

## Innovative Energiespeicher mit Wärmekissen

- ein aktueller lebensweltlicher Kontext mit Zukunftsrelevanz und curricularer Effizienz -

Hans-Otto Carmesin\*, Matthias Kreier<sup>+</sup>

\*Gymnasium Athenaeum, Harsefelder Straße 40, 21680 Stade sowie Studienseminar Stade, Bahnhofstraße 5, 21682 Stade sowie Fachbereich 1, Institut für Physik, Universität Bremen, 28334 Bremen, <sup>+</sup>Eichenschule, 27383 Scheeßel, Königsberger Straße 15  
Hans-Otto.Carmesin@t-online.de, Matthias.Kreier@gmail.com

### Kurzfassung

Phasenübergänge und die dabei freigesetzte innere Energie behandeln wir mit einem lebensweltlichen Kontext, der einen Beitrag zur Energiewende leisten kann. Wir berichten auch über die Erprobung in zwei Klassen des Gymnasiums.

### 1. Einleitung

Wir präsentieren einen Kontext für den Physikunterricht, der zugleich der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler entstammt, relevant für die energetische Wende sowie für die Umwelt ist, effizient curriculare Kompetenzen entwickelt, fächerübergreifend sowie ganzheitlich behandelt wird und im Unterricht mit großem Erfolg erprobt wurde.

Die zentralen und ergiebigen Versuchsmaterialien sind ein Wärmekissen, ein Thermobecher und ein Thermometer (s. Abb. 1 und 3). Daher können die Schülerinnen und Schüler hier aus ihrer eigenen Lebenswelt heraus Physik lernen. Ein solcher Widererkennungswert weist auf eine hohe Lerneffizienz hin [1].

Der Kontext weist auf Möglichkeiten zur innovativen Nutzung regenerativ gewonnener thermischer Energie in Deutschland hin (s. Abb. 2). Da der Bedarf an thermischer Energie in Deutschland etwa 50 % des gesamten Energiebedarfs ausmacht [2] und da Phasenübergänge nutzende Wärmespeicher technisch einsetzbar sind [3], ist dieser Kontext relevant für die Energiewende und die Umwelt. Daher ist dieser Kontext epochaltypisch [4] und dadurch besonders sinnvoll.

Gemäß dem niedersächsischen Kerncurriculum ist die bei einem Phasenübergang freigesetzte innere Energie in den Klassenstufen 9 oder 10 zu behandeln. Bei diesem Kontext erkennen die Schülerinnen und Schüler die Nutzbarkeit dieser Energie am Beispiel des Wärmekissens (s. Abb. 1) und bestimmen den Betrag dieser Energie, um eine denkbare Anwendung als Energiespeicher einer Heizungsanlage zu ermitteln. Da der Kontext in nur ein bis zwei Doppelstunden behandelt wurde, ist er curricular effizient.

Bei diesem Kontext analysieren die Schülerinnen und Schüler auch den Kostenvorteil, den der Pha-

senübergang ermöglicht. So werden die Fächer Physik, Mathematik und Politik/Wirtschaft ganzheitlich miteinander vernetzt.

Der Kontext wurde in einer neunten und in einer zehnten Klasse erprobt und wir berichten über Erfahrungen aus dem Unterricht.

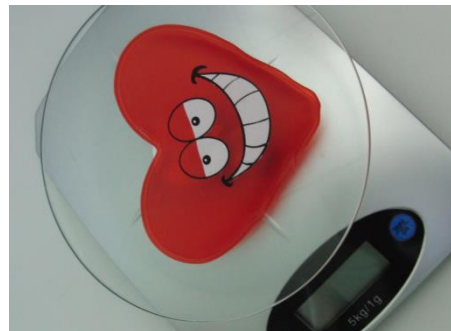


Abb.1: Wärmekissen auf der Waage

### 2. Sachanalyse

Der Solarpionier Josef Jenni hat im Jahr 2005 in Kappelrodeck ein Haus mit 140 m<sup>2</sup> beheizter Fläche gebaut, das vollständig solar beheizt wird [5]. Zur Speicherung der thermischen Energie erhielt das Haus einen Wassertank mit einem Volumen von 42800 Litern. Das Wasser wird typischerweise von 40 °C auf 90 °C erhitzt und speichert dabei folgende thermische Energie:

$$E = 50 \text{ K} \cdot 42800 \text{ kg} \cdot 4,182 \text{ J/(g} \cdot \text{K)} = 2486 \text{ kWh} \{1\}$$

Das Haus benötigt bei einem geschätzten KfW-40-Standard im Jahr pro Quadratmeter eine thermische Energie von 40 kWh, also insgesamt 5600 kWh. Die Heizungsanlage kostet 70000 Euro [5], wogegen eine entsprechende Gasheizungsanlage ungefähr 20000 Euro kosten würde [6]. Hinzu kämen bei einem Gaspreis von 7 Cent je kWh jährliche Kosten von 0,07 €/kWh · 5600 kWh = 392 €. Bei diesen Preisverhältnissen und ohne Zinsen wäre der Auf-

preis von 50000 € nach 127,55 Jahren ausgeglichen. Daher ist die Heizungsanlage zwar ökologisch sinnvoll, aber kaufmännisch fragwürdig. Das motiviert den Einsatz eines leistungsfähigeren Energiespeichers. Hierzu bietet sich ein Material mit einem Phasenübergang an. In der Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler findet man hier das Natriumacetat – Trihydrat in Wärmekissen. Das Material hat einen Phasenübergang bei 58 °C. Die spezifische Wärmekapazität beträgt 2,9 kJ/(kg·K), die Dichte 1,53 kg/l und die spezifische innere Energie des Phasenübergangs beträgt 260 J/g. Das Material kann praktisch von 40 °C auf 120 °C erhitzt werden. Dabei nimmt ein Liter die folgende Energie auf:

$$E = (80 \text{ K} \cdot 2,9 \text{ kJ/K} + 260 \text{ kJ}) \cdot 1,53 = 0,21 \text{ Wh} \quad \{2\}$$

Für die von 42800 Litern Wasser aufgenommene Energie von 2486 kWh benötigt man daher 11838 Liter Natriumacetat-Trihydrat oder 28 % des Volumens. Eine didaktisch reduzierte Kostenanalyse geht davon aus, dass der Aufpreis von 50000 € proportional zum Tankvolumen ist, und dass man statt Natriumacetat-Trihydrat Paraffin mit einem Preis von 550 € je Kubikmeter sowie vergleichbaren physikalischen Eigenschaften verwenden kann [7]. Dann ergibt sich folgender Aufpreis:

$$11,838 \cdot 550 \text{ €} + 50000 \text{ €} \cdot 11838 / 42800 = 20340 \text{ €} \quad \{3\}$$

Dieser Aufpreis wäre analog wie oben nach 52 Jahren durch die Kosten für Gas ausgeglichen.

### 3. Lernvoraussetzungen

Der Unterricht fand in einer 10. Klasse sowie in einer 9. Klasse des Gymnasiums statt. Zuvor wurde das Verdampfen als Phasenübergang behandelt und die beim Verdampfen von Wasser zugeführte spezifische innere Energie bestimmt.



Josef Jenni baut Haus in Kappelrodeck, Baden, 100 % solar beheizt  
 – Beheizte Fläche: 140 m<sup>2</sup>  
 – Wärmespeicher: Wassertank mit 42 800 Liter & 2250 kWh

Abb.2: Einstiegsbild

### 4. Einstieg und Problemstellung

Der Einstieg erfolgte mit einem Bild (s. Abb. 2) und führte zu der Leitfrage: *Braucht man einen 42 800-Liter-Tank?*

### 5. Ideenfindung

In einer Phase der Ideenfindung wurde auch ein „großes Wärmekissen“ als Energiespeicher vorgeschlagen. Ein gewöhnliches Wärmekissen wurde vorgeführt und der Phasenübergang der Kristallisation wurde beobachtet. Das verwendete Natriumacetat-Trihydrat wurde angegeben und die spezifische Wärmekapazität  $c = 2,9 \text{ J/(g·K)}$ , die Dichte  $\rho = 1,53 \text{ g/cm}^3$  sowie die Schmelztemperatur 58 °C wurden angegeben. Ferner wurden die nutzbaren Temperaturintervalle von [40°C; 90°C] für Wasser

und [40°C; 120°C] für Natriumacetat-Trihydrat vereinbart.



Abb.3: Versuch

### 6. Versuchsdurchführung

Die Schülerinnen und Schüler erkannten, dass die bei der Kristallisation freigesetzte spezifische innere Energie zu bestimmen ist. Sie entwickelten einen Versuch mit ihrem eigenen Versuchsmaterial (s. Abb. 3). Alle führten das Experiment erfolgreich in Kleingruppen durch.

### 7. Auswertung und Präsentation

Die Schülerinnen und Schüler werteten ihre Ergebnisse aus und eine Gruppe präsentierte diese wie folgt am Projektor:

Messwerte:

Wasser:  $M_W = 269 \text{ g}$ ;

Gefäß mit Thermometer:  $M_G = 256 \text{ g}$ ;

Wärmekissen:  $M_K = 45 \text{ g}$ ;

$\Delta T = 6,2 \text{ K}$

Auswertung:

$$E = [M_W \cdot c_W + M_K \cdot c_K] \cdot \Delta T$$

$$E = [269 \text{ g} \cdot 4,182 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} + 45 \text{ g} \cdot 2,9 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}}] \cdot 6,2 \text{ K}$$

$$E = 7784 \text{ J} \rightarrow s = E/m = 173 \frac{\text{J}}{\text{g}}$$

$$\text{Wasser: } \frac{E}{m} = 4,182 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 50 \text{ K} = 209 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 0,058 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow \frac{E}{V} = 0,058 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \rightarrow V = \frac{2520 \text{ kWh}}{0,058 \text{ kWh/l}} = 43\,000 \text{ l}$$

Natriumacetat-Trihydrat:

$$\frac{E}{m} = 2,9 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 80 \text{ K} + 260 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 492 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 0,14 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\rightarrow M = \frac{0,14 \text{ kWh/kg}}{2520 \text{ kWh}} = 18\,000 \text{ kg}$$

$$\rightarrow V = \frac{M}{\rho} = \frac{18000 \text{ kg}}{1,53 \text{ kg/l}} = 11800 \text{ l} \rightarrow 28\%$$

Ergebnisse: Beim Schmelzen von Natriumacetat-Trihydrat wird folgende spezifische innere Energie freigesetzt:

$s = 173 \frac{J}{s}$ , Literaturwert:  $s = 260 \frac{J}{s}$ . Der Tank kann um 72 % verkleinert werden.

### 8. Reflexion und Bewertung

Die Schülerinnen und Schüler stellten fest, dass der Phasenübergang der Kristallisation beim Wärmekissen oder bei der Gebäudeheizung gut zur Speicherung von thermischer Energie genutzt werden kann.

### 9. Kaufmännische Analyse

Das Haus in Kappelrodeck kann nur dann umfassend eingeschätzt werden, wenn auch die Wirtschaftlichkeit analysiert ist. Daher erhielten die Schülerinnen und Schüler folgende zwei Aufgaben als Hausaufgabe:

Aufgabe 1: Josef Jennis Heizungsanlage im Haus in Kappelrodeck kostet 70 000 €. Eine Gasheizung hätte 20 000 € gekostet. Pro Jahr wird in dem Haus eine thermische Energie von 5600 kWh benötigt. Berechne, nach wie vielen Jahren sich die Heizung amortisiert hat, wenn man von einem konstanten Gaspreis von 7 Cent je kWh ausgeht und Zinsen vernachlässigt.

Aufgabe 2: Als Phasenübergangsmaterial kann man Paraffin verwenden, das in der Erdölindustrie als Nebenprodukt anfällt und 550 € je Kubikmeter kostet. Nimm vereinfachend an, dass die Mehrkosten von 50000 € von Josef Jennis Heizungsanlage proportional zum Tankvolumen sind und dass Paraffin die gleichen physikalischen Eigenschaften wie Natriumacetat-Trihydrat hat. Berechne, nach wie vielen Jahren die Mehrkosten durch die Kosten für Gas ausgeglichen sind, wenn der Gaspreis 7 Cent je kWh beträgt und Zinsen vernachlässigt werden.

Als Lösung stellten die Lernenden fest, dass für das Gas jedes Jahr der folgende Betrag zu zahlen ist:

$$5600 \text{ kWh} \cdot \frac{0,07 \text{ €}}{\text{kWh}} = 392 \text{ €} \quad \{4\}$$

Für den Ausgleich der Mehrkosten wurde die folgende Dauer berechnet:

$$\frac{50000 \text{ €}}{392 \text{ €} / a} = 128 \text{ a} \quad \{5\}$$

Für die alternative Anlage mit Phasenübergang wurde der folgende Aufpreis berechnet:

$$50000 \text{ €} \cdot \frac{11800}{42800} + 11,8 \text{ m}^3 \cdot 550 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} = 20275 \text{ €} \quad \{6\}$$

Daraus ergab sich für den Ausgleich eine Dauer von

$$\frac{20275 \text{ €}}{392 \text{ €} / a} = 52 \text{ a.}$$

Die Schülerinnen und Schüler stellten so fest, dass man sehr lange warten muss, bis man das Geld wieder eingespart hat, das man für eine Solarheizung ausgeben muss, die das ganze Jahr über heizt. Dafür erzeugt eine solche Heizung aber keine Abgase.

### 10. Erfahrung mit dem Unterricht

Die Schülerinnen und Schüler fühlten sich durch das Thema sehr motiviert. Auch experimentierten sie selbstständig, konzentriert und erfolgreich. Ferner haben sie bei der folgenden Klassenarbeit gute Ergebnisse erzielt [8]. Zudem war der Unterricht zeitlich effizient, da er nur eine Doppelsunde in Anspruch nahm.

### 11. Diskussion

Die Schülerinnen und Schüler haben anhand von Material aus ihrer Lebenswelt selbstständig die bei einem Phasenübergang freigesetzte innere Energie gemessen. Darauf aufbauend haben sie eine innovative Verbesserung zur Energiewende konzipiert sowie energetisch und wirtschaftlich analysiert. So erzielten sie zeiteffizient ein außergewöhnliches Kompetenzerlebnis und einen deutlichen Kompetenzzuwachs.

### 12. Literatur

- [1] Hattie, John (2009): Visible Learning, London: Routledge.
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2013): Energie in Deutschland. S. 47. <http://www.bmwi.de/Dateien/Energieportal/PDF/energie-in-deutschland.property=pdf.%20bereich=bmwi2012.sprache=de.rwb=true.pdf> (Stand: 1/2014)
- [3] Schaumann, Gunter (2001): Eignung eines Latentwärmespeichers auf der Basis von Natriumacetat für die Holz-Sonne-Kopplung. <http://www.wald-rlp.de/fileadmin/website/fawfseiten/fawf/downloads/Projekte/Seeg/latentwsp.pdf> (Stand 1/2014)
- [4] Klafki, Wolfgang (1993): Grundlinien einer gegenwarts- und zukunftsbezogenen Konzeption. In: Pädagogische Welt, S. 28-33, 1993.
- [5] Gerold Weber Solartechnik GmbH: Solartechnik pur – 100 % Sonnenwärme, auch im Winter. <http://www.solarserver.de/solarmagazin/anlageaugust2006.html> (Stand 1/2014)
- [6] Wartmann, Franziska (2014): Was kostet eine neue Heizung? [http://www.helpster.de/was-kostet-eine-neue-heizung-so-kalkulieren-sie-richtig\\_42132](http://www.helpster.de/was-kostet-eine-neue-heizung-so-kalkulieren-sie-richtig_42132) (Stand: 1/2014)
- [7] Kreier, Matthias (2013): Analyse der Latentwärmespeicherung mit Phasenübergangsmaterialien im Kontext der Energiewende – ein Unterrichtsversuch im Physikunterricht in einer 9. Klasse des Gymnasiums. Hausarbeit, Studien-seminar Stade.