

# Computerunterstützte Modellbildung in der Wärmelehre

M. Pohlig und H. M. Strauch

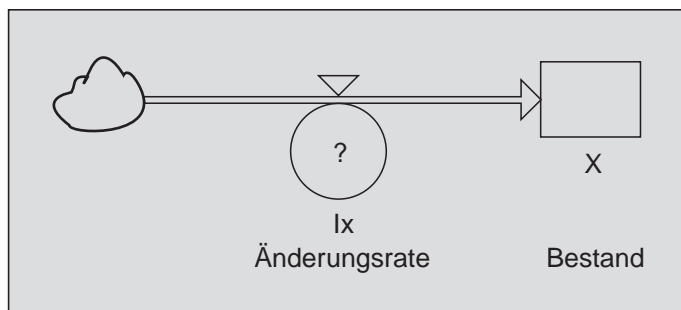
## 1 Dynamische Physik und computerunterstützte Modellbildung

Dieser Aufsatz soll an Beispielen aus der Wärmelehre zeigen<sup>1)</sup>, wie ein Physikkurs, der auf mengenartigen Größen aufbaut, das Erlernen von computerunterstützter Modellbildung erleichtert und umgekehrt, der Umgang mit solchen Modellbildungssystemen das Physiklernen unterstützt. Der Karlsruher Physikkurs, im weiteren kurz KPK [2] genannt, ist ein Vertreter der genannten Klasse von Physikkursen.

In erster Linie wollen wir didaktische Anregungen geben und haben, damit die Lehrerin bzw. der Lehrer in seiner Wahl der Methodik nicht zu stark eingeschränkt ist, darauf verzichtet, die direkte Umsetzung in den Unterricht darzustellen. Auch wollten wir vermeiden, dass die „Didaktik des Werkzeuges“ von Fragen der Methodik überdeckt wird. Soviel sei doch gesagt: Das Werkzeug „computerunterstütztes Modellbildungssystem“ wird benutzt, um nicht triviale, quantitative Aussagen zu machen, die zunächst einmal die Alltagserfahrung bestätigen und somit dem Schüler Vertrauen in sein „physikalisches Weltbild“ stärken und andererseits Aussagen liefert, die anschließend im Experiment überprüft werden. Um diesen Forderungen Gewicht zu verleihen, haben wir an vereinzelt Stellen Messkurven aus unserem Unterricht beigefügt. Wie die Werte der in den Computermodellen vorkommenden Konstanten ermittelt werden können, wird in Abschnitt 7 aufgezeigt.

Wir verwenden die Software POWERSIM™ [3], mit der man Modelle mit Hilfe graphischer Symbole editieren kann. Zu diesem Vorteil kommt noch, dass die Fluss-Diagramm-Symbole, wie sie von POWERSIM™ benutzt werden, es leicht machen, eine anschauliche Vorstellung von mengenartigen Größen zu erzeugen. Im Modell (Abb. 1) erkennt man das Symbol für einen Bestand. Dieser repräsentiert eine Größe  $X$  z. B. die physikalische Größe Entropie. Ein Doppelpfeil zeigt aus einer Wolke in das Bestandsymbol. Ist  $X$  die Entropie, so steht der Doppelpfeil für den

Abb. 1: Einige POWERSIM™ -Symbole



Strom der Entropie, die angehäuft wird. Die Tatsache, dass der Doppelpfeil in einer Wolke beginnt, besagt, dass es für das Modell unerheblich ist, woher die Entropie kommt<sup>2)</sup>.

## 2 Vorkenntnisse der Schüler

So wie man in der Mechanik die Bewegung von Körpern mit den Größen Impuls und Geschwindigkeit beschreibt, so wählt man in der Thermodynamik ein entsprechendes Größenpaar: Die Entropie  $S$  und die Temperatur  $T$ . Wir zeigen die wichtigsten Regeln über Entropie und Temperatur, die für das Verständnis der folgenden Modelle wichtig sind. Die Regeln werden besonders einfach, wenn man die enge Beziehung zwischen dem Wort Wärme in der Alltagssprache und der physikalischen Größe Entropie ausnützt<sup>3)</sup>. (1) Je höher die Temperatur eines Körpers, desto größer sein Entropieinhalt. Das Symbol der Entropie ist  $S$ , das Symbol der Temperatur ist  $T$ <sup>4)</sup>. Die Maßeinheit für Entropie ist Carnot, abgekürzt Ct<sup>5)</sup>. (2) Entropie strömt freiwillig von Stellen höherer zu Stellen niedrigerer Temperatur. Eine Temperaturdifferenz ist ein Antrieb für einen Entropiestrom. Für seine Stärke schreiben wir:

$$I_S = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad 6)$$

Er hängt von der Temperaturdifferenz zweier Orte ab und es gilt: Je höher diese Differenz ist, desto stärker ist der Strom von dem einen zum anderen Ort. Weiter hängt er von der Art der wärmeleitenden Verbindung ab. So setzt jeder Wärmeleiter einem Entropiestrom einen Widerstand  $R_S$  entgegen. Je höher der Wert dieses Widerstandes, umso kleiner wird der Entropiestrom zwischen den beiden Orten.

<sup>1)</sup> Für Beispiele aus anderen Teilbereichen der Physik siehe [1] und <http://www.pohlig.de>

<sup>2)</sup> Nähere Informationen zu dem Modellbildungssystem sind ebenfalls auf der HomePage <http://www.pohlig.de> zu finden.

<sup>3)</sup> Drei Grundsätze des KPKs:

1. Entropie von Anfang an.  
2. Nütze die Mengenartigkeit der Entropie aus.  
3. Nütze den Vorteil der Übereinstimmung des alltagsprachlichen „Wärme“ und der physikalischen Größe Entropie [4]

<sup>4)</sup>  $T$  ist die Abkürzung für die absolute Temperatur. Ihre Maßeinheit ist Kelvin, abgekürzt K. Ist die absolute Temperatur eines Körpers 0 K, dann ist sein Entropieinhalt 0 Ct.

<sup>5)</sup> Bei der Einheit 1 Ct handelt es sich um eine SI-kompatible Maßeinheit, von der im Verlauf des KPK gezeigt wird, dass 1 Ct = 1 J/K ist.

<sup>6)</sup> Da  $\Delta S/\Delta t$  die Änderung des Entropieinhaltes des Körpers darstellt, kann diese als Maß für den Strom in Körper nur dann verwendet werden, wenn wir Entropieerzeugung zunächst nicht zulassen.

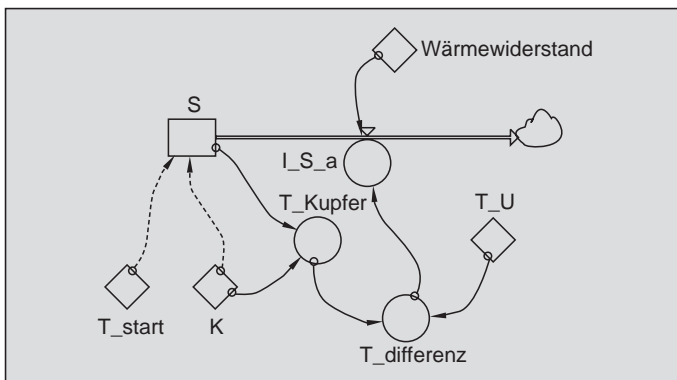
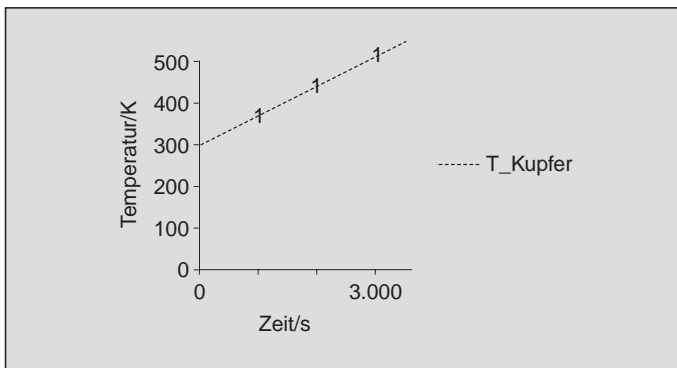
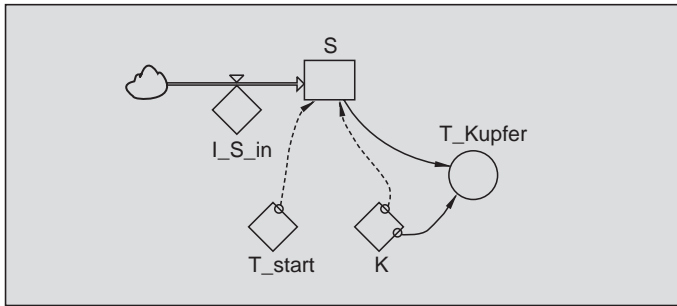


Abb. 2 (oben): Aufheizen eines Körpers. Die gepunktete Verbindungspfeile dienen lediglich dazu, den Startwert der Entropie für den ersten Schleifendurchgang zu berechnen.

Abb. 3 (Mitte):  $t$ - $T$ -Diagramm. Im Programm gibt 3.000 für 3000 s an.

Abb. 4 (unten): Das Modell „Abkühlen von Körpers“

### 3 Das Ausgangsmodell „Heizen eines Körpers“

Schüler lernen, dass der Entropieinhalt eines Körpers mit der Temperatur steigt. Im „Normalfall“ sind  $S$  und  $T$  nicht zueinander proportional. Für feste Körper, wie z. B. Kupfer kann man mit guter Näherung

$$S = K \cdot T$$

annehmen (vgl. dazu Abschnitt. 8), was die Thermodynamik fester Stoffe gerade für Anfänger leichter macht. Dabei kann man die Variable  $K$  als eine Art Entropiekapazität<sup>7)</sup>

<sup>7)</sup> Wissenschaftlich korrekt wird die Entropiekapazität  $C$  definiert durch:

$$C = \frac{\partial S(T, p, N)}{\partial T}$$

Unsere Art der Entropiekapazität ist analog zur Ladungskapazität eines Kondensators konstruiert. Während also die elektrische Ladungskapazität als Quotient  $C = Q/U$  definiert ist, ist die Entropiekapazität üblicherweise als Differentialquotient definiert.

verstehen. Sie beschreibt den quantitativen Zusammenhang von Entropieinhalt eines Körpers und seiner Temperatur. Normalerweise ist  $K$  keine Konstante, sondern eher eine komplizierte Funktion. Für feste Körper ist  $K$  eine relativ einfache Funktion und ihr Wert kann mit guter Näherung als konstant angenommen werden, was die Thermodynamik für feste Stoffe gerade für Anfänger leichter macht.

Abb. 2 zeigt das Modell „Aufheizen eines Körpers“. Für 1 kg Kupfer z. B. ist  $K$  ungefähr 1,5 Ct/K. In den Modellen wollen wir also bei Kupfer bleiben. Wir starten bei einer Temperatur von  $T = 290 \text{ K} \approx 20^\circ \text{ C}$ . Die Stärke des Entropiestromes in den Körper wurde willkürlich auf 0,1 Ct/s gesetzt. Im Modell wird die Temperatur des Körpers definiert durch:

$$T := \frac{S}{K}$$

Abb. 3 zeigt die Zunahme der Temperatur. In 1 h = 3600 s steigt sie auf 530 K  $\approx 260^\circ \text{ C}$ . Das Modell ist aber unrealistisch, denn mit zunehmender Temperatur wird es immer schwieriger, die Entropie im Körper zurückzuhalten, wenn die Temperatur außerhalb des Körpers niedriger ist als im Körper selbst. Also müssen wir unser Modell modifizieren.

### 4 Das Modell „Abkühlen eines Körpers“

Bevor wir unser Modell der Realität anpassen, wollen wir zunächst noch ein anderes einfaches Modell betrachten: Das Abkühlen eines Körpers (Abb. 4). Wie schon beim ersten Modell verwenden wir wieder Kupfer mit der Masse 1 kg und starten bei einer Temperatur von  $T_{\text{Cu}} = 530 \text{ K} \approx 260^\circ \text{ C}$ . Die Umgebung hat die Temperatur  $T_U = 290 \text{ K} \approx 20^\circ \text{ C}$ . Wegen des Temperaturunterschiedes zwischen Innerem des Körpers und seiner Umgebung haben wir einen Antrieb für einen Entropiestrom aus dem Körper heraus. Er kühlt ab. Wir gehen dabei davon aus, dass die Entropie, die den Körper verlässt, in einen so großen Bereich verteilt wird, d. h., dass sie so verdünnt wird, dass ein Temperaturanstieg der Umgebung nicht gemessen werden kann. Für den Entropiestrom  $I_{S,a}$  gilt

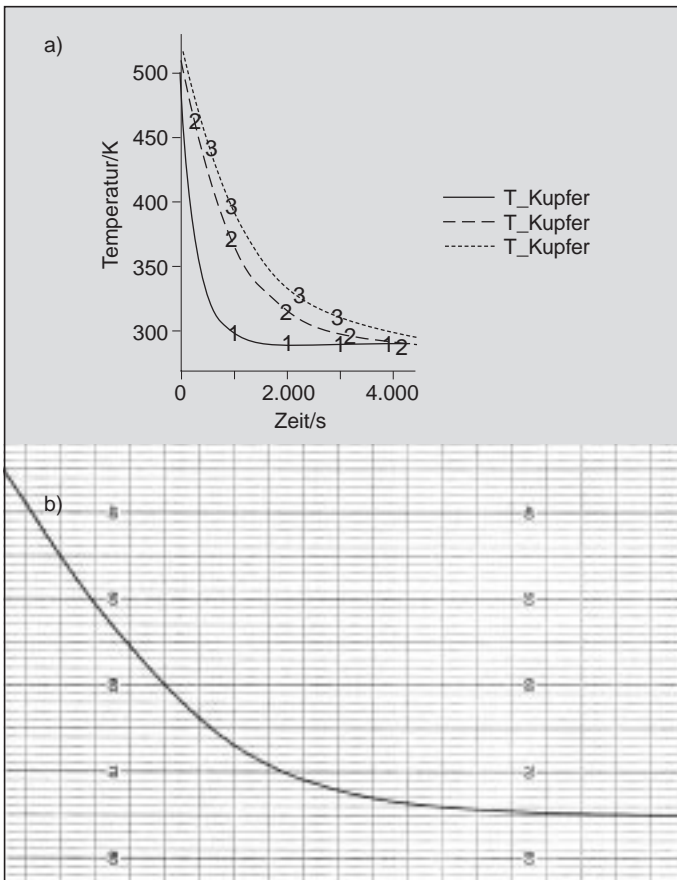
$$I_{S,a} = \frac{\Delta T}{R_S},$$

wobei  $\Delta T$  die Differenz  $T_{\text{Cu}} - T_U$  ist. Diese dem Ohm'schen Gesetz analoge Gleichung kann auf verschiedene Weisen gewonnen werden. Auf die möglichen unterrichtlichen Varianten soll hier nicht näher eingegangen werden.

Abb. 5a zeigt die Abkühlungskurven ( $t$ - $T$ -Diagramme) für drei verschiedene Wärmewiderstände, d. h. der Körper wurde mit drei verschiedenen Materialien eingepackt. Geeignet gewählte Verpackungsmaterialien bestätigen im Experiment die vom Modell berechneten Kurven qualitativ (Abb. 5b).

### 5 Das realistischere Modell für das Aufheizen eines Körpers

Es ist prinzipiell schwierig, die in einem Körper angehäufte Entropie an ihrem Entweichen zu hindern, und dies wird um so schwieriger, je größer der Temperaturunterschied



konstanter Entropiestrom  $I_{S,i} = I_{S_i} = 0,1 \text{ Ct/s}$  in den Körper lässt dessen Temperatur ansteigen (Abb. 7). Der Entropiestrom  $I_{S,a} = I_{S_a}$  startet bei  $0 \text{ Ct/s}$  und steigt dann an, bis ein Fließgleichgewicht bei  $I_{S,i} = I_{S,a}$  erreicht ist.

Der Körper hat dann seine Grenztemperatur bei  $350 \text{ K}$  erreicht. Eine vergleichbare Situation haben wir beim Kühler eines Autos mit Kühlflüssigkeit vorliegen. Die Grenztemperatur entspricht der Betriebstemperatur des Motors. Wir gehen dabei davon ab, dass bei verschiedener Belastung des Motors der Entropiestrom in den Kühler unterschiedlich stark sein kann und ein Thermostat den Abfluss der Entropie so steuert, dass die Grenztemperatur immer im gewünschten Bereich bleibt.

Für eine zweite Simulation wird unser Körper auf eine Temperatur von deutlich unter  $290 \text{ K}$  gebracht. Die Temperatur der Umgebung, der Entropiestrom in den Körper und der Wärmewiderstand sollen ihre Werte behalten. Abb. 8 zeigt, was geschieht: Wie bei der ersten Simulation steigt die Temperatur wieder auf die Grenztemperatur von ca.  $350 \text{ K}$ . Der Entropiestrom  $I_{S,a} = I_{S_a}$  startet bei ungefähr  $-0,15 \text{ Ct/s}$ . Da zu Beginn der Simulation die Temperatur der Umgebung höher ist als die des Körpers, muss man zum konstanten Entropiestrom in den Körper noch einen weiteren hinzufügen, der ebenfalls in ihn hinein zeigt. Das Vorzeichen von  $I_{S,a}$  ist zunächst negativ und wechselt dann zu positiv. Es liegt nahe, den Vorzeichenwechsel als Änderung der Richtung des Entropiestroms zu verstehen.

Abb. 7:  $t$ - $T$ -Diagramme (a),  $t$ - $I_{S_i}$  und  $t$ - $I_{S_a}$ -Diagramm mit  $T_{\text{start}} = T_{\text{Umgebung}} = 290 \text{ K}$ . Ein konstanter Entropiestrom  $I_{S_i} = 0,1 \text{ Ct/s}$  zeigt in den Körper (b). Bei  $t = 4000 \text{ s}$  hat sich das thermische Gleichgewicht eingestellt. In diesem Gleichgewichtszustand hat der Körper eine Temperatur von ca.  $350 \text{ K}$  erreicht.

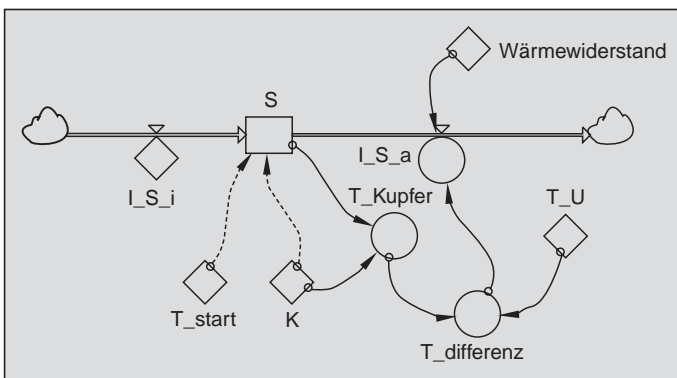


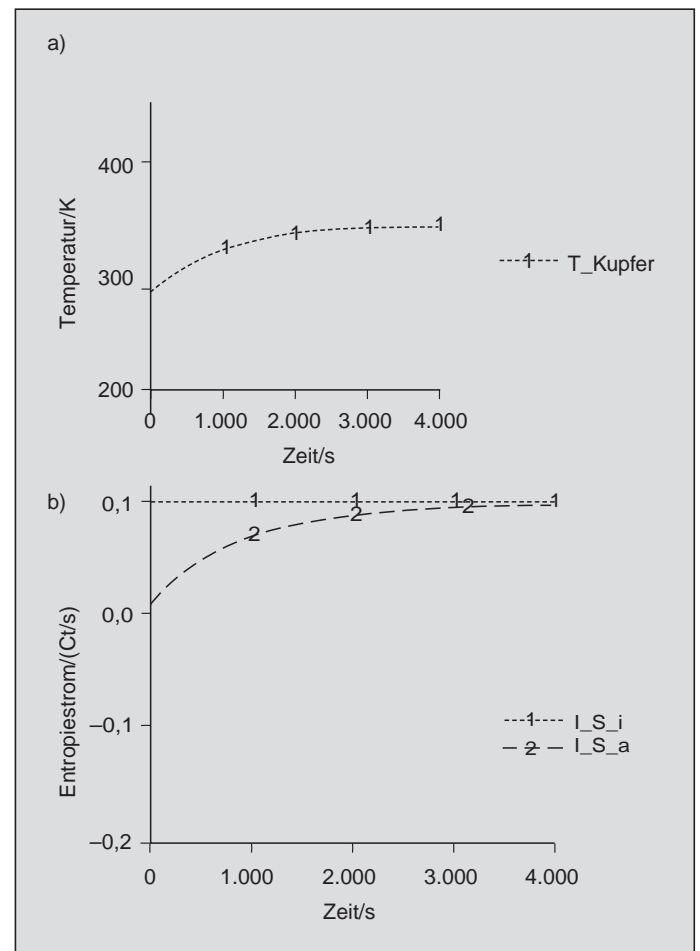
Abb. 5 (oben):  $t$ - $T$ -Diagramme,  $R_s = 200 \text{ Ks/Ct}$  -1-,  $R_s = 600 \text{ Ks/Ct}$  -2-;  $R_s = 800 \text{ Ks/Ct}$  -3- (a),  $t$ - $T$ -Diagramm mit dem  $t$ - $y$ -Schreiber aufgezeichnet (b)

Abb. 6 (unten): Das verbesserte Modell „Aufheizen eines Körpers“

zwischen aufgeheiztem Körper und Umgebung ist. Oder um ein Bild zu gebrauchen: In der Thermodynamik ist es schwierig, ja fast unmöglich, einen „Wassereimer ohne Löcher“ zu bauen<sup>(8)</sup>. Um ein realistischeres Modell des Heizens zu erhalten, müssen wir lediglich unsere beiden Modelle, nämlich das einfache „Heizen“ und das „Abkühlen“ miteinander kombinieren (Abb. 6).

In unserer ersten Simulation mit dem neuen Modell ist die Temperatur des Körpers gleich der Temperatur der Umgebung ( $290 \text{ K}$ ), d. h. zu Beginn der Simulation befinden sich Körper und Umgebung im thermischen Gleichgewicht. Ein

<sup>8)</sup> Das ist ganz anders in der Elektrodynamik. In einem Kondensator kann man elektrische Ladung speichern, ohne dass man diese wieder verliert, vorausgesetzt, die Spannung zwischen den Platten ist nicht zu hoch. Der Grund dafür ist, dass man sehr effektive elektrische Widerstände (= Isolatoren) bauen kann. Die „Löcher in einem elektrischen Eimer“ sind also geschlossen. Es ist also viel einfacher, elektrische Ladung auf einem Körper längere Zeit zu halten als Entropie in einem Körper.



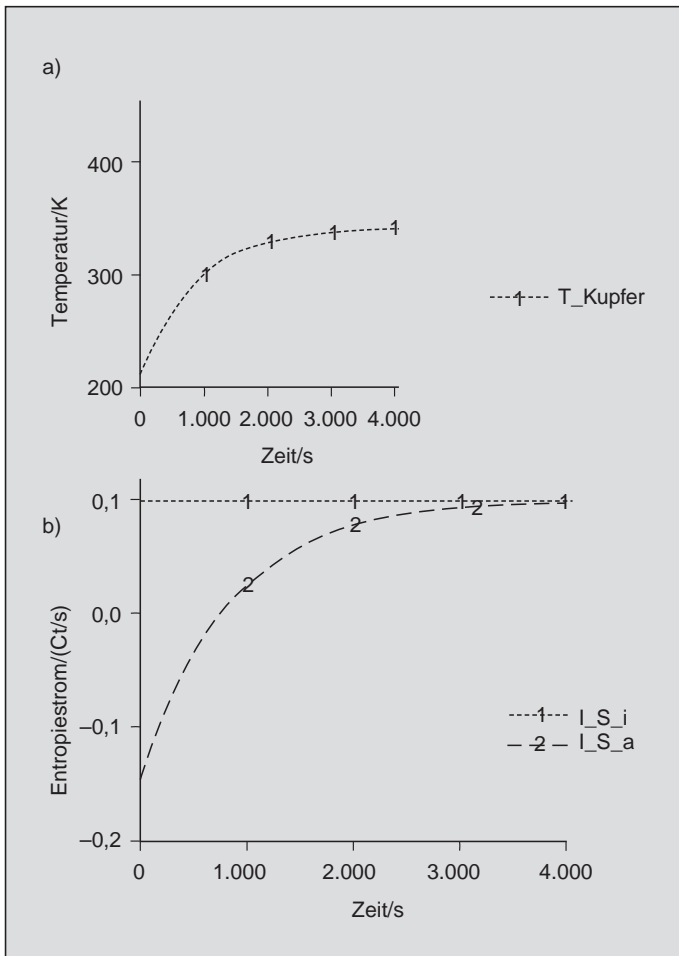


Abb. 8: Beim Start der Simulation hat der Körper eine niedrigere Temperatur als seine Umgebung und wird auf eine Temperatur über der Umgebungstemperatur aufgeheizt (a). Bei knapp unter 1000 s ändert der Entropiestrom  $I_{S,a}$  seine Richtung und zeigt dann nicht mehr in den Körper, sondern aus dem Körper heraus (b).

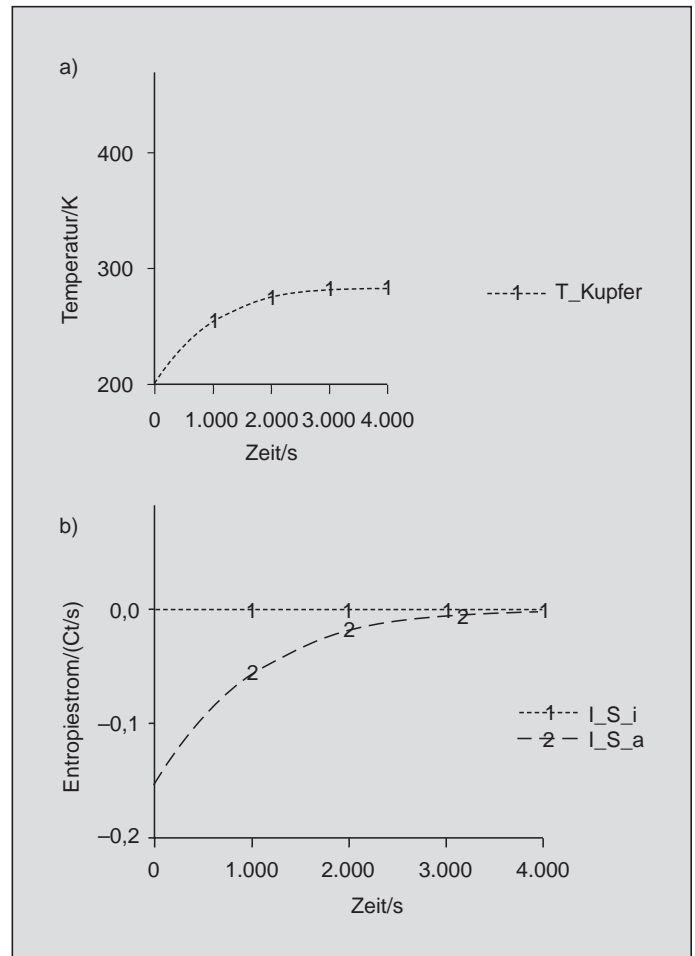


Abb. 9: Der Entropiestrom hat negatives Vorzeichen,  $I_{S,a}$  zeigt also in den Körper. Doppelpfeil im Modell und Richtung des Stroms der physikalischen Größe sind entgegengesetzt.

Unsere Vermutung soll durch eine dritte Simulation erhärtet werden. Wir wählen die gleichen Bedingungen wie in der letzten Simulation, außer dass wir  $I_{S,i} = 0$  setzen. Trotzdem wird der Körper geheizt. Das Resultat der Simulation deckt sich mit unserer täglichen Erfahrung (Abb. 9), denn die Temperatur steigt und die dafür nötige Entropie kann nur von außen kommen. Damit ist gesichert, dass ein Vorzeichenwechsel die Richtung des Stromes umkehrt. Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil von Modellbildungssystemen: Stärke und Richtung von Strömen – hier des Entropiestroms – werden in einem Maße verdeutlicht, wie es im realen Experiment kaum geschehen kann. Stärke und Richtung von Strömen sind aber wichtig für das Verständnis von Fließgleichgewichten.

Unser Modell taugt auch für die auf den ersten Blick etwas ungewöhnlichere Situation, nämlich das Heizen eines Körpers, der zu Beginn eine höhere Temperatur hat als seine Umgebung. Abb. 10 zeigt: Der Entropiestrom aus dem Körper ist größer als der, der in ihn hineinzeigt. Somit kühlt er trotz des „Heizens“ ab und erreicht schließlich wieder die Grenztemperatur von ca. 350 K.

Diese Situation liegt z. B. vor, wenn ein Mensch im Winter, ohne ausreichende Kleidung, vom Warmen ins Kalte geht. Trotz der körpereigenen Heizung kühlt der Körper ab, bis ein Anstieg der eigenen Entropieproduktion<sup>9)</sup> zusammen

mir geeigneter Kleidung wieder eine akzeptable Temperatur garantiert. Leistet im Extremfall Entropieproduktion und Kleidung (= Wärmewiderstand) nicht das Gewünschte, so kühlt der Körper so weit ab, dass er nicht mehr lebensfähig ist.

Die geschilderte Situation provoziert die Frage nach der Rolle der Wärmedämmung, also des Wärmewiderstandes. In einer weiteren Simulationsreihe starten wir jedes Mal im thermischen Gleichgewicht, d. h. Körper und Umgebung haben die gleiche Temperatur, z. B. 290 K (Zimmertemperatur). Beim zweiten und dritten Durchgang ändern wir den Wert des Wärmewiderstandes:  $R_{S,1} = 200 \text{ K}/(\text{Ct/s})$ ,  $R_{S,2} = 600 \text{ K}/(\text{Ct/s})$ ,  $R_{S,3} = 800 \text{ K}/(\text{Ct/s})$ . Wie die Diagramme von Abb. 11 zeigen, ist die Grenztemperatur umso höher und wird umso später erreicht, je größer der Wärmewiderstand ist.

Was passiert nun, wenn der Wert des Wärmewiderstandes nach Erreichen eines Fließgleichgewichts erhöht wird? Abb. 12 zeigt das Ergebnis. Vergleichbar einem Fallschirmspringer, der vor und nach dem Öffnen seines Fallschirm zwei Grenzgeschwindigkeiten hat, gibt es hier zwei Grenztemperaturen. Nach Erreichen des ersten Fließgleichgewichts – der Entropiestrom in den Körper hat den gleichen Wert wie der abfließende – wird der Entropiewiderstand erhöht. Dadurch wird der Entropieabfluss drastisch reduziert. Da der zufließende Entropiestrom seinen Wert beibehält, steigt der Entropieinhalt und damit die Temperatur. Als Folge der ansteigenden Temperaturdifferenz nimmt

<sup>9)</sup> Der Entropiestrom  $I_S$  ist hier durch eine Erzeugungsrate ersetzt, was an dem Modell prinzipiell nichts ändert.

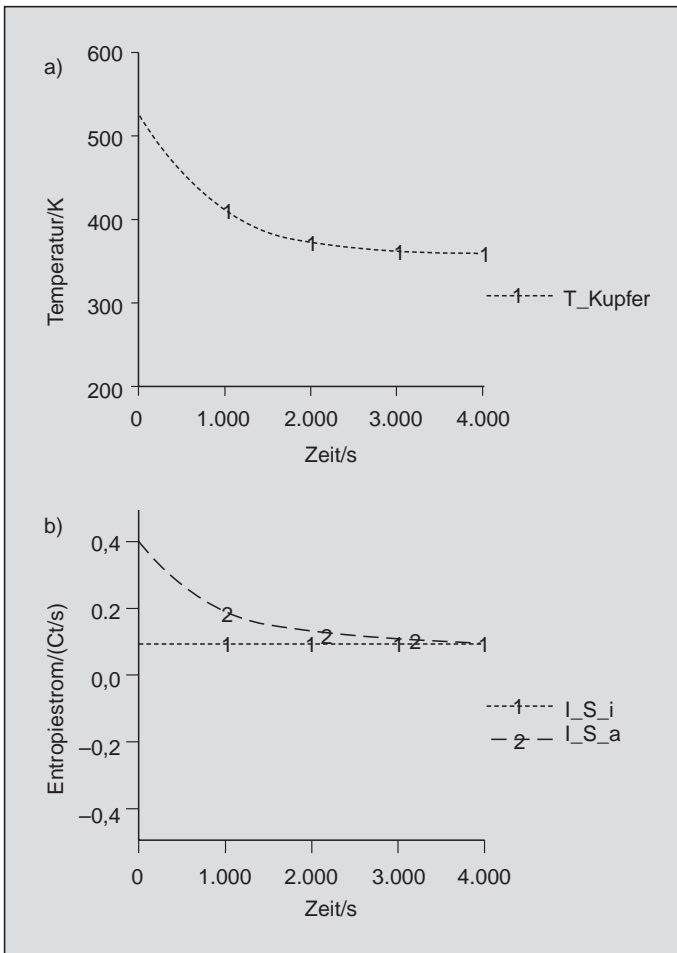


Abb. 10: Der Nettoentropiestrom ist negativ (b), so dass der Körper so lange abkühlt, bis er wieder eine Grenztemperatur von ca. 350 K erreicht hat (a)

der Entropieabfluss wieder zu, bis er schließlich den Wert des Zuflusses erreicht. Es stellt sich ein Fließgleichgewicht ein, jetzt aber bei einer höheren Temperatur. Auch zu diesem Modell gibt es einen interessanten Bezug zur Realität: Die globale Erwärmung unserer Erde

### 7 Globale Erwärmung

Das letzte Modell erklärt auch, warum die Erde bisher eine relativ konstante Durchschnittstemperatur halten konnte. An Stelle des Kupfers tritt die Erde. Mit dem Sonnenlicht strömt Entropie von der 6000 K heißen Sonnenoberfläche zur Erde. Dieser Entropiestrom entspricht  $I_{S_i}$  in unserem Modell. Er kann als konstant angenommen werden. Die Atmosphäre, die unsere Erde umhüllt, spielt die Rolle des Wärmewiderstandes. Der Grund dafür, dass die Erde ihre Temperatur beibehält, liegt in einem zweiten Entropiestrom, der von der Erdoberfläche in den Weltraum zeigt. Auch dieser Entropiestrom wird von Licht getragen. Es handelt sich in diesem Fall um infrarotes Licht. Im Laufe der Geschichte unserer Erde hat sich ein Fließgleichgewicht bei einer Temperatur von ca. 290 K eingestellt. Eine Zunahme der Konzentration von Kohlenstoffdioxid und verschiedener anderer Treibhausgase erhöht den Wert des Wärmewiderstandes. In unserem Modell führt die Zunahme des Wärmewiderstandes zu einer Reduzierung des En-

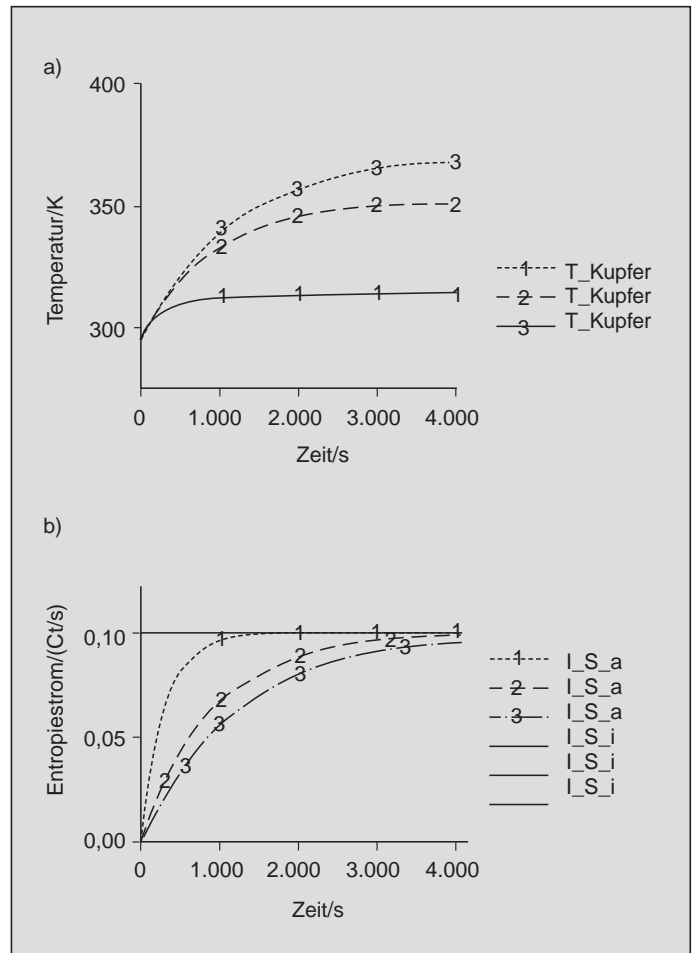


Abb. 11: Die  $t$ - $T$ -Diagramme bei verschiedenen Wärmewiderständen (a). Zugehörige Entropiestromstärke bei  $R_{S,1} = 200$  K/(Ct/s) -1-,  $R_{S,2} = 600$  K/(Ct/s) -2- und  $R_{S,3} = 800$  K/(Ct/s) -3-.

tropieabflusses, so dass sich die Grenztemperatur erhöht. An dieser Stelle werden die Schüler für mögliche Konsequenzen einer  $\text{CO}_2$ -Zunahme sensibilisiert, gleichzeitig auch auf die Grenzen des Modells aufmerksam gemacht. Sie lernen, dass die Übertragung auf die Situation unserer Erde problematisch ist, da das einfache Modell zu wenig Informationen enthält, um eine zuverlässige, quantitative Vorhersage über die klimatische Entwicklung machen zu können.

### 8 Über die Konstanten der Modelle

Konstanten spielen in Modellen eine wichtige Rolle. Ermittelt man sie aus Experimenten, so dienen die damit entworfenen Modelle dazu, im Alltag und im Physikunterricht gesammelte Erfahrungen qualitativ und auch quantitativ zu überprüfen. Bezieht man die Werte von anderer Stelle, so erlauben die Modelle Vorhersagen, die dann im Experiment überprüft werden können. Stimmen die Vorhersagen des Modells mit den Experimenten nicht überein, so ergeben sich fruchtbare Diskussionen über die Gültigkeitsgrenzen des jeweils verwendeten Modells. Es muss aber gleichzeitig kritisch erfragt werden, ob das vom Schüler erworbene physikalische Wissen einer Erweiterung oder gar einer Korrektur bedarf. Die in unserem Aufsatz verwendeten Modelle benutzen zwei Konstanten, deren Werte wir in den vorange-

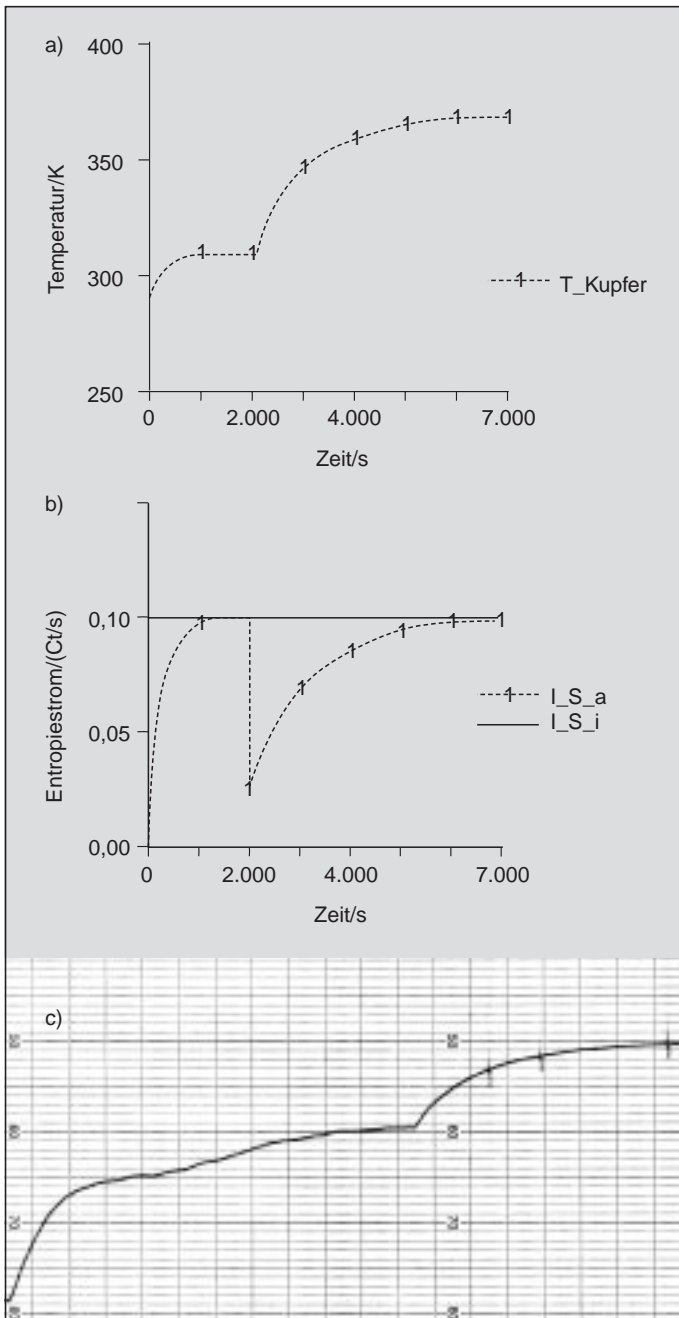


Abb. 12: Temperaturverlauf, wenn nach Erreichen eines thermischen Gleichgewichtes beim Heizen, der Wärmewiderstand abrupt erhöht wird (a). Zugehöriger Verlauf der Entropiestromstärke (b). Da sich Wasser für kontrolliertes Aufheizen besser eignet, wurde, abweichend von den Modellen, beim Experimentieren statt Kupfer Wasser aufgeheizt. Die Ergebnisse der Simulation lassen sich dann nur noch qualitativ mit denen des Experimentes (c) vergleichen.

gangenen Abschnitten zunächst willkürlich setzen. Es handelte sich dabei um die „Entropiekapazität“  $K$  und den Wärmewiderstand. In Abb. 13 (aus [2]) ist für Kupfer mit der Masse 1 kg eine Ursprunggerade eingezeichnet, die in erster Näherung den Zusammenhang zwischen Entropieinhalt und Temperatur beschreibt. Man kann für diese (spezifische) „Entropiekapazität“  $K$  einen ungefähren Wert von  $C = 1,5 \text{ Ct/K}$  ablesen. Eine tiefere Untersuchung von Entropieinhalt und Temperatur wird geradezu provoziert und ist beabsichtigt. Da Wärmewiderstand  $R_S$  und elektrischer Widerstand  $R_O$  gleich „gebaut“ sind<sup>10)</sup>, nämlich  $R_O =$

<sup>10)</sup> Der Zusammenhang von Antrieb und Stärke von Strömen mengenartiger Größen spielt im KPK eine zentrale Rolle. Gleich, um welche mengenartige Größe  $X$  es sich handelt, für den Wert eines Widerstandes gilt  $R_X = \text{Antrieb}/I_X$ .

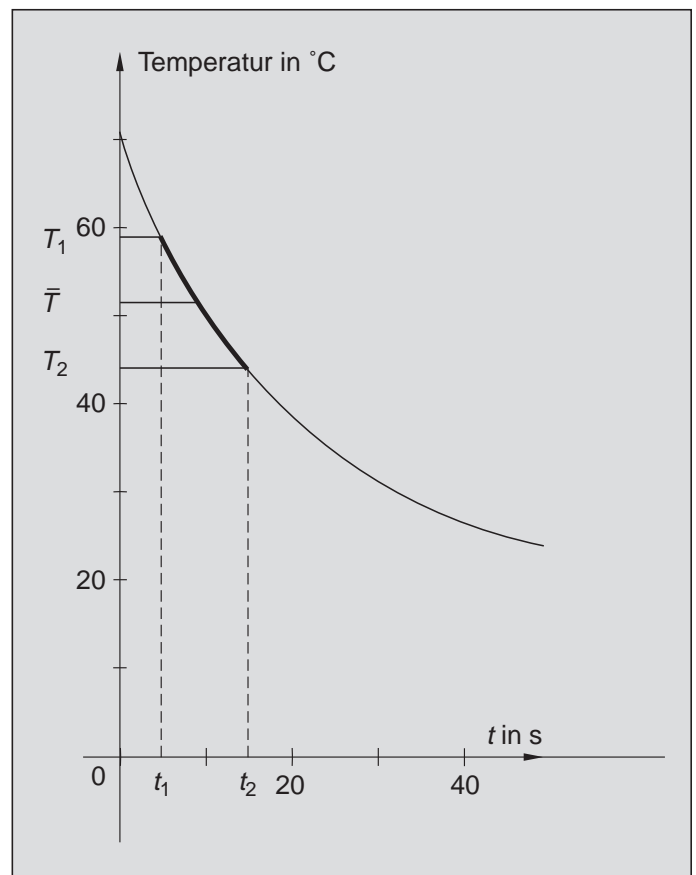
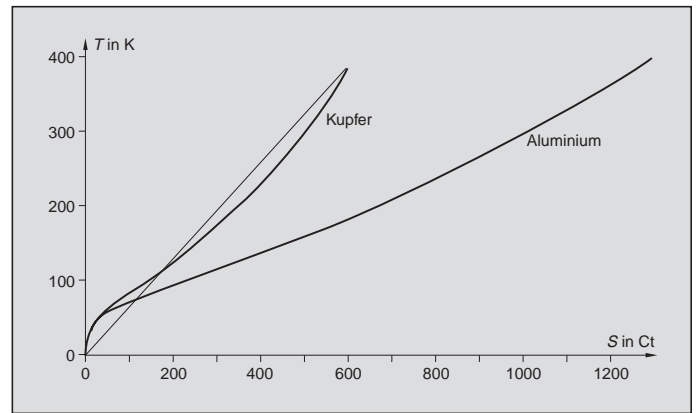


Abb. 13 (oben): Zusammenhang von Entropie und Temperatur bei 1 kg Kupfer und 1 kg Aluminium.

Abb. 14 (unten):  $t$ - $T$ -Diagramm zur Bestimmung des Wärmewiderstandes. Aus den Temperaturen, die in  $^{\circ}\text{C}$  gemessen sind, können durch einfaches Umrechnen die absoluten Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  und mit  $K$  die zugehörigen Entropieinhalte  $S_1$  und  $S_2$  ermitteln.

$U/I_O$  für den elektrischen Widerstand und  $R_S = \Delta T/I_S$  für den Wärmewiderstand, fragt man, ob es auch entsprechende Methoden für die Bestimmung der Widerstandswerte  $R_S$  und  $R_O$  gibt. Eine praktikable, aber etwas ungewohnte Methode, den Wert eines elektrischen Widerstand zu messen, wäre, ihn aus der Aufnahme einer Entladungskurve eines Kondensators mit bekannter elektrischer Ladungskapazität zu bestimmen, wenn dieser über den Widerstand entladen wird. Die gleiche Methode, nun angewandt, um den Wärmewiderstand zu messen, ist praktikabel, aber nicht mehr ungewohnt.

Um den Wärmewiderstand  $R_S$  zu bestimmen, betrachten wir Abb. 14. Sie zeigt eine typische Abkühlkurve. Aus den Temperaturen, die in  $^{\circ}\text{C}$  gemessen sind, können durch einfaches Umrechnen die absoluten Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$

bestimmt werden. Aus diesen Temperaturen unter zu Hilfenahme von  $K$  lassen sich die zugehörigen Entropieinhalte  $S_1$  und  $S_2$  ermitteln. Wir wählen ein kurzes Zeitintervall, in dem mit guter Näherung der Entropiestrom als konstant angenommen werden kann. Für den Antrieb  $\Delta T$  des Entropiestroms gilt dann

$$\Delta T = \bar{T} - T_U = \frac{T_1 + T_2}{2} - T_U$$

Hier ist  $\bar{T}$  die mittlere Temperatur des Körpers beim Abkühlen. Der Wert des Wärmewiderstandes ergibt sich aus den Messwerten zu:

$$R_S = \frac{\Delta T}{I_S} = \frac{\bar{T} - T_U}{\frac{S_1 - S_2}{t_1 - t_2}} = \frac{\bar{T} - T_U}{\frac{K(T_1 - T_2)}{t_1 - t_2}} = \frac{(t_1 - t_2)(\bar{T} - T_U)}{K(T_1 - T_2)}$$

**Literatur**

[1] *M. Pohlig, H. M. Strauch*: Bewegungen im KPK mit Modus, zwei ausgewählte Beispiele, PdN-Ph 7/44 Jg. 1995.  
 [2] Unterrichtsmaterialien (Schüler- sowie Lehrerbegleithefte) zum Karlsruher Physikkurs können über den Aulis-Verlag und in Baden-Württemberg über LEU in Stuttgart bezogen werden  
 [3] PowerSim: The Complete Software Tool for Dynamic Simulation; Powersim erfordert win3.1x, win95, win98 oder winNT, ModellData AS; P.O. Box 206, N-5100 Isdalstø, Norway, E-mail: powersim@modeld.no  
 [4] *F. Herrmann*: Teaching thermodynamics: Entropy from the Beginning; Proceedings of the Taormina Conference on Thermodynamics, Taormina, Italy, 18-22 February 1991; Atti Accademia Peloritana dei Pericolanti Classe I de Scienza Fis. Mat. e Nat. Vol LXX (1992) – Supplemento N. 1

**Anschriften der Verfasser:**

*Michael Pohlig*, Schaafweide 21, 76467 Bietigheim, *Hans Michael Strauch*, Lincolnstr. 32, 67434 Neustadt