

ARBEITSKREIS BAYERISCHER PHYSIKDIDAKTIKER

BEITRAG AUS DER REIHE:

Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik

Band 3

Rückblick und Perspektive

ISBN 3 - 7896 - 0513 - 1

Verlag Palm & Enke, Erlangen 1993

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

Die Stromzange, eine neue experimentelle Unterrichtshilfe [1]

1. Einleitung

Stromzangen / Zangenamperemeter messen elektrische Stromstärken 'unterbrechungsfrei'. Die Meßklammern 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.

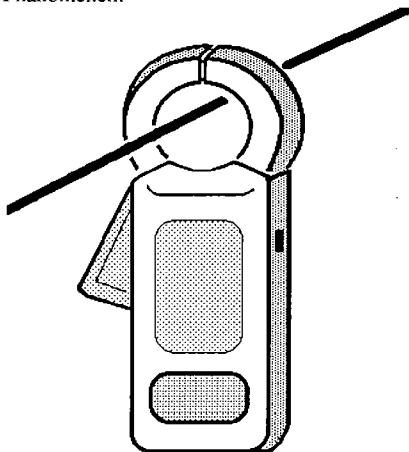
Aus didaktischer Sicht ist speziell bei den ersten Experimenten in der E-Lehre interessant, daß für eine Messung keine Änderungen am Stromkreis nötig sind; das äußere Bild der Schaltung bleibt erhalten. Darüber hinaus ist die räumliche Zuordnung der gemessenen Stromstärke im Schaltungsaufbau besonders 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. Sie sind verschiedenen Themenkreisen zuzuordnen:

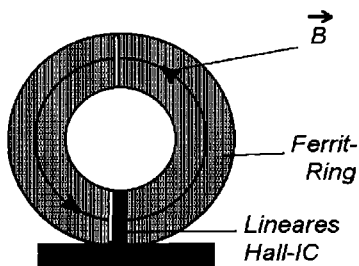
- Hilfen zur Ausarbeitung von relevanten physikalischen Vorstellungen zum el. Stromkreis
- Die Einführung der Stromzange als funktionsgerechte Meßeinheit
- Vorexperimente zur elektrischen Spannung
- Neue experimentelle Zugänge zu physikalischen Phänomenen.

2. Das Gerät:

Als Sensoren für Stromzangen neuerer Bauart dienen meist Permalloy-Sensoren oder Hall-IC's in Verbindung mit Ferritringen. Die elektrische Stromstärke wird über das Magnetfeld erfaßt. Die Geräte für die folgenden Versuche verwenden Hall-IC's. Sie können im Gegensatz zu magnetoresistiven Widerständen den Strom auch richtungsabhängig erfassen. Physikalisch interessant ist nebenbei auch die Funktion des Ferrit-Rings (um die Meßöffnung).



Er hat nicht nur die Aufgabe, den magnetischen Fluß durch das Meß-IC zu verstärken, sondern bewirkt außerdem, daß es eine untergeordnete Rolle 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 kleinste Unebenheiten an der Nahtstelle zwischen den Ringhälften nicht so verheerend aus, da sie, in Relation zum bereits bestehenden Teil, den Widerstand des magnetischen Kreises nur gering vergrößern. (Genauere Ausführungen zur Sensorik und zur Behandlung magnetischer Kreise findet man in [2] [3] [4].)

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

- * Die Strommessung erfolgt unterbrechungsfrei, räumlich sehr flexibel und ohne Abänderungen am Stromkreis;
- * die Messung ist praktisch rückwirkungsfrei;
- * Meßkreis und gemessener Strom sind galvanisch getrennt;
- * die zeitliche Auflösung ist gut, so daß Frequenzen bis 1 kHz zu erfassen sind.

Für Demonstrationsversuche ist noch 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 an ein Meßgerät mit Großanzeige oder ein Oszilloskop. Alternativ sind die Meßwerte aber auch leicht über einen AD-Wandler mit dem Computer zu erfassen.

3. Experimente für die Sekundarstufe I

Im folgenden werden exemplarisch einige Demonstrationsversuche zu Themenbereichen aus der Sekundarstufe I vorgestellt. Ein Teil der Abbildungen sind dabei Bildschirmausdrucke von Computerprogrammen. Dies unterstreicht die Einstellung, daß bei Überlegungen zum Einsatz neuer Meßgeräte auch gleich neue Präsentationsmöglichkeiten und Visualisierungen mit bedacht werden können. Die einfache Anzeige über ein Demonstrations-Meßgerät bleibt selbstverständlich auch noch möglich und sinnvoll.

Ein vollständiger methodischer Aufriß wird hier nicht angestrebt. Die Versuche können bestehende Vorgehensweisen auch punktuell ergänzen, erweitern, verbessern.

3.1. Hilfen bei der Ausbildung von relevanten Vorstellungen zum elektrischen Stromkreis

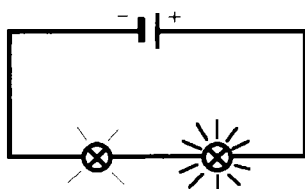
Einstiegs- und Verständnisprobleme bei den Grundlagen der E-Lehre wurden international bereits umfangreich untersucht und diskutiert.[5][6] Die Stromzange ermöglicht sehr anschauliche Experimente, die speziell auf Stromverbrauchsvorstellungen, Vorstellungen zu Batterien, sowie lokale und sequentielle Argumentationen eingehen.

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

2 Lämpchen unterschiedlicher Leistung (2,5V/0,1A und 2,5V/0,2A) 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.

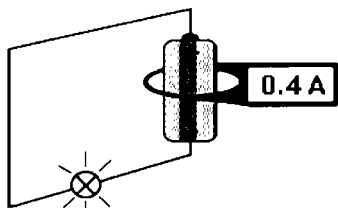
Ein "Abfahren" der Stromwege mit dem Zangenamperemeter, über verschiedene "Verbraucher" oder unterschiedliche Leiter hinweg, zeigt die Konstanz der Stromstärke im unverzweigten Kreis. Insbesondere kann man die Stromzange über die "kritischen" Stellen, also hier über die Lämpchen hinweg führen. Der Versuch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



b) Auch die Vorstellungen zu Batterien sind oftmals wenig überdacht oder 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.

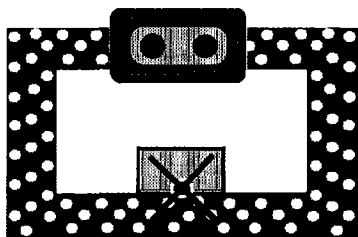
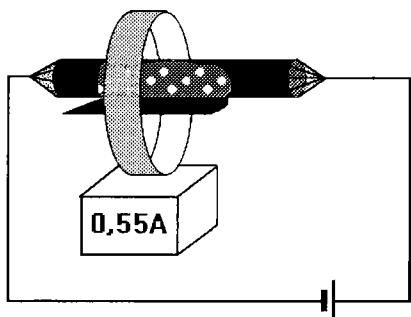
(Experimentelles: Die Batterie darf keine Ferromagnetika enthalten, da sie das Magnetfeld beeinflussen. Ungeeignet sind leider FeNi-Zellen oder Batterien mit Stahlmantel, brauchbar z.B. Duplex-Batterien. Auch ihre Abmessungen sind günstig, und zu der Spannung von 3 V gibt es Lämpchen mit gut meßbare Lastströmen, z.B. von 0,4 A.)



c) "Auch in der physikalischen Forschung bleibt anschauliches Vorstellen ein unverzichtbarer - wenn auch nicht unfehlbarer - Wegweiser unseres Orientierungsvermögens." [7]

Erst recht dürfte kaum zu bezweifeln sein, daß in der Sekundarstufe I ein Bedarf an bildhaften, anschauungsorientierten Vorstellungen zum Strombegriff aufkommt. Werden aber im Unterricht keine bildhaften Modelle angeboten, ist leicht vorstellbar, daß ein Leerraum entsteht, und eine unkontrollierte Belegung ist kaum wünschenswert.

Eine besondere Möglichkeit ist es, über den Computer Vorstellungsbilder mit Realdaten zu koppeln, hier mit einer Strommessung. Die Bedeutung der physikalischen Größe innerhalb der Modelle wird dabei direkt deutlich. Exemplarisch seien hierzu 2 Computer-Animationen vorgestellt. 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.

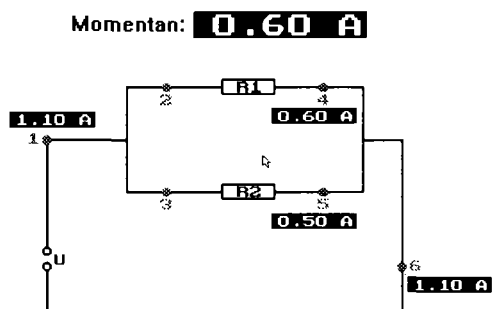


In dem zweiten Modell kann speziell auch der Energietransfer angesprochen werden, der ohne zeitliche Verzögerung mit dem Strom einsetzt.

An dieser Stelle kann eine sicherlich vorliegende Begrenztheit 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.)

d) Schnelle und flexible Messungen an Stromverzweigungen können zur direkten Prüfung von Aussagen oder zum 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.

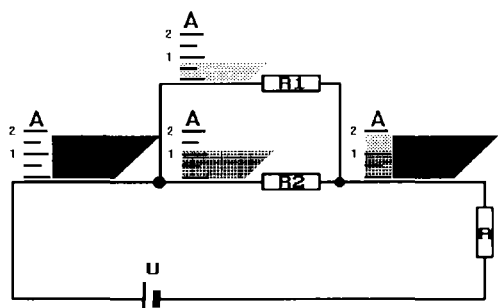
Aus den Untersuchungen von Caillot und Chalouhi [8], die sich mit dem visuellen Erkennen von Schaltkreisen befaßt haben, läßt sich wohl auch schließen, daß Zuordnungen zwischen Symbolik bzw. Schaltskizze und Realität schon früh und intensiv einzuüben sind. Die freie und eindeutige Lokalisierbarkeit nutzend, können entsprechende Aufgabenstellungen bei Messungen mit der Stromzange leicht integriert werden. 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.



Gemäß der Schaltskizze sind dabei 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.

Das Anspruchsniveau wird höher, wenn die Geometrie des experimentellen Aufbaus stärker von der Darstellung in der Schaltskizze abweicht. So lassen sich verschiedene, nur topologisch abgeänderte Schaltskizzen vorgeben und untersuchen. Auch die Wirkung von strukturellen Abänderungen im Stromkreis lassen sich mit der Stromzange schnell erfassen und dokumentieren.

e) Solche Analysen an einfachen Verzweigungen können außerdem als Hinführung zum 1. Kirchhoffschen Gesetz dienen. In der nächsten Applikation läßt sich die Knotenregel dann für verschiedene Quellenspannungen und Widerstände dynamisch prüfen.



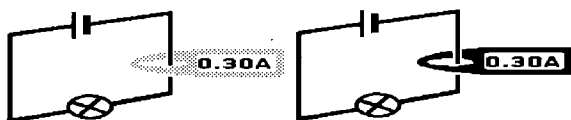
Ziel dieser Darstellung ist es, gleich mehrere Meßwerte in Echtzeit bildhaft übersichtlich anzuzeigen, sie zu vergleichen und direkt den entsprechenden Positionen in der Schaltskizze zuzuordnen.

3.2. Die Stromzange als funktionsgerechte Meßeinheit

3.2.1. Einführung der Strommessung mit dem Zangenamperemeter

Mit der Stromzange lassen sich besonders plausibel und augenfällig einige Forderungen prüfen, die prinzipiell an eine Anordnung zur Strommessung zu stellen sind. Insbesondere werden Gleichheit und Vielfachheit der Meßgröße überzeugend faßbar. Um dies auch in Freihandversuchen zu zeigen, wurden Leitungen aus 4mm starken, isolierten Kupferdrähten gebogen, so daß Batterie und Lämpchen in einem starren Leiterkreis eingefast werden konnten. Die Anordnungen sind leicht in einer Hand zu halten.

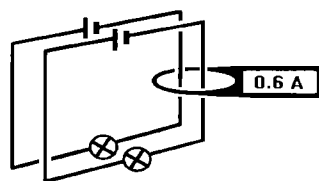
a) In zwei völlig identischen Stromkreisen fließen sicherlich auch gleich große elektrische Ströme.



Die Stromzange arbeitet folglich korrekt, wenn sie gleiche Stromstärken anzeigt. Andere Lämpchen oder Batterien führen zu unterschiedlichen Stromstärken. - Das Zangenamperemeter erkennt gleiche bzw. ungleiche Stromstärken.

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

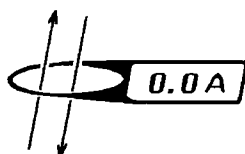
In zwei völlig identischen Leiterkreisen fließt jeweils der gleiche Strom. (Dies können selbstverständlich sofort 2 Messungen bestätigen.) Beide Ströme werden dann durch die Meßöffnung der Stromzange geführt. Diese registriert die zweifache Stromstärke.



Hierbei läßt sich auch gleich 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).

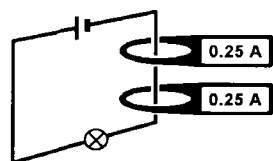
c) Die *Richtung des elektrischen Stromes* bzw. die Tatsache, daß der Strom die Meßöffnung von vorne oder von hinten kommend durchfließt, wird durch ein Vorzeichen angezeigt.

Diese Gerichtetheit des el. Stromes spielt z.B. eine Rolle, wenn man ein Leiterrechteck aus Teil b) um 180 Grad um die vertikale Symmetrieachse dreht. Die Zange registriert die Summe der beiden Ströme, nämlich 0 A.



Danach ist auch verständlich, warum die Zange nie einen Strom anzeigt, wenn man sie um ein gewöhnliches Stromkabel zur Netzsteckdose klemmt.

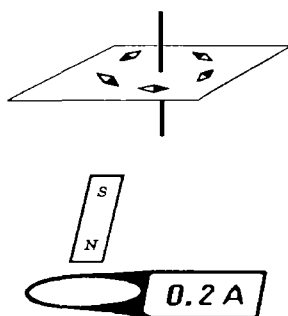
d) Sofort gezeigt ist ebenfalls die *Rückwirkungsfreiheit* (im Rahmen der Meßgenauigkeit): Es werden einfach weitere Zangen an den Kreis geklemmt. Der Meßwert für den Strom ändert sich dadurch nicht.



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

Genauere technische und physikalische Hintergründe zur Funktionsweise des Geräts, speziell der Halleffekt, können erst in der Sekundarstufe II angesprochen werden. Eine wesentliche Grundlage der Messung 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, nämlich 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.



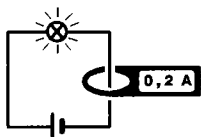
3.2.2. Funktion, Funktionsweise und technische Funktionseinheiten

Die *Funktion / Aufgabe* von Drehspulinstrumenten in Labor und Alltag 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 ihren inneren Aufbau oder haben sich mit Verfahren der Analog-Digital-Wandlung befaßt.

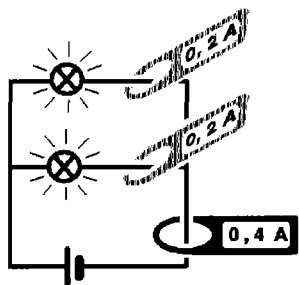
Allgemein erfordert der Stand der Technik immer häufiger, Geräte als *Funktionseinheiten* zu sehen, ohne sich näher mit ihrem inneren Aufbau befassen zu können. (Computer und KFZ sind zwei weitere Beispiele hierzu.) Aber auch ohne genaue Kenntnis der *Funktionsweise* muß man in der Lage sein, Kriterien zu entwickeln, nach denen geprüft wird, ob die eingesetzten Geräte den Ansprüchen und Intentionen voll gerecht werden. So gesehen kann das Vorgehen bei der Einführung des Zangenamperemeters durchaus exemplarischen Charakter erhalten.

3.3. Vorbereitende Experimente zum Spannungsbegriff

Vorausgesetzt werden muß, daß der elektrische Strom als Ladungstransports verstanden ist. Mit dem Stromfluß verbunden ist die Umwandlung von elektrischer Energie in andere Energieformen (Licht, Wärme, mechanische Energie). Wenn der Energie- / Leistungsbegriff aber im Unterricht noch nicht verfügbar ist, orientieren sich die Betrachtungen allgemein an Auswirkungen des Stromes. Damit wird auch in dem folgenden kurzen methodischen Entwurf gearbeitet. Eine wesentliche Rolle spielen außerdem Strommessungen an verschiedenen Stellen im Kreis.



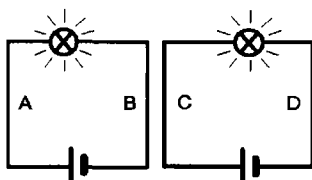
a) In dem skizzierten einfachen Stromkreis hat der Stromfluß eine Auswirkung auf die Glühlampe - sie leuchtet.



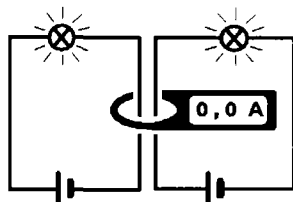
b) Durch Parallelschalten einer identischen Lampe wird der Effekt verdoppelt - 2 Glühlampen leuchten. Messungen mit der Stromzange ergeben hierbei einen raschen Überblick über die fließenden Ströme. Insbesondere hat sich die Gesamtstromstärke verdoppelt. (Wegen ihres kleineren Innenwiderstands sind Akkus günstiger als Batterien.)

Eine Verdopplung der Auswirkung (hier zwei leuchtende Glühbirnen) wird aber nicht ausschließlich bei der zweifachen Stromstärke erreicht:

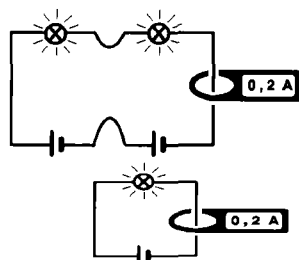
c) Als Ausgangssituation dient der Trivialfall zweier identischer Stromkreise z.B. realisiert an einem Streckbrett mit Elasta-Kabeln. Messungen mit der Stromzange bestätigen schnell, daß die Ströme in den Leitern A,B,C,D abgesehen von der Richtung gleich sind.



d) Werden Leiter B und C gleichzeitig von der Meßzange umfaßt, zeigt das Gerät 0 Ampere an. Dies ist auch plausibel, wenn man die Definition der Stromstärke einbringt: Pro Zeiteinheit werden durch die Meßöffnung gleich viel Ladungen in jede Richtung transportiert. Die Bilanz ist ausgeglichen.



e) Unter dem Aspekt des Ladungstransports ist daher nicht mehr besonders verwunderlich, wenn nach einem kleinen Umbau (in die skizzierte Serienschaltung) die Glühlampen genauso hell leuchten wie zuvor. Insbesondere wird der gleiche Effekt erreicht wie in b) - allerdings bei der halben Stromstärke.



Damit ist aufgezeigt, daß die elektrische Stromstärke als Grundlage für die Beschreibung von Stromkreisen allein nicht genügt. Für die Erklärung von Auswirkungen wird eine weitere Beschreibungsgröße nötig. Wiederum ausgehend vom Verständnis des Stromes als Transport von Ladungen bietet sich folgende Möglichkeit zur Einführung der Spannung an: Diese kann speziell Auswirkungen quantifizieren, die der Transport einer Ladung hat. Ziel ist das Verständnis der Spannung als Arbeitsfähigkeit je Ladung bzw. als Arbeit pro Ladung auf dem Weg zwischen 2 Positionen des Stromkreises.

3.4. Neue experimentelle Zugänge zu physikalischen Phänomenen

Durch die Stromzange werden auch ganz neue Meßzugänge eröffnet:

a) So kann der Strom durch eine Leuchtstoffröhre direkt gemessen werden, indem man einfach die Stromzange um die Röhre klemmt. Erst dabei fällt vielleicht auf, daß er relativ groß ist, zu groß scheinbar, wenn man von der Nennleistung der Lampe ausgeht. Er ist ebenfalls größer als der Strom in den Zuleitungen zur Lampe. Hier bietet sich auch ein ebenso einfach realisierbares wie interessantes Einstiegsexperiment zum Thema Leistungsfaktor bei Wechselströmen an.

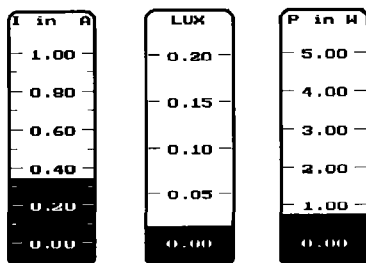
b) Ebenfalls ist der Strom in einem Elektrolyten, z.B. in den Glasröhren eines Hofmannschen Wasserzersetzungapparates, direkt an Ort und Stelle und ohne Aufwand meßbar.

c) Schließlich kann ganz augenfällig und unverdeckt der Kurzschlußstrom und damit der Innenwiderstand einer Taschenlampenbatterie im Freihandexperiment bestimmt werden.

Hier läßt sich auch eine Überleitung zur Problematik der Rückwirkung einer Messung finden. Ein weiterer Ansatzpunkt dazu wäre auch die Diskussion der strom- oder spannungsgenauen Widerstandsmessung mit herkömmlichen Geräten bzw. bei Verwendung einer Stromzange. (Meßtechnische Grenzen sind allerdings mit zu bedenken.)

d) Beispiel für eine zeitlich hochauflösende Messung mit der Stromzange ist das Einschaltverhalten einer Glühlampe. In Verbindung mit einer praktisch trägheitslosen Meßwertrepräsentation am Computer wird der hohe Anfangsstrom und das Absinken mit Erwärmung der Glühwendel in einer Balkendarstellung auch in Echtzeit sehr gut erkennbar.

In einer Fortführung ist auch die elektrische Leistung und die Beleuchtungsstärke, gemessen mit einer Fotodiode, für verschiedene Ströme und Spannungen in Echtzeit anzeigbar. Die zeitlichen Verzögerungen sind z.B. bei einer niederfrequenten Wechselspannung (ca. 2 Hz) sehr gut erkennbar.



4. Abrundung und Ausblick:

Anhand von Beispielen sollte die besonders interessante räumliche Flexibilität der Stromzange aufgezeigt werden. Weitere Aspekte waren das Messen ohne Abänderung des betrachteten Stromkreises und die neuen Zugangsmöglichkeiten d.h. ein Messen an Stellen, die sonst nicht zugänglich sind. Gleichzeitig waren neuartige Meßwertpräsentationen ein Inhalt.

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. Inhaltlicher Weiterführungen und Vertiefungen bieten sich selbst für Physikstudenten an. Wie man augenfällig zeigen kann, 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 Verketzungssatz sind somit ebenfalls naheliegend.

Literatur:

- 1 Abgesehen von einigen Abänderungen und Erweiterungen ist dieser Artikel erschienen als:
Neue Möglichkeiten der Strommessung im Physikunterricht. In: Physik und Didaktik 1 / 1993.
- 2 Lemme H.: Sensoren in der Praxis. München: Franzis 1990
- 3 Heidenreich W.: Aufbautechniken für Halbleiter-Magnetfeldsensoren. Siemens Sonderdruck aus Technisches Messen tm 56 (1989) 11
- 4 Führer A., Heidemann K., Nerreter W.: Grundgebiete der Elektrotechnik (Bd.1: Stationäre Vorgänge). München: Hanser 1983
- 5 v.Rhönneck C.: 10 Jahre Untersuchungen von Schülervorstellungen - Ertrag und Perspektiven. In: Kuhn W. (Hrsg.): Vorträge Physikertagung 1991 Erlangen; DPG 1991
- 6 Pfund H., Duit R.: Bibliographie Alltagsvorstellungen und naturwissenschaftlicher Unterricht; Kiel: IPN 1991
- 7 Heege R.: Vorbemerkungen (Vorbemerkungen zum Themenheft Anschaulichkeit und Beziehungsdenken). In: Der Physikunterricht 1 (1984); S. 3
- 8 Caillot M., Chalouhi E.: Problemlösen im Bereich der E-Lehre. In: Der Physikunterricht 2 (1984), S. 36ff