

Die Stromzange - neue experimentelle Möglichkeiten für den Physikunterricht

Raimund Girwidz

Stromzangen bzw. Zangenamperemeter messen elektrische Stromstärken "unterbrechungsfrei". Die Meßklemmen müssen lediglich die Stromführung umschließen. Solche Geräte waren bislang eigentlich für Messungen im Stark- und Wechselstrombereich konzipiert. Die Entwicklung in der Elektronik macht es nun auch praktikabel, Gleichströme unterbrechungsfrei zu messen. Bei Gerätepreisen um 1000 DM kann man mit Stromzangen bis auf 10 mA genau messen.

Aus didaktischer Sicht ist das Gerät speziell für die ersten Experimente in der Elektrizitätslehre interessant, weil für eine Messung keine Änderungen am Stromkreis nötig sind. Das äußere Bild der Schaltung bleibt erhalten. Darüber hinaus ist die räumliche Zuordnung der gemessenen Stromstärke im Schaltungsaufbau besonders offensichtlich und direkt erkennbar. Nicht zuletzt aber lassen sich Messungen schnell und ohne Aufwand an verschiedenen Stellen des Stromkreises vornehmen - auch ein "Abfahren ganzer Stromwege" ist möglich.

Im folgenden werden nach einer kurzen Gerätebeschreibung neue Demonstrationsversuche mit Stromzangen vorgestellt. Mehrere Abbildungen sind dabei Bildschirmausdrucke von Computerprogrammen. Dies unterstreicht die Auffassung, daß bei Überlegungen zum Einsatz neuer Meßgeräte auch gleich neue Präsentationsmöglichkeiten und Visualisierungen mit beachtet werden sollen.

Die Stromzange

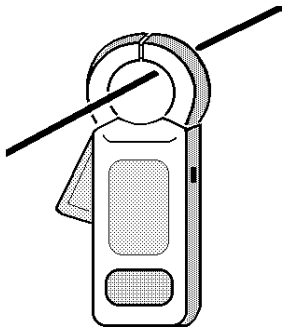


Abb. 1: Die Stromzange

Als Sensoren für Stromzangen neuerer Bauart dienen meist Permalloy-Sensoren oder Hall-ICs in Verbindung mit Ferritringen. Die elektrische Stromstärke wird über das Magnetfeld erfaßt. Die Geräte für die folgenden Versuche verwenden Hall-ICs. Sie können im Gegensatz zu magnetoresistiven Widerständen den Strom richtungsabhängig erfassen.

Physikalisch interessant ist auch die Funktion des Ferrit-Rings um die Meßöffnung (Abb. 2). Er hat nicht nur die Aufgabe, den magnetischen Fluß durch das Meß-IC zu verstärken, sondern bewirkt außerdem, daß es eine untergeordnete Rolle

Dr. Raimund Girwidz, Physikalisches Institut der Universität Würzburg,
Am Hubland, D-87077 Würzburg

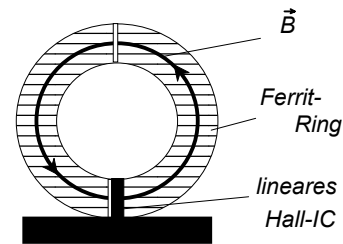


Abb. 2: Meßring der Stromzange (schematisch)

spielt, wo der Strom die Öffnung der Meßzange durchfließt; ob am Rand oder zentral, senkrecht oder schräg, immer wird die gleiche Flußdichte und damit Stromstärke erfaßt. Eine Hauptforderung an das Ringmaterial ist neben einer geringen Hysterese noch eine möglichst konstante Permeabilität im Meßbereich. Zur Linearisierung der Funktion $B(I)$ trägt aber auch der Luftspalt im Ring bei, in den der Hallsensor eingebracht ist (ca. 2 mm). Er hat meßtechnisch noch einen weiteren Vorteil: Beim Schließen der Zange wirken sich geringe Unebenheiten an der Nahtstelle zwischen den Ringhälften nicht so stark aus, da sie klein sind im Verhältnis zum bestehenden Luftspalt und somit den magnetischen Widerstand des Kreises nur relativ gering vergrößern.

Neben der problemlosen Handhabung zeichnen sich die Geräte in der Anwendung vor allem noch durch die folgenden Eigenschaften aus:

- Die Strommessung erfolgt unterbrechungsfrei, räumlich sehr flexibel und ohne Abänderungen am Stromkreis.
- Die Messung ist quasi rückwirkungsfrei (zumindest im vorgegebenen Meßbereich).
- Meßkreis und gemessener Strom sind galvanisch getrennt.
- Die zeitliche Auflösung ist gut, so daß Frequenzen bis 1 kHz zu erfassen sind.

Für die Demonstrationsversuche ist ferner von Bedeutung, daß die Geräte mit einem Analogausgang ausgestattet sind. Die dort ausgegebene Spannung ist proportional zur gemessenen Stromstärke, hier 1 mV für 10 mA. Dies ermöglicht den Anschluß über einen AD-Wandler an den Computer.

Demonstrationsversuche für die Sekundarstufe I

Im folgenden werden exemplarisch einige Demonstrationsversuche zu Lerninhalten aus der Sekundarstufe I vorgestellt. Sie sind verschiedenen Themenkreisen zuzuordnen:

- Die Einführung der Stromzange als funktionsgerechte Meßeinheit
- Hilfen zur Ausarbeitung von relevanten physikalischen Vorstellungen zum elektrischen Stromkreis
- Vorexperimente zur elektrischen Spannung
- Neue experimentelle Zugänge zu physikalischen Phänomenen.

Dabei wird jedoch kein geschlossener Lehrgang entwickelt. Die Versuche können bestehende Vorgehensweisen punktuell ergänzen, erweitern, verbessern.

Die Stromzange als Meßeinheit

Die Einführung der Strommessung mit dem Zangenamperemeter

Mit der Stromzange lassen sich besonders plausibel einige Forderungen prüfen, die prinzipiell an eine Anordnung zur Strommessung zu stellen sind. Insbesondere lassen sich Gleichheit und Vielfachheit der Stromstärke überzeugend einführen und bei der Überprüfung des Meßverfahrens nutzen. Um dies sogar in Freihandversuchen zu zeigen, wurden Leitungen aus 4 mm starken, isolierten Kupferdrähten gebogen und Batterie und Lämpchen in einem starren Leiterkreis eingefast. Die Anordnungen sind leicht in einer Hand zu halten.

1. In *zwei völlig identischen Stromkreisen* fließen sicherlich auch gleich große elektrische Ströme. Die Stromzange arbeitet somit korrekt, wenn sie in diesem Fall gleiche Stromstärken anzeigt.

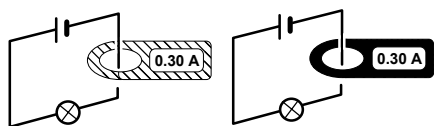


Abb. 3: Zwei identische Kreise mit gleichen Strömen.

Andere Lämpchen oder Batterien führen zu unterschiedlichen Stromstärken. - Das Zangenamperemeter erkennt *gleiche bzw. ungleiche Stromstärken*.

2. Das *Vielfache einer Stromstärke* und eine sinnvolle Skalierung sind gleichermaßen elegant wie ökonomisch zu erschließen:

In zwei völlig identischen Leiterkreisen fließt jeweils der gleiche Strom. (Dies können selbstverständlich sofort zwei Messungen bestätigen.) Beide Ströme werden dann zusammen durch die Meßöffnung der Stromzange geführt. Diese registriert die zweifache Stromstärke. Hierbei läßt sich auch demonstrieren, daß es keine Rolle spielt, ob die Leitungen enger oder weiter voneinander entfernt gehalten werden. Man kann sie auch zusammenklemmen (bzw. die Ströme durch einen gemeinsamen Draht leiten).

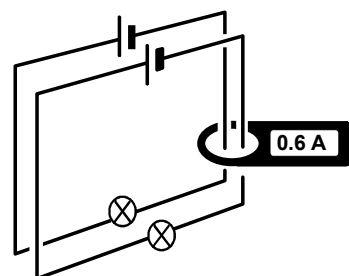


Abb. 4: Verdopplung des Stromes durch die Zangenöffnung

3. Die *Richtung des elektrischen Stromes* wird durch ein Vorzeichen angezeigt:

Die Gerichtetheit des elektrischen Stromes spielt z.B. eine Rolle, wenn zwei Ströme in umgekehrter Richtung durch die Meßöffnung der Zange fließen. Ein Versuch zeigt dies sofort: Ein Leiterrechteck aus Teil 2 wird dazu lediglich 180 Grad um

die vertikale Symmetrieachse gedreht. Die Zange registriert die Summe der beiden Ströme, nämlich 0,0 A (Abb. 5). Danach ist auch verständlich, warum die Zange nie einen Strom anzeigt, wenn sie um ein handelsübliches Stromkabel zur Netzsteckdose geklemmt wird.

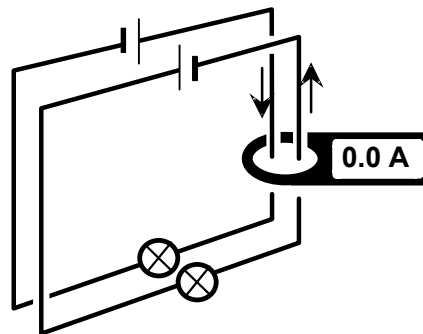


Abb. 5: Die Zange registriert die Summe der beiden Ströme (0,0 A).

4. Schnell gezeigt ist ebenfalls die *Rückwirkungsfreiheit* der Messung (im vorgesehenen Einsatzrahmen): Es werden einfach weitere Zangen an den Kreis geklemmt. Der Meßwert für den Strom ändert sich dadurch nicht (Abb. 6).

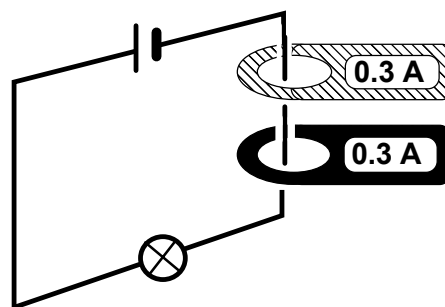


Abb. 6: Rückwirkung der Messung?

So zeigt sich ohne Aufwand und insbesondere ohne Veränderungen am Stromkreis die Funktionalität der Stromzange.

Genauere technische und physikalische Hintergründe zur Funktionsweise des Geräts, speziell der Hall-Effekt, werden erst in der Sekundarstufe II angesprochen. Eine wesentliche Grundlage ist dennoch sehr früh aufzeigbar. Vorausgesetzt ist, daß Wirkungen des elektrischen Stromes bereits vor Einführung der Stromzange bekannt sind (insbesondere die magnetische Wirkung). Dann läßt sich klären:

Der elektrische Strom wird indirekt, über seine Wirkungen bestimmt. Die Stromzange nutzt die *magnetische Wirkung*. So reagiert sie auch bei einem Dauermagneten: Die Anzeige ändert sich, wenn man einen Stabmagneten sehr nahe an den Meßring bringt.

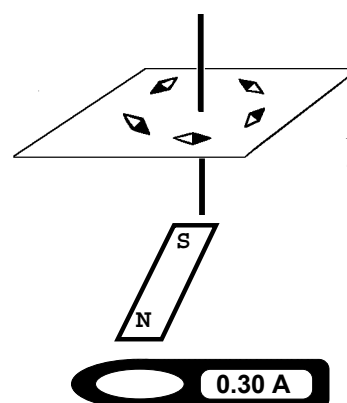


Abb. 7: Die Stromzange mißt Ströme über deren Magnetfeld.

Funktion, Funktionsweise und technische Funktionseinheiten

Die *Funktion von Drehspulinstrumenten* bei der Strom- und Spannungsmessung haben weitgehend elektronische Geräte übernommen, vorwiegend Digitalinstrumente. Auch in Schülerübungen werden solche Geräte immer häufiger eingesetzt. Nur die wenigsten Anwender kennen den technischen Aufbau der Instrumente oder haben sich mit Verfahren der Analog-Digital-Wandlung befaßt.

Allgemein erfordert der Stand der Technik immer häufiger, Geräte als *Funktionseinheiten* zu sehen, ohne sich näher mit ihrem inneren Aufbau befassen zu können. Auto, Radio oder Computer sind Alltagsbeispiele hierzu. Aber auch ohne genaue Kenntnis der Funktionsweise muß man in der Lage sein, Kriterien zu entwickeln, nach denen geprüft wird, ob die eingesetzten Geräte den Ansprüchen und Intentionen voll gerecht werden. So gesehen hat das Vorgehen bei der Einführung des Zangenamperemeters durchaus einen exemplarischen Charakter, gerade vor dem Hintergrund einer rapiden technischen Entwicklung.

Hilfen bei der Ausbildung von relevanten Vorstellungen zum elektrischen Stromkreis

Einstiegs- und Verständnisprobleme bei den Grundlagen der Elektrizitätslehre wurden international bereits intensiv untersucht und diskutiert. (Eine Übersicht geben z.B. Rhöneck, 1991 oder Pfundt, Duit, 1991.) Die Stromzange ermöglicht sehr anschauliche Experimente, die speziell auf Stromverbrauchsvorstellungen, Vorstellungen zu Batterien, sowie lokale und sequentielle Argumentationen eingehen.

Speziell der folgende Versuch ist im Sinne einer direkten experimentellen Anknüpfung an die Stromverbrauchsvorstellung zu sehen:

Zwei Lämpchen unterschiedlicher Leistung ($2,2\text{V}/0,4\text{A}$ und $2,2\text{V}/0,25\text{A}$) sind in Reihe an eine Batterie (3V) angeschlossen. Sie leuchten verschieden hell. Hypothesen, nach denen "ein Teil des Stromes im ersten Lämpchen verbraucht wird, so daß er im zweiten nicht mehr verfügbar ist", können experimentell sofort widerlegt werden.

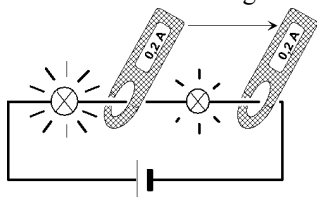


Abb. 8: "Abfahren" eines Stromkreises mit dem Zangenamperemeter.

Ein "Abfahren" der Stromwege mit dem Zangenamperemeter, über verschiedene "Verbraucher" oder unterschiedliche Leiter hinweg, zeigt die Konstanz der Stromstärke im unverzweigten Kreis (Abb. 8). Insbesondere kann man die Stromzange über die "kritischen" Stellen, also hier über die Lämpchen, hinwegführen. Der Versuch zeigt direkt, daß ein elektrischer Strom eben nicht im herkömmlichen Sinne "verbraucht" wird.

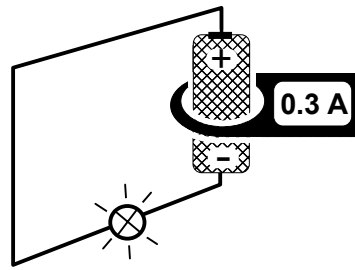


Abb. 9: Der Strom in einer Batterie.

Auch die Vorstellungen zu Batterien sind oftmals wenig ausgeschärft. So überrascht das folgende Experiment im ersten Augenblick manchmal auch Studenten:

Die Stromzange wird über die Stabbatterie eines geschlossenen Stromkreises geführt. - Die Stromstärke ist überall konstant, eben auch durch die Batterie (Abb. 9).

Die Batterie darf aber keine Ferromagnetika enthalten, da diese das Magnetfeld beeinflussen. Leider sind FeNi-Zellen oder Batterien mit Stahlmantel ungeeignet. Verwendbar sind Duplex-Batterien. Ihre Abmessungen sind günstig, und zu der Spannung von 3V gibt es Lämpchen mit gut meßbaren Lastströmen, z.B. von $0,4\text{A}$.

Auch in der physikalischen Forschung bleibt anschauliches Vorstellen ein unverzichtbarer - wenn auch nicht unfehlbarer - Wegweiser unseres Orientierungsvermögens. (Heege, 1984, S. 3). Erst recht dürfte kaum zu bezweifeln sein, daß in der Sekundarstufe I bildhaft-anschauungsorientierte Vorstellungen zum Strombegriff eine Hilfe sein können.

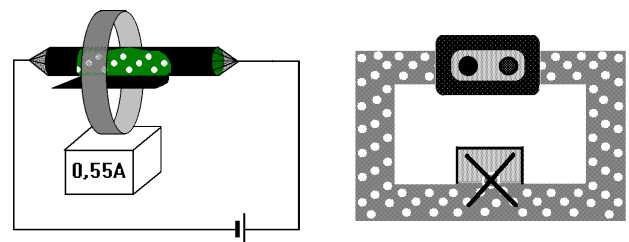


Abb. 10: Bildschirmausdrucke zweier Computer-Animationen. Die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger ist proportional zur gemessenen Stromstärke.

Eine neue Möglichkeit, die der Computer im Gegensatz zu Schulbüchern und Filmen bietet, ist die Kopplung von dynamischen Vorstellungsbildern mit Realdaten, hier mit einer Strommessung. Die Bedeutung der physikalischen Größe innerhalb eines Modells wird dabei direkt verdeutlicht. Exemplarisch seien zwei Computer-Animationen vorgestellt (Abb. 10). Sie sollen helfen, gleich nach den ersten experimentellen Erfahrungen angemessene Modellvorstellungen zu entwickeln. In Anlehnung an das Drude-Modell wird die mittlere Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger proportional zur momentan gemessenen Stromstärke vom Computer eingestellt. In dem zweiten Modell (Abb. 10, rechts) wird speziell auch der Energietransfer angesprochen, der ohne zeitliche Verzögerung mit dem Strom einsetzt.

An dieser Stelle können die Grenzen der Vorstellungsbilder nicht diskutiert werden. Wie prinzipiell alle Modelle können und sollen sie jeweils nur bestimmte Teilaspekte der Realität verdeutlichen. (Diese Tatsache sollte ebenfalls den Schülern bewußt werden.)

Schnelle und flexible Messungen an Stromverzweigungen können zum direkten Prüfen von Aussagen oder dem experimentellen Auffinden von Gesetzmäßigkeiten dienen. Die Stromzange wird einfach um die entsprechende Stelle geklemmt. Dabei ist jeweils auch die räumliche Zuordnung des Meßwertes ganz offensichtlich.

Aus den Untersuchungen von Caillot und Chalouhi (1984), die sich mit dem visuellen Erkennen von Schaltkreisen befaßt haben, läßt sich wohl auch schließen, daß Zuordnungen zwischen Symbolik bzw. Schaltskizze und Realität schon früh und intensiv einzuüben sind.

Entsprechende Aufgabenstellungen lassen sich bei Messungen mit der Stromzange leicht integrieren, wobei neben der räumlichen Flexibilität die deutlich erkennbare Positionszuordnung vorteilhaft ist. Ausdrucksstarke und zeitökonomische Darstellungen werden vor allem am Computer möglich. So gehört der folgende Bildschirmausdruck zu einem Programmbeispiel, mit dem die Meßergebnisse in einer Art "schneller Feldstudie" auf dem Monitor zusammengestellt werden (Abb. 11).

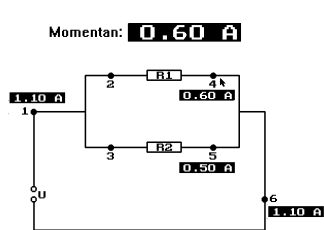


Abb. 11: Bildschirmkopie aus einem Programm, mit dem die Meßdaten in Schaltskizzen angezeigt werden können.

Gemäß der Schaltskizze sind die numerierten Positionen im realen Aufbau zu lokalisieren und dort die Stromstärken zu bestimmen. Ein Meßwert wird dann auf Tastendruck registriert und an entsprechender Position gezeigt.

Die Zuordnungen werden schwieriger, wenn die Geometrie des experimentellen Aufbaus stärker von der Darstellung in der Schaltskizze abweicht. So lassen sich zur Übung verschiedene, u.U. nur topologisch abgeänderte Schaltskizzen vorgeben und untersuchen (Abb. 12). Aber auch die Wirkung von strukturellen Änderungen am Stromkreis ist mit der Stromzange schnell zu erfassen und mit dem Programm dokumentierbar.

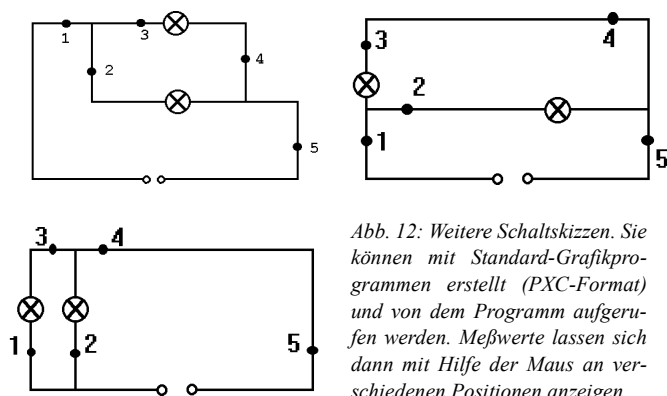


Abb. 12: Weitere Schaltskizzen. Sie können mit Standard-Grafikprogrammen erstellt (PXC-Format) und von dem Programm aufgerufen werden. Meßwerte lassen sich dann mit Hilfe der Maus an verschiedenen Positionen anzeigen.

Solche Analysen können als Übungen gedacht sein oder zum 1. Kirchhoffschen Gesetz hinführen. In der nächsten Applikation läßt sich die Knotenregel dann für verschiedene Quellenspannungen und Widerstände dynamisch prüfen (Abb. 13).

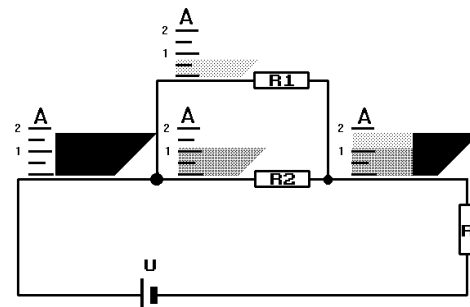
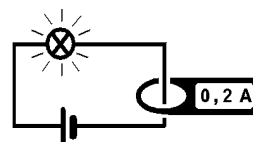


Abb. 13: Meßwerte werden bildhaft-symbolisch in Schaltskizzen angezeigt und miteinander verglichen.

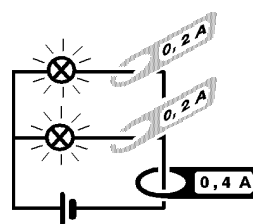
Ziel dieser Darstellung ist es, gleich mehrere Meßwerte in Echtzeit bildhaft übersichtlich anzuzeigen, sie zu vergleichen und direkt den entsprechenden Positionen in der Schaltskizze zuzuordnen. Die Meßwertanzeigen lassen sich zudem mit der Maus einfach auf dem Bildschirm verschieben, so daß auch Messungen an anderen Positionen zu verdeutlichen sind.

Vorbereitende Experimente zum Spannungsbegriff

In der nachfolgenden Versuchsreihe wird vorausgesetzt, daß der elektrische Strom als Ladungstransport verstanden ist. Mit dem Stromfluß verbunden ist die Umwandlung von elektrischer Energie in andere Energieformen (Licht, Wärme, mechanische Energie). Wenn jedoch der Energie- bzw. Leistungsbegriff im Unterricht noch nicht verfügbar ist, orientieren sich die Betrachtungen allgemeiner an Auswirkungen des Stromes. Damit wird auch in dem folgenden kurzen methodischen Entwurf gearbeitet. Eine wesentliche Rolle spielen spontane Strommessungen an verschiedenen Stellen im Kreis.



1. In dem links skizzierten einfachen Stromkreis hat der Stromfluß eine Auswirkung auf die Glühlampe - sie leuchtet.

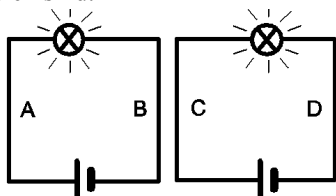


2. Durch Parallelschalten einer identischen Lampe wird der Effekt verdoppelt und zwei Glühlampen leuchten. Messungen mit der Stromzange geben einen raschen Überblick über die fließenden Ströme: Die Gesamtstromstärke hat sich verdoppelt. (Wegen ihres kleineren Innenwiderstandes sind hier Akkus als Stromquellen günstiger als Batterien.)

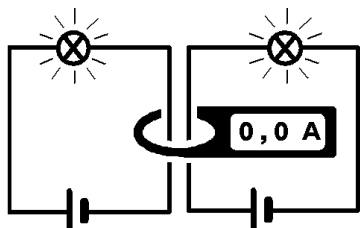
Eine Verdopplung der Auswirkung ist aber nicht nur über die zweifache Stromstärke zu erreichen. Dies verdeutlichen die folgenden Messungen:

3. Als Ausgangssituation dient der Trivialfall zweier identischer Stromkreise (z.B. realisiert an einem Steckbrett mit Elasta-Kabeln). Messungen mit der Stromzange bestätigen

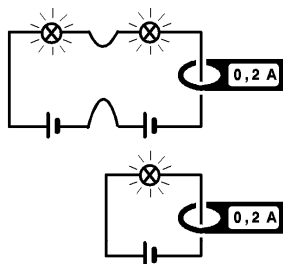
schnell, daß die Ströme in den Leitern A, B, C, D bis auf die Richtungen gleich sind.



4. Werden Leiter B und C gleichzeitig von der Meßzange umfaßt, zeigt das Gerät null Ampere an. Dies ist auch plausibel, wenn man die Definition der Stromstärke einbringt: Pro Zeiteinheit werden durch die Meßöffnung gleich viele Ladungen in beide Richtungen transportiert. Die Bilanz ist ausgeglichen.



5. Unter dem Aspekt des Ladungstransports ist es daher nicht mehr besonders verwunderlich, wenn nach einem kleinen Umbau in die rechts skizzierte Serienschaltung die Glühlampen genauso hell leuchten wie zuvor. Insbesondere wird der gleiche Effekt erreicht wie im Versuchsteil 2: Zwei Lampen leuchten. - Jetzt allerdings ohne Verdopplung der Stromstärke.



Damit ist aber auch klargestellt, daß die elektrische Stromstärke als Grundlage für die Beschreibung von Stromkreisen allein nicht genügt. Eine weitere Beschreibungsgröße wird nötig, um die Auswirkungen erklären zu können. Ausgehend vom Verständnis des Stromes als Ladungstransport und anknüpfend an die obige Versuchsreihe, bietet sich folgende Möglichkeit zur Einführung der elektrischen Spannung an: Sie soll Auswirkungen quantifizieren, die der Transport einer Ladungseinheit hat. Ziel ist letztlich ein Verständnis der Spannung als Arbeitsfähigkeit je Ladung bzw. als Arbeit pro Ladung auf dem Weg zwischen zwei Positionen des Stromkreises.

Neue experimentelle Zugänge

Mit der Stromzange eröffnen sich neue experimentelle Zugänge zu elektrischen Phänomenen:

- Der Strom durch eine Leuchtstoffröhre kann direkt gemessen werden, indem man einfach die Stromzange um die Röhre klemmt. Erst dabei fällt vielleicht auf, daß er relativ groß ist, scheinbar zu groß, wenn man von der Nennleistung der Lampe ausgeht. Er ist ebenfalls größer als der Strom in den Zuleitun-

gen zur Lampe. Hier bietet sich ein ebenso einfach realisierbares wie interessantes Einstiegsexperiment zum Thema Leistungsfaktor bei Wechselströmen an.

- Ebenfalls direkt an Ort und Stelle und ohne Aufwand ist der Strom in einem Elektrolyten meßbar, z.B. an den Glasröhren eines Hofmannschen Wasserzersetzungapparates.
- Schließlich kann ganz augenfällig der Kurzschlußstrom und damit der Innenwiderstand einer Taschenlampenbatterie im Freihandexperiment bestimmt werden. Dabei läßt sich auch zum Problem der Rückwirkung von Messungen überleiten. Ein weiterer Ansatzpunkt dazu wäre die Diskussion der strom- oder spannungsgenauen Widerstandsmessung mit herkömmlichen Geräten bzw. bei Verwendung einer Stromzange. (Meßtechnische Grenzen sind allerdings mit zu bedenken.)
- Als Beispiel für eine zeitlich hochauflösende Messung mit der Stromzange läßt sich das Einschaltverhalten einer Glühlampe betrachten. In Verbindung mit einer praktisch trägheitslosen Meßwertrepräsentation am Computer wird der hohe Anfangsstrom und sein Absinken mit Erwärmen der Glühwendel auch in Echtzeit gut erkennbar. In einer Fortführung ist daneben die elektrische Leistung und die Beleuchtungsstärke, gemessen mit einer Fotodiode, für verschiedene Ströme und Spannungen in Echtzeit anzeigbar (Abb. 14). Die zeitlichen Verzögerungen sind z.B. bei einer niederfrequenten Wechselspannung von ca. zwei Hertz sehr gut erkennbar.

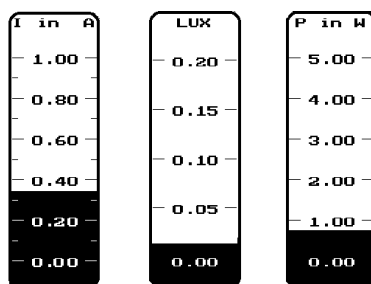


Abb. 14: Mit dem Computer werden Strom und Leistung einer Glühlampe direkt neben der Beleuchtungsstärke (gemessen mit einer Fotodiode) angezeigt.

Abrundung und Ausblick

Auf die zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten für die Sekundarstufe II sei in diesem Rahmen nur hingewiesen. Die Signalerfassung ohne Meßwiderstand, speziell in der Wechselstromlehre, oder die Stromzange selbst, als ein Beispiel für die meßtechnische Nutzung des Hall-Effekts und des Ferromagnetismus, sind nur zwei Anknüpfungspunkte. Inhaltliche Weiterführungen und Vertiefungen bieten sich auch im Physikstudium an: Offensichtlich macht es keinen Unterschied, ob der Strom am Rand, in der Mitte, senkrecht oder schräg den Meßring durchfließt. Experimentelle Hilfen und Ansatzpunkte für Betrachtungen zur magnetischen Induktion und zum Feldlinienverlauf in ferromagnetischen Ringen oder / und zum Ampereschen Verkettungssatz sind somit ebenfalls naheliegend.

Literatur

- Caillot M., Chalouhi E. (1984): *Problemlösen im Bereich der E-Lehre*; Der Physikunterricht 18, 2, 36-45.
- Girwidz R. (1993a): *Neue Möglichkeiten der Strommessung im Physikunterricht*; Physik und Didaktik 1/1993, 65-74.
- Girwidz R. (1993b): *Die Stromzange, eine neue experimentelle Unterrichtshilfe*; in W. Schneider (Hrsg.), *Wege in der Physikdidaktik* Bd. 3 (S.313-322). Erlangen: Palm & Enke.

Heege R. (1984): *Vorbemerkungen* zum Themenheft Anschaulichkeit und Beziehungsdenken; *Der Physikunterricht* 18,1,3.
Pfundt H., Duit R. (1991): *Bibliographie Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht*; 3. Aufl., Kiel, IPN.
Rhöneck, Chr. v. (1991): *10 Jahre Untersuchungen von Schülervorstellungen - Ertrag und Perspektiven*; in W. Kuhn (Hrsg.), *Vorträge Physikertagung 1991 Erlangen* (S.90-108).
DPG-Fachausschuß Didaktik der Physik.