

ERFAHRUNGEN MIT EINEM AUSSERGEWOEHNLICHEN VERSUCH ZUM THEMA "WAERMETRANSPORT"

Prof. Dr. Uwe ZIMMERMANN(*)

I. Einleitung

Versuche für physikalische Praktika werden oft so konzipiert, daß "brauchbare" Ergebnisse mit möglichst geringem Betreuungsaufwand erzielt werden.

Der Versuch, der in dieser Arbeit beschrieben wird, gehört zu einer anderen Kategorie von Versuchen. Die Versuchsdurchführung erfolgt nicht nach einem starren Schema. Sie ist vielmehr abhängig von den Lösungsvorschlägen und den Vorkenntnissen der Studierenden. Der Versuch unterscheidet sich von anderen Versuchen auch dadurch, daß er überraschende Ergebnisse liefert. Durch Versuche mit überraschendem Ergebnis werden Studierende zu Äußerungen angeregt. Diese Äußerungen lassen u.a. Präkonzepte erkennen, die hinterfragt und korrigiert werden können.

Eine Ursache der weltweiten Krise des Physikunterrichts wird darin gesehen, daß im Physikunterricht die Existenz von Präkonzepten der Schüler ignoriert werden (1). Diese Präkonzepte haben auch bei Studierenden eine blockierende Wirkung.

II. Beschreibung der Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung besteht aus zwei Styroporkästen. Überraschende Ergebnisse werden erzielt, wenn ein Kasten mit einem Kupferdeckel und der andere mit einem Edelstahldeckel gleicher Stärke (1 mm) verschlossen wird (2). In den Kästen befinden sich elektrische Heizkörper gleicher Leistung. Als Heizkörper eignen sich LötKolbenheizelemente oder mit schwarzer Farbe angestrichene Glühlampen. Bei einer Grundfläche des Styroporkastens von ca 40 cm x 40 cm und einer Höhe von ca 36 cm sollte die Leistung des Heizkörpers nicht mehr als 25 W betragen. Die Temperatur wird mit einem Thermoelement gemessen. Wird eine Glühlampe als Heizkörper verwendet, ist es erforderlich eine Abschirmung zwischen Glühlampe und Temperaturfühler anzubringen. Diese Abschirmung verhindert eine Verfälschung der Temperatur durch direkte Strahlung und sorgt für eine gleichmäßigere Temperaturverteilung im Kasten. Nach dem Einschalten des Heizkörpers dauert es

(*) Pädagogische Hochschule, Heidelberg.

etwa 45 Minuten bis sich eine konstante Temperaturdifferenz einstellt. Bei allen Versuchen über die in dieser Arbeit berichtet wird, wird die Einstellung eines stationären Zustands abgewartet.

III. Versuchsdurchführung und Erfahrungen beim Einsatz des Versuchs

Vor dem Ablesen der Temperaturen, die sich in den Kästen nach dem Erreichen des stationären Zustands einstellen, werden die Studierenden aufgefordert, Vermutungen über die erwarteten Versuchsergebnisse zu äußern. Studierende die wissen, daß die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer wesentlich größer ist als die von Edelstahl erwarten, daß sich in dem Kasten mit Edelstahldeckel eine höhere Temperaturdifferenz einstellt als in dem Kasten mit Kupferdeckel. In Wirklichkeit stellt sich in beiden Kästen die gleiche Temperatur ein. Nach dem Ablesen der Temperaturen erhalten die Studierenden den Auftrag, Hypothesen zu formulieren, mit denen die unerwarteten Versuchsergebnisse erklärt werden können. Außerdem sollen Vorschläge zur Überprüfung der Richtigkeit der Hypothesen gemacht werden.

Im folgenden sind mehrere Hypothesen aufgeführt, die von Studierenden vorgeschlagen wurden:

1. Hypothese

Bei geringer Temperatur ist die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und Edelstahl gleich groß.

2. Hypothese

Kupfer- und Eisenatome sind unterschiedlich gewillt ihre Energie an die Luftteilchen abzugeben.

3. Hypothese

Da die Metallplatten so dünn sind, machen sich die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten der beiden Metalle nicht bemerkbar.

4. Hypothese

Über den Metallplatten bildet sich eine stehende Luftschicht aus.

Grundsätzlich können die Versuchsergebnisse mit jeder dieser Hypothesen erklärt werden. Da die Studierenden nicht in der Lage waren anzugeben, wie die Richtigkeit der ersten und zweiten Hypothese überprüft werden kann, wurden diese beiden Hypothesen nicht weiter verfolgt.

Zur Überprüfung der Richtigkeit der dritten Hypothese wurde vorgeschlagen, Versuche mit Metalldeckeln unterschiedlicher Stärke durchzuführen. Versuche mit Metalldeckeln unterschiedlicher Stärke (0,8 mm und 2,0 mm) ergaben allerdings die gleichen Versuchsergebnisse. Da keine dickeren Metalldeckel zur Verfügung standen, wurde auch diese Hypothese nicht weiter verfolgt.

Die vierte Hypothese hat schließlich wesentlich zur Lösung des überraschenden Versuchsergebnisses beigetragen. Zur Überprüfung der Richtigkeit dieser Hypothese wurde vorgeschlagen, die stehende Luftschicht über den Metalldeckeln mit einem Ventilator wegzublasen.

Die Durchführung dieses Versuchs mit Hilfe von Kfz. - Kühlergebläsen ergab, wie von den Studierenden erwartet, eine Abnahme der Temperaturdifferenz. Im stationären Zustand stellt sich aber, im Gegensatz zur Erwartung der Studierenden, in beiden Kästen die gleiche Temperaturdifferenz ein. Damit die Studierenden erkennen, daß der Wärmetransport auch auf der Innenseite der Metalldeckel durch eine ruhende Luftschicht behindert wird, stellen wir Ihnen eine Aufgabe (vgl. Aufgabe A).

Die Lösung dieser Aufgabe ergibt, daß sich in beiden Kästen eine Temperaturdifferenz einstellen würde, die kleiner ist als 1°C . Da die tatsächliche Temperaturdifferenz 13°C beträgt, können die Studierenden den erheblichen Einfluß der ruhenden Luftschicht an der Innenseite des Metalldeckels erkennen.

Die Versuchsergebnisse können selbstverständlich auch quantitativ ausgewertet werden. Man kann z.B. ausrechnen, wie dick die ruhende Luftschicht an der Innenseite bzw. Außenseite der Metalldeckel sein müßte, um die Versuchsergebnisse erklären zu können (vgl. Aufgaben B und C). Die Berechnungen ergeben, daß diese Luftschichtdicken etwa 3 mm betragen müßten.

Es soll an dieser Stelle erwähnt werden, daß bisher ein Aspekt nicht angesprochen wurde. Es wurde nicht diskutiert, ob bzw. in welchem Maße, die Strahlungsleistung der Metalldeckel die Versuchsergebnisse beeinflussen. Bei den Versuchen mit Gebläsen müssen die Strahlungsverluste der Metalldeckel nicht berücksichtigt werden. Die Metalldeckel wurden nämlich bei diesen Versuchen so stark angeblasen, daß die Temperatur der Metalldeckel nur unwesentlich höher war, als die Umgebungstemperatur. Schwieriger ist die Beantwortung der Frage, welchen Einfluß die Strahlungsverluste der Metalldeckel bei den Versuchen ohne Gebläse auf die Versuchsergebnisse haben. Wenn man Studierenden den Auftrag erteilt, eine Energiebilanz für den Kasten mit Metalldeckel (ohne Gebläse) aufzustellen, so fehlt in dieser Energiebilanz regelmäßig der Strahlungsverlust des Metalldeckels. Damit die Studierenden erkennen, daß die Temperatur der Metalldeckel wesentlich höher ist als die Umgebungstemperatur, fordern wir sie auf, die Metalldeckel zu berühren. Eine Berechnung bzw. Abschätzung der Strahlungsleistung der Metalldeckel scheitert bereits daran, daß die Kenntnisse der Studierenden über die Abhängigkeit der

Strahlungsleistung von der Temperatur eines Körpers völlig unzureichend sind. Wir nutzen diese Gelegenheit und lassen die Studierenden einen Versuch durchführen, der es erlaubt, die Abhängigkeit der Strahlungsleistung eines Körpers von der Temperatur zu untersuchen und nachzuweisen, daß die Versuchsergebnisse im Einklang mit dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz stehen (3, 4).

Im Anschluß an diesen Versuch lassen wir die Studierenden die Strahlungsleistung eines schwarz oxydierten und eines polierten Kupferdeckels berechnen (vgl. Aufgabe D). Bei dem schwarz oxydierten Kupferdeckel beträgt die Strahlungsleistung 32% und beim polierten Kupferdeckel 2 % der elektrischen Heizleistung.

Da bei Versuchen mit leicht oxydierten und polierten Kupferdeckeln und bei Versuchen mit Edelstahldeckeln, deren Oberflächen matt oder poliert waren, die gleichen Versuchsergebnisse erzielt wurden, kann man annehmen, daß die Strahlungsleistung der Metalldeckel auch bei den Versuchen ohne Gebläse vernachlässigt werden können.

Aufgabe A:

In einem Styroporkasten mit Kupferdeckel (Edelstahldeckel) befindet sich eine elektrische Heizung der Leistung P . Welche Temperaturdifferenz stellt sich bei stationären Bedingungen ein?

Hinweis:

Nehmen Sie an, daß die Metalldeckel und die Styroporwände sowohl von außen als auch von innen mit starken Gebläsen angeblasen werden.

| | Styroporwände | Kupferdeckel | Edelstahldeckel |
|--|---------------|--------------|-----------------|
| Wärmeleitfähigkeit λ (W/mK) | 0,036 | 384 | 15 |
| Mittlere Fläche \bar{A} (m ²) | 0,60 | 0,125 | 0,125 |
| Wandstärke d (mm) | 40 | 1 | 1 |

Leistung des Heizelements: $P = 18,4 \text{ W}$

Aufgabe B:

Wenn der Metalldeckel (Kupfer - bzw. Edelstahl) von außen mit einem starken Gebläse angeblasen wird, nimmt die Temperatur in dem Styroporkasten ab. Nehmen Sie an, daß sich bei "normaler" Versuchsdurchführung (ohne Gebläse) auf beiden

Seiten des Metalldeckels ruhende Luftpolster ausbilden und daß das äußere Luftpolster mit Hilfe des Gebläses weggeblasen wird.

Welche Dicke müßte das Luftpolster auf der Innenseite des Metalldeckels haben um die bei stationären Bedingungen gemessene Temperaturdifferenz ΔT erklären zu können?

Hinweis:

Verwenden Sie zur Lösung der Aufgabe die in der Tabelle aufgeführten Werte und die Ergebnisse, die bei der Durchführung des Versuchs erzielt wurden. (Leistung P der elektrischen Heizung und Temperaturdifferenz ΔT).

| | Styroporwände | ruhendes Luftpolster (Innenseite) |
|--|---------------|--------------------------------------|
| Wärmeleitfähigkeit (W/mK) | 0,036 | 0,026 |
| Mittlere Fläche \bar{A} (m ²) | 0,60 | 0,10 |
| Dicke d (mm) | 40 | |

Versuchsergebnis:

$$\Delta T = 38^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 13^\circ\text{C} \text{ bei einer Leistung } P = 18,4 \text{ W}$$

Aufgabe C:

- a) Welche Gesamtdicke müßten die Luftpolster auf beiden Seiten des Metalldeckels bei normaler Versuchsdurchführung (ohne Gebläse) haben, wenn sich bei einer Leistung P der elektrischen Heizung eine Temperaturdifferenz ΔT einstellt? (Setzen Sie für die Leistung P und für ΔT die Ergebnisse ein, die sich bei der Durchführung des Versuchs ergeben haben).

Berechnen Sie die Dicke der äußeren Luftschicht mit Hilfe des Ergebnisses der Aufgabe B.

Hinweis:

Der Strahlungsverlust des Metalldeckels soll vernachlässigt werden.

- b) Berechnen Sie die Gesamtdicke der Luftpolster und die Dicke des äußeren Luftpolsters mit der Annahme, daß die Strahlungsleistung des Metalldeckels 5 % der Leistung der elektrischen Heizung entspricht.

| | Styroporwände | ruhendes Luftpolster (Außen - und Innenseite) |
|---|---------------|--|
| Wärmeleitfähigkeit (W/mK) | 0,036 | 0,026 |
| Mittlere Fläche \bar{A} (m ²) | 0,60 | 0,125 |
| Dicke d (mm) | 40 | |

Versuchsergebnis:

$$\Delta T = 43^{\circ}\text{C} - 24^{\circ}\text{C} = 19^{\circ}\text{C} \text{ bei einer Leistung } P = 18,4 \text{ W}$$

Aufgabe D:

In einem Styroporkasten, der mit einem Kupferdeckel abgedeckt ist, befindet sich eine elektrische Heizung der Leistung $P = 18 \text{ W}$.

Berechnen Sie die Strahlungsleistung des Kupferdeckels, wenn die Temperatur der äußeren Kupferoberfläche 10°C über der Raumtemperatur liegt. Die Aufgabe soll sowohl für einen schwarz oxydierten als auch für einen polierten Kupferdeckel gelöst werden. Vergleichen Sie die Strahlungsleistung des Kupferdeckels jeweils mit der Leistung der elektrischen Heizung.

- Raumtemperatur : 23°C
- Äußere Oberfläche des Kupferdeckels : $0,16 \text{ m}^2$
- Emissionsgrad von schwarz oxydiertem Kupfer : $\epsilon = 0,6$
- Emissionsgrad von poliertem Kupfer : $\epsilon = 0,04$

Literatur

- (1) Nachtigall, D.: Krise und Ausweg. In: Phys. Bl. 48 (1992), S. 169-173.
- (2) Zimmermann, U.: Verblüffende Ergebnisse bei Versuchen zum Thema "Wärmetransportprozesse". In: PhuD, 3, (1992), S. 232-240.
- (3) Zimmermann, U.: Experimentelle Bestimmung der Stefan-Boltzmann-Konstanten. In: PhuD, 4, (1987), S. 317-325.
- (4) Zimmermann, U.: Eine Versuchsanordnung zur Untersuchung des Wärmetransports durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion. - Ergebnisse von Untersuchungen des Wärmetransports in Gasen. In: PhuD, 4, (1990), S. 320-329.