

Die Wärmebildkamera in der Elektrizitätslehre

Yvonne Weichsel, Alexander Strahl, Rainer Müller

1 Schülervorstellungen erschweren das Lernen

Die Elektrizitätslehre ist für Schülerinnen und Schüler nicht einfach. In den vergangenen Jahrzehnten hat die fachdidaktische Forschung eine Fülle von immer wiederkehrenden Schülervorstellungen aufgedeckt, die das Lernen erschweren (einen Überblick gibt v. Rhöneck [1]). Verbreitet ist z. B. die *Stromverbrauchsvorstellung*: Hinter einem Lämpchen ist die Stromstärke geringer als davor, weil das Lämpchen einen Teil des Stroms „verbraucht“. Zwar wird man im Unterricht mit zwei Stromstärkemessgeräten experimentell zeigen, dass im Stromkreis $I = \text{const.}$ gilt, dass also die Stromstärke vor und nach dem Lämpchen gleich groß ist (Abb. 1) – oft allerdings ohne Erfolg bei den Schülern. Duit [2] berichtet zu diesem Versuch: „Das Experiment in Abb. 1 zeigt „eindeutig“, dass die Stromstärkemesser in der Hin- und Rückleitung gleich weit ausschlagen – jedenfalls demjenigen, der die physikalische Vorstellung vom Stromfluss hat. Schüler aber, die die Vorstellung haben, dass Strom in der Lampe verbraucht werde, und die demzufolge annehmen, der Strommesser in der Rückleitung müsse weniger weit ausschlagen, „sehen“ das auch: Der Zeiger schlägt eben nur ein ganz kleines Stück weniger weit aus.“

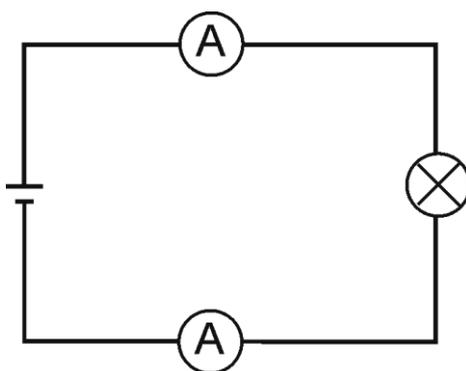


Abb. 1: Zwei Strommesser vor und hinter dem Lämpchen messen die Stromstärke

Ein erfolgversprechender Ansatz zum Überwinden dieser Lernschwierigkeit stammt von Jung und Wiesner [3]: Ein Kompass wird als Stromindikator eingesetzt. Der Kompass wird am Stromkreis entlanggeführt. Der Ausschlag der Nadel ist ein Maß für die Stromstärke im Draht. Es zeigt sich, dass die Nadel überall im Stromkreis gleiche weit ausschlägt – vor dem Lämpchen, hinter dem Lämpchen, und sogar in der Batterie (Abb. 2 (a)).

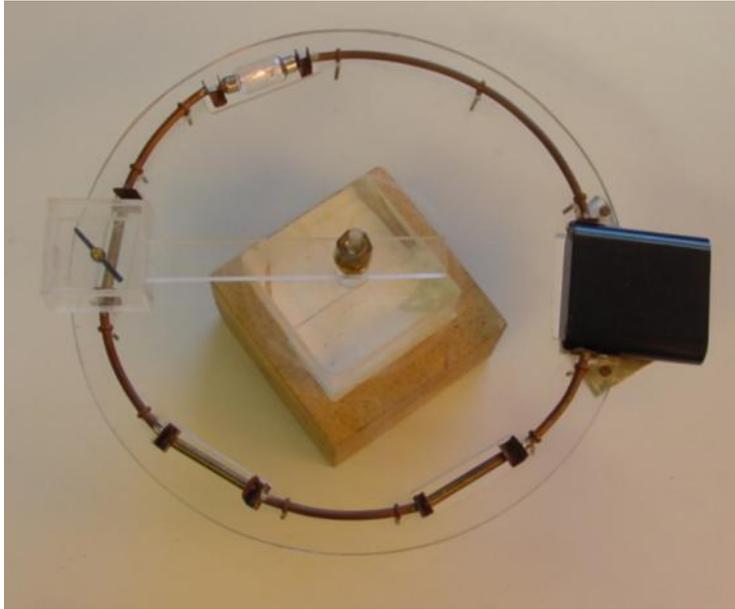


Abb. 2 (a) Die Kompassnadel schlägt vor und hinter dem Lämpchen gleich weit aus (b) Stromkreis auf einer drehbaren Plattform. Der Ausschlag der Nadel bleibt konstant (aus [4]).

Wie Untersuchungen zeigen, wird dieser Versuch von Schülerinnen und Schülern gut akzeptiert. Er wird daher auch in einigen Schulbüchern aufgegriffen [4]. Allerdings birgt er experimentelle Schwierigkeiten. Die Kompassnadel reagiert eben nicht nur auf das Magnetfeld des Drahtes, sondern auch auf das der Erde. Das Experiment kann daher im Grunde nur mit Drähten durchgeführt werden, die in Nord-Süd-Richtung verlaufen. Dies sind schlechte Voraussetzungen für die Untersuchung von geschlossenen Stromkreisen; und so behilft man sich damit, einen drehbar gelagerten Stromkreis unter der stationären Kompassnadel hinwegzudrehen (Abb. 2 (b)).

Ein weiterer interessanter Vorschlag, die Konstanz der Stromstärke im einfachen Stromkreis experimentell zu zeigen, beruht auf der Verwendung einer Strommesszange [5].

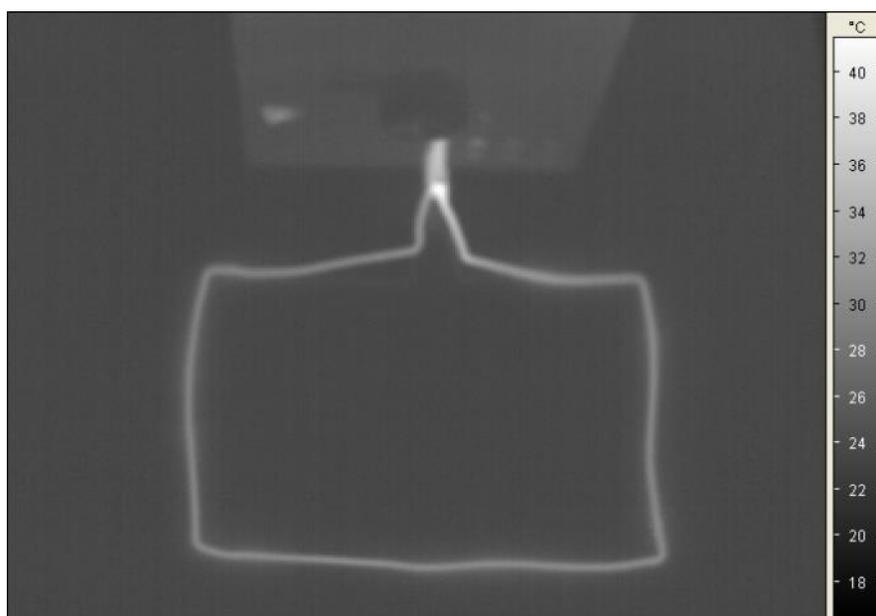


Abb. 3 Wärmebild eines einfachen geschlossenen Stromkreises

2 Stromkreisbilder mit der Wärmebildkamera

Auch mit der Wärmebildkamera kann man Stromkreise untersuchen. Dabei wird die Wärmewirkung des elektrischen Stroms zu seinem Nachweis benutzt. Abb. 3 zeigt die Wärmebildaufnahme des einfachsten aller Stromkreise: Ein einfaches Kabel zwischen Minus- und Pluspol einer Stromquelle. Für die Aufnahme wurde ein gewöhnliches, isoliertes Experimentierkabel an einen Netzwürfel angeschlossen und dieser für kurze Zeit mit 1 V betrieben. Die Wärmebildaufnahme zeigt, dass sich der Draht überall gleichmäßig erhitzt. Die Wärmewirkung des elektrischen Stroms ist überall im Stromkreis gleich. Das legt den Schluss nahe, dass auch die Stromstärke überall gleich ist.

Ähnliches ergibt sich für den Stromkreis mit „Lämpchen“. Abb. 4 zeigt ein Stück Widerstandsdraht (Isachrom-60) zwischen zwei Klemmen. In der Mitte wurde eine Wendel gewickelt, um das das Lämpchen darzustellen. Im Wärmebild sieht man, dass die Wärmewirkung des elektrischen Stroms vor und hinter dem „Lämpchen“ gleich ist.

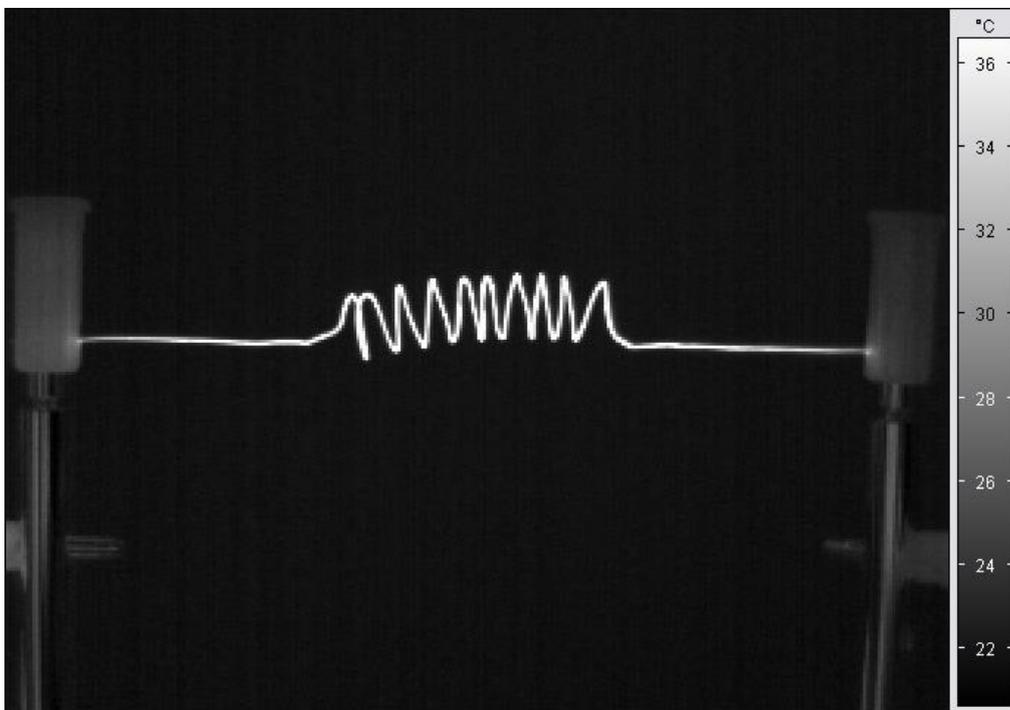


Abb. 4: Vor und hinter der Drahtwendel ist die Wärmewirkung des Stroms gleich

Der große Vorteil der Wärmebilder: Sie zeigen mit einem Blick den ganzen Stromkreis. Üblicherweise kann die Stromstärke nur punktuell an einzelnen Stellen gemessen werden. Mit der Wärmebildkamera wird es möglich, den gesamten Stromkreis auf einmal messend zu erfassen.

Im Unterricht lassen sich auf diese Weise Messgeräte durch Bilder ersetzen; hierdurch lässt sich die suggestive Kraft von Bildern nutzen. Normalerweise werden bei der Untersuchung von Stromkreisen analoge oder digitale Anzeigen abgelesen (wie in Abb. 1). In einem abstrakten kognitiven Prozess müssen sich die Schülerinnen und Schüler aus den Messwerten die Stromstärkeverteilung im Stromkreis konstruieren. Mit der Wärmebildkamera erfasst man dagegen den Stromkreis als Ganzes. Vom wahrnehmungspsychologischen Standpunkt ist der Unterschied zwischen den beiden Erkenntnismodi gewaltig: etwa wie derjenige zwischen dem Ertasten der Umwelt mit dem Stock eines Blinden und ihrem Erfassen als Ganzes beim Sehvorgang.

3 Was misst die Wärmebildkamera eigentlich?

Das Prinzip der Messung ist einfach: Überall wo Strom nicht widerstandsfrei fließt, tritt Dissipation auf, und Wärme wird nach außen abgegeben. Die dabei entstehende Wärmestrahlung wird von der Wärmebildkamera sichtbar gemacht.

Beim Betrachten der Wärmebilder in Abb. 3 und 4 haben wir stillschweigend geschlossen: Wenn die Wärmewirkung überall gleich ist, dann ist auch die elektrische Stromstärke überall gleich. Ist das erlaubt? Ist die von der Wärmebildkamera angezeigte Temperatur des Drahtes tatsächlich ein Maß für die Stromstärke im Leiter? Die Antwort lautet: Ja, solange der Widerstand überall im Stromkreis gleich ist. Man kann den Zusammenhang mit einfachen physikalischen Gesetzmäßigkeiten aufzeigen. In jedem Teilstück eines ohmschen Leiters wird ständig die elektrische Leistung $P = U \cdot I = R \cdot I^2$ umgesetzt. Die entsprechende elektrische Energie wird von der Batterie geliefert. Diese Energie wird im Draht aber nicht „angehäuft“ – er gibt in jeder Sekunde ebenso viel Energie ab wie er aufnimmt. Sie wird vollständig in Form von Wärme, speziell von Wärmestrahlung, an die Umgebung abgegeben. Ein Beispiel ist der Glühdraht in der Glühlampe. Er leuchtet, weil das Spektrum der von ihm ausgesandten Wärmestrahlung bis in den sichtbaren Bereich reicht.

Die Wärmebildkamera detektiert die vom Draht emittierte Wärmestrahlung in einem kleinen Spektralbereich im Infraroten. Wenn es sich bei dem betrachteten Gegenstand um einen thermischen Strahler handelt, kann man mit dem Planckschen Strahlungsgesetz auf die insgesamt ausgesandte Strahlungsleistung zurückschließen. Unter der Annahme, dass die Wärmeabgabe des Drahtes durch Wärmeleitung und Konvektion vernachlässigbar ist, dient die Wärmebildkamera damit als ein Messgerät für die insgesamt im Teilstück umgesetzte elektrische Leistung, also für die Größe $P = R \cdot I^2$. In Wirklichkeit wird aber nicht die gesamte elektrische Leistung als Wärmestrahlung abgegeben. Eine Faustregel aus der Wärmelehre besagt, dass bei „normalen“ Temperaturen in Luft die Wärmeübertragung durch Konvektion und durch Wärmestrahlung etwa gleich groß ist, so dass nur etwa die Hälfte der insgesamt abgegebenen Wärme in Form von Strahlung emittiert wird. Für unsere Überlegungen spielt ein konstanter Faktor aber keine Rolle.

Für die Anzeige rechnet die Kamera die gemessene Strahlungsleistung in eine Temperatur um. Für die insgesamt abgestrahlte Leistung eines thermischen Strahlers gilt das Stefan-Boltzmann-Gesetz. Mit dem Zusammenhang

$$P_{\text{gemessen}} = \text{const} \cdot \epsilon_K \cdot T_K^4 \quad (1)$$

kann die Kamera daher aus der gemessenen Strahlungsleistung auf die Temperatur des beobachteten Körpers zurückschließen (Genauerer im Artikel von Vollmer in diesem Heft). Hier ist ϵ_K der an der Kamera *eingestellte* Emissionsgrad, T_K die von der Kamera angezeigte Temperatur; die Konstante ist gerätespezifisch.

Gleichsetzen der beiden Formeln liefert den gewünschten Zusammenhang zwischen Stromstärke, Widerstand und der angezeigten Temperatur T_K :

$$R \cdot I^2 = \text{const} \cdot \epsilon_K \cdot T_K^4$$

bzw.

$$T_K = \frac{1}{(\text{const} \cdot \epsilon_K)^{\frac{1}{4}}} P^{\frac{1}{4}} = \left(\frac{R}{\text{const} \cdot \epsilon_K} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot I^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Die von der Kamera angezeigte Draht-Temperatur hängt von der Stromstärke und vom Widerstand ab. Sie stimmt mit der tatsächlichen Temperatur überein, wenn der eingestellte Emissionsgrad mit

dem des betrachteten Gegenstands übereinstimmt. Für unsere Zwecke ist von Interesse, dass der *tatsächliche* Emissionsgrad ϵ des Drahtes in die Anzeige *nicht* eingeht.

In Stromkreisen mit überall einheitlichem Widerstand ist die von der Wärmebildkamera angezeigte Temperatur ein nicht-proportionales Maß für die elektrische Stromstärke. In Abb. 3 und 4 besteht der Stromkreis aus einem durchgehenden Draht; der Widerstand ist daher im ganzen Stromkreis konstant. Der Rückschluss von der überall gleichen Wärmewirkung auf die überall gleiche Stromstärke war in diesen Fällen also berechtigt.

Üblicherweise sind Stromkreise allerdings nicht in dieser Weise aufgebaut, sondern bestehen aus Bauelementen (wie Glühlampen oder Widerständen), die durch Zuleitungen mit möglichst geringem Widerstand verbunden sind. Nach (2) wird in diesem Fall selbst bei überall konstanter Stromstärke an den Stellen mit niedrigem Widerstand eine geringere Temperatur angezeigt, weil dort die Wärmewirkung geringer ist. Man kann dann aus der Anzeige der Wärmebildkamera nicht mehr direkt auf die Stromstärke, sondern nur noch auf die jeweils umgesetzte Leistung schließen. Wie der folgende Abschnitt zeigt, lassen sich auch dann interessante Versuche durchführen, wenn man die Wärmebildkamera in dieser Weise verwendet.

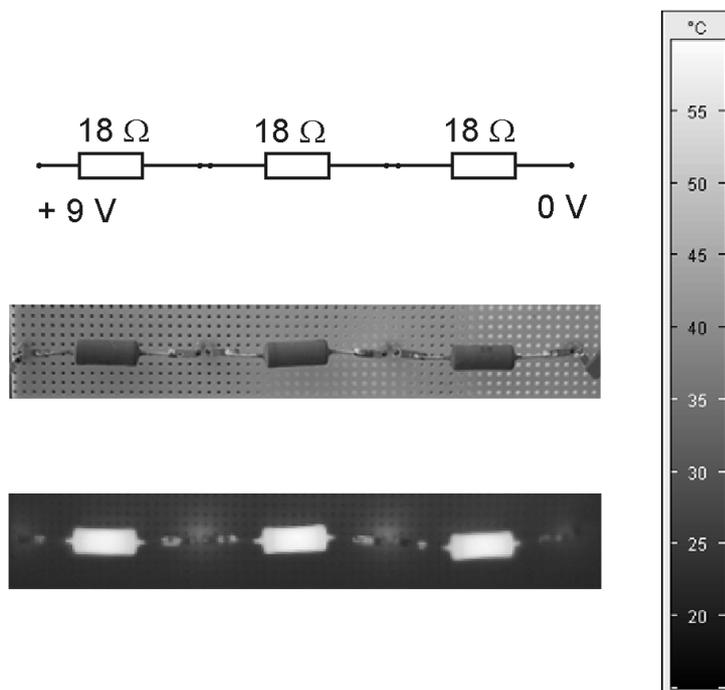


Abb. 5: Reihenschaltung von drei gleichen Widerständen

4 Reihenschaltung von Widerständen

Abb. 5 zeigt das Wärmebild einer Reihenschaltung von drei gleichen Widerständen (jeweils 18Ω). Es wurde eine Spannung von 9 V angelegt. An allen Widerständen zeigt sich die gleiche Wärmewirkung: Stromstärke und Widerstand sind jeweils gleich, so dass dieselbe Leistung $P = R I^2$ umgesetzt wird.

Die Drähte zwischen den Widerständen sind im Wärmebild nicht sichtbar, denn wegen ihres geringen Widerstandes erwärmen sie sich so gut wie nicht (vgl. Gl. (2)). Die grauen „Flecke“ in Abb. 5 gehen auf die Wärmeentwicklung an den Lötstellen zurück. Hierauf wird in Abschnitt 7 näher eingegangen.

In Abb. 6 ist wieder eine Reihenschaltung gezeigt, diesmal mit drei unterschiedlichen Widerständen. In der Reihenschaltung mit konstanter Stromstärke wird am größten Widerstand (39Ω) die größte

Leistung umgesetzt; er erwärmt sich am stärksten. Wie der Vergleich der drei Teilbilder zeigt, hat die Reihenfolge der Widerstände keinen Einfluss auf die Wärmewirkung.

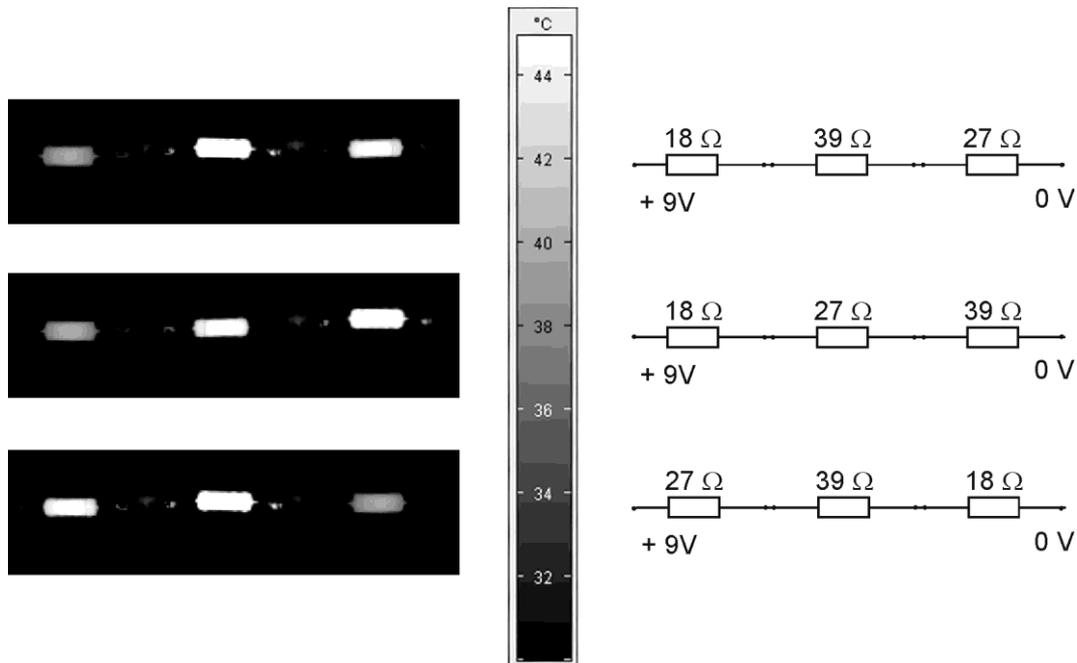


Abb. 6 Reihenschaltung dreier unterschiedlicher Widerstände

5 Parallelschaltung von Widerständen

Abb. 7 zeigt die Parallelschaltung dreier gleicher Widerstände (18 Ω). An allen dreien liegt die gleiche Spannung (9 V), so dass nach $P = U^2/R$ die gleiche Leistung umgesetzt wird. Befinden sich dagegen drei unterschiedliche Widerstände in der Parallelschaltung, unterscheiden sich auch die umgesetzten Leistungen (Abb. 8). Im Unterschied zur Reihenschaltung wird aber nun am *kleinsten* Widerstand die größte Leistung umgesetzt und die stärkste Erwärmung beobachtet (links in Abb. 8).

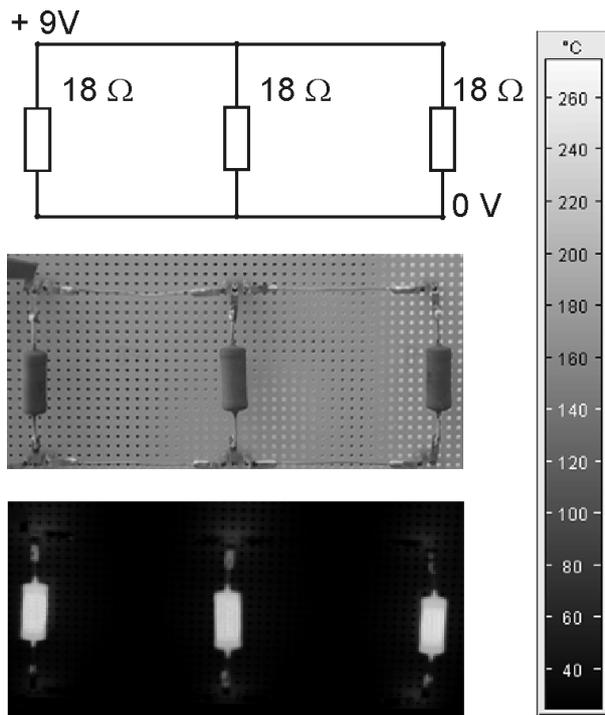


Abb. 7 Parallelschaltung dreier gleicher Widerstände

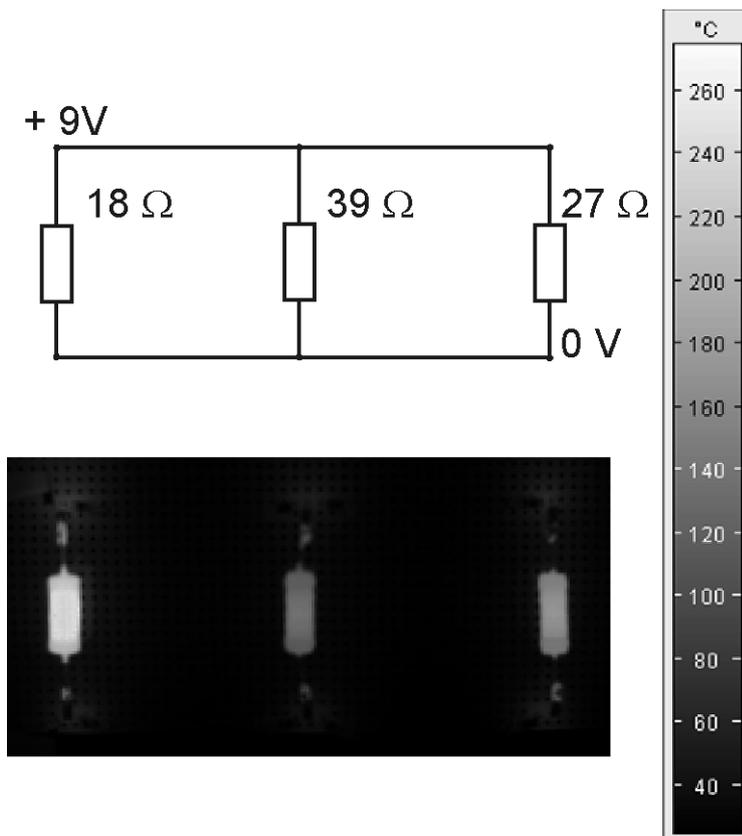


Abb. 8 Parallelschaltung dreier unterschiedlicher Widerstände (18 Ω / 39 Ω / 27 Ω)

6 Kurzschluss

Ein spektakulärer Versuch ist in Abb. 9 zu sehen: Eine handelsübliche 9 V-Blockbatterie wurde mit einem kurzen Kupferdraht kurzgeschlossen. Die durch die großen Kurzschlussströme im Innern der Batterie verursachte Wärmewirkung ist in der Wärmebildabfolge in Abb. 9 gezeigt, in der man die sechs Zellen der Batterie ($6 \times 1,5 \text{ V} = 9 \text{ V}$) deutlich unterscheiden kann. Vorsicht beim Experimentieren: Explosions- und Feuergefahr.

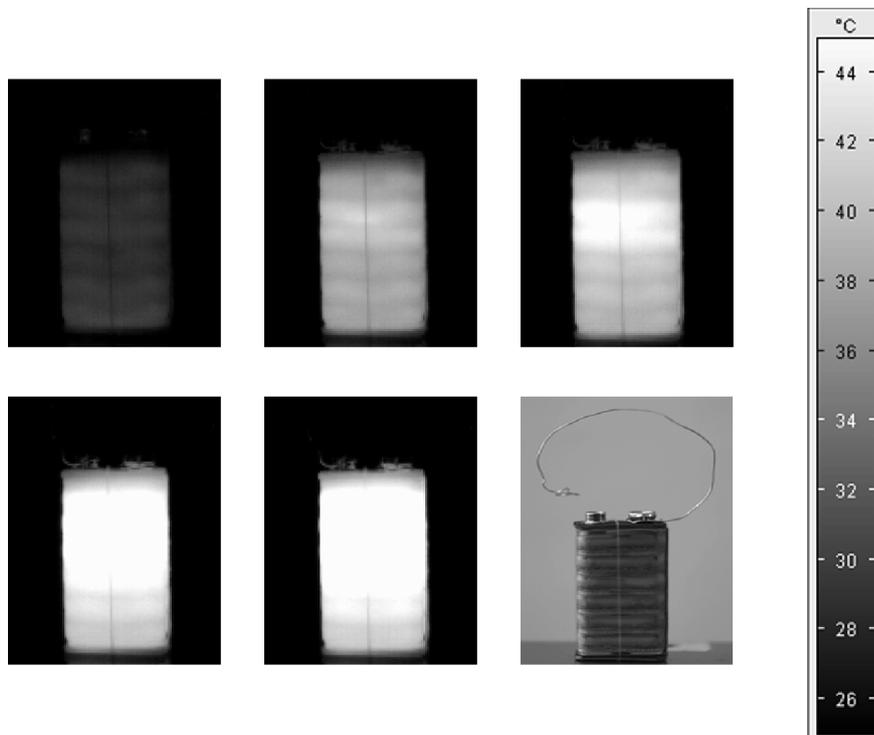


Abb. 9 Wärmeentwicklung beim Kurzschluss einer 9 V-Batterie

7 Praktische Hinweise

Für die in Abschnitt 2 vorgestellten Experimente wurden Drähte aus Konstantan ($d = 0,25 \text{ mm}$ und $d = 0,5 \text{ mm}$), aus Isachrom 60 ($d = 0,5 \text{ mm}$) und Kupfer ($d = 0,5 \text{ mm}$) verwendet. Kupfer erwärmt sich aufgrund seines geringen spezifischen Widerstands bei gleicher Stromstärke wesentlich weniger als die „Widerstandsdrähte“. Kupferdrähte sind daher weniger gut für die Wärmebildaufnahmen geeignet.

Ein grundsätzliches Problem tritt bei der Verwendung der Konstantandrähte auf. Sie sind mit einer Lackisolierung überzogen. Diese Isolierschicht muss über die gesamte Drahtlänge entfernt werden, da sie Einfluss auf die Erwärmung des Drahtes hat. Das Entfernen der Isolierung mit einer Flamme hat sich als beste Lösung herausgestellt. Die entstandenen Verzunderungen wurden mechanisch entfernt.

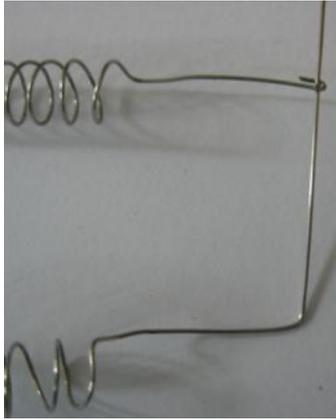


Abb. 10 :Quetschverbindung beim Aufbau einer Parallelschaltung aus Drähten

Beim Aufbau einer Parallelschaltung aus Drähten zeigte sich eine Befestigung durch Löten als nicht sinnvoll. Die Lötstellen traten auf den Wärmebildern zu sehr in den Vordergrund, da sie sich stark erwärmten. Versuche, die Drähte mithilfe von Lüsterklemmen zu befestigen, führten zu einem ähnlichen Ergebnis. Die effektivste Lösung bestand in einem einfachen mechanischen Festklemmen der Drähte (Abb. 10).

Vor allem beim Kupferdraht und dem dünneren Konstantandraht war dies mit Schwierigkeiten verbunden, da diese Drähte beim mechanischen Festdrücken leicht brachen. Nach unseren Erfahrungen ist Isachrom-60-Draht am unkompliziertesten in der Handhabung.

Für die Versuche mit Widerständen (Abschnitt 3 und 4) wurden mit Hilfe von Steckschuhen variable Steckverbindungen geschaffen auf die die jeweiligen Bauteile (Drähte und Widerstände) fest gelötet wurden (Abb. 11).



Abb. 11: Steckverbindungen mit Steckschuhen

Dadurch war es möglich mit denselben Steckverbindungen die verschiedensten Schaltungsvarianten zu untersuchen. Diese Steckverbindungen wurden dann auf die zuvor auf einer Lotpunktrasterplatte festgelöteten Lötstifte gesteckt (Abb. 12).



Abb. 12: Steckverbindungen auf der Rasterplatte

Bei den handels- und schulüblichen 5 W-Drahtwiderständen muss darauf geachtet werden, dass die umgesetzte Leistung die Nennleistung nicht übersteigt. Eine Einschränkung besteht auch in der maximalen Leistung des Netzgerätes. Auch größere Schulnetzgeräte können meist keine Stromstärken

von mehr als 5 A liefern. Bei der Auslegung der Widerstandswerte muss auf diese Einschränkungen Rücksicht genommen werden.

Die Lötungen an den variablen Steckverbindungen sind nicht besonders stabil. Bei unseren Versuchen ging das Lötzinn mit dem Isachrom-60-Drahtmaterial keine Verbindung ein. Daher konnte der Isachrom-60-Draht nicht verlötet sondern lediglich mithilfe des Lötzinns festgeklemmt werden.

Die Lötstellen der Steckverbindungen sind auf den Wärmebildern deutlich zu erkennen (Abb. 6-8), weil sie einen höheren Widerstand haben als der reine Draht und sich daher erwärmen. Bei einer Lötung direkt auf der Platine ist dieser störende Effekt kleiner. Es kann daher vorteilhaft sein, einige „Standardschaltungen“ von Widerständen fest auf Platinen aufzulöten.

[1] C. v. Rhöneck, *Vorstellungen vom elektrischen Stromkreis*. In: R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis: Köln (2004).

[2] R. Duit, *Vorstellung und Experiment. Von der eingeschränkten Überzeugungskraft experimenteller Beobachtungen*. In: R. Müller, R. Wodzinski, M. Hopf (Hrsg.): *Schülervorstellungen in der Physik*, Aulis: Köln (2004).

[3] W. Jung, I. Kiowski, E. Weber, H. Wiesner, *Zur Einführung von Stromstärke und Spannung*. *Naturwissenschaften im Unterricht* 30, 388-94 (1982).

[4] *Kuhn Physik 5/6 Niedersachsen*, Westermann: Braunschweig (2007).

[5] R. Girwidz, *Die Stromzange - neue experimentelle Möglichkeiten für den Physikunterricht*. *plus lucis* 1/95 (1995).

Kurzfassung:

Eine hartnäckige Schülervorstellung in der Elektrizitätslehre ist die „Verbrauchsvorstellung“, nach der ein Lämpchen einen Teil des hindurchfließenden Stroms verbraucht. Wir stellen Experimente mit der Wärmebildkamera vor, mit der man dieser Vorstellung entgegenwirken kann. Darüber hinaus lässt sich mit der Wärmebildkamera die in Bauteilen in Reihen- und Parallelschaltung umgesetzte Leistung direkt verbildlichen.