C	24 °C
Papier (geknüllt)	46 °C	32 °C

Tab. 2. Innen- und Außentemperatur bei unterschiedlichen Dämmmaterialien nach 5 Minuten

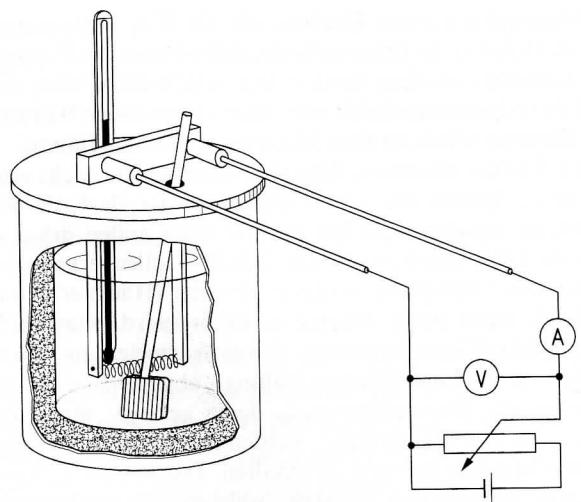


Abb. 3. Zufuhr von elektrischer Energie (Messverfahren 3)

Material	U in V	I in mA	UI in W
Wolle	4,1	480	1,96
Sand (nass)	5,0	590	2,95

Tab. 3. Messdaten für zwei Dämmmaterialien

suchsanordnung dargestellt, in Tabelle 2 sind die Messdaten für zwei Dämmmaterialien erfasst.

Beispiele für Aufgabenstellungen:

- Bestimmen Sie durch Messung der Temperatur im Innern eines wärme gedämmten Behälters und auf der Oberfläche, wie viel Wärme abgegeben worden ist. Nutzen Sie ein Flüssigkeitsthermometer zur Messung der Temperatur im Inneren des Behälters und ein handelsübliches Digitalthermometer für die Messung der Temperatur an der Oberfläche des Behälters!
 - Ermitteln Sie, ob die Dämmschicht um den Behälter vollständig und unversehrt ist!
3. Man bestimmt die Energie, die ständig zugeführt werden muss, um die durch Wärmeleitung, Wärmeströmung und Wärmestrahlung »verlorengangene« Energie zu kompensieren.

Dazu führt man dem Behälter elektrische Energie zu, bis die Temperatur im Behälter über längere Zeit konstant bleibt. In der Abbildung 3 ist eine Versuchsanordnung dargestellt, und in Tabelle 3 sind Messdaten für zwei Dämmmaterialien erfasst.

Beispiele für Aufgabenstellungen:

- Ermitteln Sie, wie viel Energie zugeführt werden muss, um die Temperatur in einem schlecht wärme gedämmten Behälter und in einem sehr gut wärme gedämmten Behälter (nahezu) konstant zu halten!
- Ermitteln Sie die Wärme, die durch den Behälter mit Dämmschicht an die Umgebung abgegeben wird! Die Versuchsanordnungen haben selbstverständlich Vor- und Nachteile. In Tabelle 4 sind die drei Messverfahren zum Vergleich gegenübergestellt.

Abkühlungskurven	Vergleich der Außen- und Innentemperatur	Kompensieren der Verluste durch Zufuhr von Wärme
<p>Messverfahren in der Praxis kaum gebräuchlich</p> <p>einfach in der Handhabung</p> <p>Jede Messreihe zur Aufnahme von Abkühlungskurven dauert etwa 10 min.</p> <p>Messgeräte: übliche Flüssigkeitsthermometer entsprechender Bereiche, elektrisches Thermometer mit Messfühler</p>	<p>Messverfahren teilweise gebräuchlich</p> <p>einfach in der Handhabung</p> <p>Für die Aufnahme der Messwerte und den Vergleich von Innen- und Außentemperaturen etwa 15 min notwendig</p> <p>Messgeräte: übliche Flüssigkeitsthermometer und elektrisches Thermometer (handelsübliches Außen-Innen-thermometer)</p>	<p>Praxiswirksames Verfahren</p> <p>erfordert Fertigkeiten beim Abgleichen von U bzw. I, beim Aufbau der Potentiometerschaltung</p> <p>Für zwei unterschiedliche Materialien sind 20 min für das Abgleichen der U- bzw. I-Werte notwendig</p> <p>Messgeräte: Spannungs- und Strommesser, Flüssigkeitsthermometer, besser elektrisches Thermometer mit Messfühler</p>

Tab. 4. Vergleich der Messverfahren

Die Entscheidung für ein bestimmtes Messverfahren bzw. eine bestimmte Experimentieranordnung bei dem Praktikumsexperiment ist sicherlich davon abhängig zu machen, welche Voraussetzungen die Schüler besitzen, welche Zeit im Unterricht zur Verfügung steht, welche Geräte vorhanden sind, ob die Vorbereitung und Auswertung im Unterricht oder zu Hause erledigt werden soll usw.

4 Zur Anlage des Praktikumsexperimentes Wärmedämmung

Es soll im Folgenden *eine* Möglichkeit diskutiert werden, ein solches Praktikumsexperiment zu realisieren. Die Schüler sollten eine schriftliche Anleitung dazu erhalten und gegebenenfalls entsprechende Vorbereitungen zu Hause ausführen können.

Die Anleitung soll orientieren, aber den Schüler nicht gängeln, deshalb darf nicht jeder einzelne Schritt im Detail vorgeschrieben werden. Man sollte den Schülern die Möglichkeit lassen, eigene Ideen einzubringen. Deshalb können die Schüler in Vorbereitung auf das Experiment zur Dämmung zu nutzende Materialien selbst mitbringen und Einfluss auf den Experimentaufbau nehmen bzw. sich eine Experimentieranordnung selbst auswählen. In der Anleitung sollten deshalb Hinweise zum Aufbau der Experimente sparsam gegeben werden, beispielsweise auch die Hinweise zur Gestaltung der Messwerttabellen. Die Schüler können die Messwerttabellen und Diagramme – es handelt sich in allen Fällen um einfache Tabellen und Diagramme – selbst entwerfen.

Für die Auswertung hinsichtlich ökologischer Probleme sollten einige Hinweise auch im Unterrichtsgespräch gegeben werden, die von den Schülern zu verarbeiten sind. Auch durch das Studieren populär-wissenschaftlicher Literatur (konkrete Materialien sollten genannt werden!) können diesbezüglich Erkenntnisse formuliert werden, z. B. Ersparnis von Energie durch Wärmedämmung bei Wohnhäusern und der Nutzen für die Umwelt, Reinhaltung der Luft durch den Verbrauch von weniger Kohle.

Die Anleitung für das Praktikumsexperiment sollte so angelegt werden, dass die Schüler in Vorbereitung auf das Praktikum Vorbetrachtungen anstellen müssen, damit sie sich theoretisch mit den Aufgaben auseinandersetzen und die notwendigen Begriffe und Gesetze wiederholen. Im Rahmen der Vorbetrachtungen können u. a. folgende Fragen beantwortet werden:

- Wiederholen Sie die Gleichung zur Berechnung der Wärme!
- Stellen Sie Größen zusammen, die die Wärmeübertragung von einem Behälter beeinflussen!
- Geben Sie an, was man unter Wärme und Temperatur versteht.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Schüler zu Beginn des Praktikumsexperiments über folgende Kenntnisse verfügen:

- Arten der Wärmeübertragung,
- Begriffe Temperatur, Energie und Wärme,
- Wirkungsgrad,
- Wärmekapazität.

Über Aufgabenstellungen sollen die drei unterschiedlichen Messverfahren umgesetzt werden. Jede Schülergruppe arbeitet nach *einem* Messverfahren und nutzt Dämmmaterialien bestimmter Dicke. Damit gelingt es, die einzelnen Schülergruppen mit unterschiedlichen Materialien arbeiten zu lassen, so dass eine Vielzahl von Messdaten zum Vergleichen vorhanden ist. In Tabelle 5 ist eine Möglichkeit angegeben, wie die Zuordnungen der Schülergruppen zu Messverfahren erfolgen kann. Es ist auch möglich, dass die Schüler frei wählen können, nach welchem Verfahren sie arbeiten möchten.

5 Zu einigen Ergebnissen der Untersuchung

Entsprechend den genannten Überlegungen konnte das Praktikumsexperiment Wärmedämmung an *einem* Praktikumstag von *allen* Schülern bearbeitet werden. Die Schüler erhielten vorher schriftliche Anleitungen.

Untersuchung unterschiedlicher Dämmmaterialien mit Experimentieranordnung 1 bzw. mit Messverfahren 1	Untersuchung unterschiedlicher Dämmmaterialien und unterschiedlicher Dicke des Dämmmaterials und Vollständigkeit der Dämmschicht mit Experimentieranordnung 2 bzw. Messverfahren 2	Untersuchung unterschiedlicher Dämmmaterialien mit Experimentieranordnung 3 bzw. mit Messverfahren 3
<p>Gruppe 1: Holzspäne und Sand</p> <p>Gruppe 2: Wolle und Styropor</p> <p>Gruppe 3: Kork und Stroh</p> <p>Gruppe 4: Papier (geknüllt und mit Staniolpapier umwickelt) und Sand (feucht)</p>	<p>Gruppe 1: Holzspäne, Sand, Wolle, Styropor</p> <p>Gruppe 2: Kork, Stroh, Papier (geknüllt), Sand (feucht), unterbrochene Dämmschicht</p> <p>Gruppe 3: Wolle unterschiedlicher Dicke</p> <p>Gruppe 4: Holzspäne unterschiedlicher Dicke</p>	<p>Gruppe 1: Holzspäne und Sand</p> <p>Gruppe 2: Wolle und Styropor</p> <p>Gruppe 3: Kork und Stroh</p> <p>Gruppe 4: Papier (geknüllt) und Sand (feucht)</p>

Tab. 5. Mögliche Zuordnung von Schülergruppen zu Experimentieranordnungen

Sie hatten sich auf ihre Aufgaben vorbereitet und stellten noch einige Fragen zum konkreten Aufbau der Experimente. Einige Schüler hatten verschiedene Dämmmaterialien mitgebracht. Wir haben in unseren Untersuchungen insgesamt mit 10 Schülergruppen zu je zwei Schülern arbeiten lassen und dabei wurden 8 unterschiedliche Dämmmaterialien untersucht:

Das Experiment lieferte die von uns erwarteten Ergebnisse. Die Ergebnisse waren eindeutig, so dass eine Reihenfolge der Dämmmaterialien hinsichtlich der Qualität der Dämmung angegeben werden konnte.

Die Aufgabe zur Umsetzung der Schaltung bei Experimentieranordnung 3 (Potentiometerschaltung) erwies sich als schwierig, sowohl beim Aufbau einer Potentiometerschaltung als auch beim Einstellen der Stromstärke hatten die Schüler Probleme. Es musste eine Reihe individueller Hilfen gegeben werden.

Ein weiterer schwieriger Teil war für alle Schüler die Interpretation ihrer Ergebnisse. Es mussten aus den Abkühlungskurven und aus den Berechnungen, aus dem Vergleich von Innen- und Außentemperatur und aus den Werten für die zuzuführende Energie Aussagen über die Qualität der Dämmung gemacht werden. Die Schüler diskutierten zunächst in den Gruppen, welche Folgerungen aus den Messwerten abgeleitet werden können, konnten eine geeignete Formulierung der Ergebnisse nur schwer finden.

In einem Unterrichtsgespräch wurden die Aussagen über die Effektivität der Dämmung gefunden. Die Schüler hatten zwar erkannt, dass »die Temperatur bei weiterer Erhöhung der Dicke des Materials sich nicht mehr ändert«, konnten aber eine geeignete Folgerung wie etwa »eine weitere Erhöhung der Dicke des Dämmmaterials nützt nichts mehr, sondern wäre Materialvergeudung« allein schwer ableiten.

Ohne Probleme wurden von den Schülern dagegen die ökologisch orientierten Fragen beantwortet. Mit großem Interesse wurden von den Schülern Vor- und Nachteile der Dämmmaterialien diskutiert. Als Ergebnisse wurden u. a. von den Schülern formuliert:

»Holzspäne, Kork, Styropor und Filz dämmen sehr gut (Dicke der Dämmschicht 2 cm). Das Dämmvermögen wird immer kleiner.«

»Feuchter Sand dämmt die Wärme schlecht, der würde nie genommen werden. Styropor ist nicht schlecht, es dämmt gut, aber das ist gefährlich, weil beim Brennen giftige Gase entstehen würden.«

»Holzspäne und Kork sind natürliche Stoffe, sie können wieder abgebaut werden und sind ökologisch gut einsetzbar. Kork hat man nicht beliebig zur Verfügung, man benötigt Korkeichen. Diese wachsen nur in Griechenland und Spanien und auch nur sehr langsam.«

»Wir schlagen vor, gepresste Holzspäne zur Dämmung zu verwenden. Das ist wirtschaftlich gut, es kostet nicht viel, denn Späne sind da. Später können die Holzspäne wieder auf dem Kompost verrotten ohne Schaden.«

Literatur

- [1] Lehrplan Gymnasium Physik Klassen 6–12. – Dresden 1992.
- [2] Autorenkollektiv: Physik Kopiervorlagen für Praktikumsexperimente. – Berlin: Verlag Volk und Wissen 1993.
- [3] Autorenkollektiv: Physikalische Schulversuche. Teil 8 Wärmelehre. – Berlin: Verlag Volk und Wissen 1984.
- [4] GRIMSEHL: Lehrbuch der Physik. Band 1. – Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft 1957.
- [5] G. KLUGE – G. NEUGEBAUER: Grundlagen der Thermodynamik. – Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften 1976. □