

# Förderung der Variablen-Kontroll-Strategie im Physikunterricht



MARTIN SCHWICHOW – SIMON CHRISTOPH – HENDRIK HÄRTIG

**Damit Schüler/innen lernen selbstständig zu experimentieren, sollten im Unterricht Strategien der experimentellen Erkenntnisgewinnung thematisiert werden. Eine grundlegende Strategie der experimentellen Erkenntnisgewinnung ist die Variablen-Kontroll-Strategie (VKS). Der folgende Beitrag stellt ein VKS-Übungsexperiment zum Thema Leitfähigkeit sowie Merkmale von VKS-Übungsexperimenten und Befunde einer unterrichtlichen Erprobung in einer achten Jahrgangsstufe vor.**

## 1 Einleitung

Spätestens seit Einführung der bundesweit gültigen Bildungsstandards für den naturwissenschaftlichen Unterricht ist die Vermittlung von Kompetenzen zur selbstständigen Erkenntnisgewinnung durch *Experimentieren* ein zentrales Ziel von Physikunterricht (KMK, 2005). Eine Förderung entsprechender Kompetenzen bedarf spezifischer Lerngelegenheiten. In der

Unterrichtspraxis dominiert bislang der Einsatz von Experimenten, die primär die Vermittlung von Fachwissen zum Ziel haben. Ein Kennzeichen dieser Experimente ist, dass die Schüler/innen eine detaillierte Experimentieranleitung abarbeiten und nicht selbstständig Experimente planen, durchführen und auswerten (HOFSTEIN & LUNETTA, 2004). Solche Experimente vermitteln einerseits ein verzerrtes Bild der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung, andererseits schränken

sie die Selbsttätigkeit und damit auch die Lerngelegenheiten der Schüler/innen stark ein, so dass eine positive Wirkung auf die experimentelle Kompetenz kaum zu erwarten ist (KIRCHER, GIRWIDZ & HÄUSSLER, 2009). Zur Förderung experimenteller Kompetenz werden daher Experimente benötigt, die den Schüler/innen Entscheidungsmöglichkeiten bei der Planung, Durchführung und Auswertung von Experimenten geben. In diesem Beitrag wird ein solches Schülerexperiment vorgestellt, anhand dessen das Durchführen kontrollierter Experimente gelernt bzw. geübt werden kann.

## 2 Die Variablen-Kontroll-Strategie

Um möglichst eindeutige Aussagen über Ursache-Wirkungsbeziehungen zu erlangen, sollte in Experimenten nur eine Variable verändert, die Auswirkungen auf die potentielle Wirkung beobachtet und sämtliche weiteren Variablen konstant gehalten werden. Das Vergleichen kontrollierter Bedingungen ist ein Wesensmerkmal wissenschaftlicher Experimente (WEIZSÄCKER, 1951). Wird z. B. der Einfluss der Pendellänge auf die Schwingungsdauer eines Pendels untersucht, so sollten die verglichenen Pendel sich ausschließlich in ihrer Länge und in sonst keiner Variablen unterscheiden. Würden sich die Pendel zusätzlich z. B. in der Masse unterscheiden, wäre es nicht möglich zuzuordnen, ob unterschiedliche Schwingungsdauern durch die Fadenlänge oder die Pendelmasse verursacht werden (Abb. 1).

Dieses grundlegende Prinzip der experimentellen Erkenntnisgewinnung wird als Variablen-Kontroll-Strategie (VKS) bezeichnet. Die VKS ist nicht nur bei der Planung, sondern auch bei der Durchführung und Auswertung von Experimenten von Bedeutung. So sollte bei der Durchführung der Experimente auf die Einhaltung der VKS geachtet werden. Bei der Auswertung von Experimenten ist die Suche nach Variablen, die möglicherweise zusätzlich zu der untersuchten Variable variiert wurden (konfundierende Variablen) eine wichtige Qualitätskontrolle. Aufgrund der zentralen Rolle der VKS in der wissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung sollte sie ebenfalls ein eigenständiges Lernziel von Physikunterricht sein. Ohne explizite Vermittlung der VKS sind vor allem jüngere und leistungsschwächere Schüler/innen häufig nicht in der Lage, kontrollierte Experimente zu planen, durchzuführen und auszuwerten. Typische Fehler, die Schüler/innen beim Experimentieren machen sind, dass sie (1) mehr als eine Variable,

(2) keine Variable oder (3) die falsche Variable zwischen zwei kontrastierten Experimenten verändern (SILER & KLAHR, 2012). Befunde von Interventionsstudien zeigen, dass Schüler/innen, die in der VKS unterrichtet wurden, anschließend signifikant häufiger kontrollierte Experimente planen und durchführen (SCHWICHOW, CROKER, ZIMMERMAN, HÖFFLER, & HÄRTIG, eingereicht). Zur Förderung experimenteller Kompetenz sollte die VKS daher explizit im Unterricht thematisiert und ihre Anwendung geübt werden. Dem Üben kommt dabei ein besonderer Stellenwert zu, da es für eine langfristige Verfügbarkeit von Lerninhalten sowie für ein erfolgreiches Anwenden von Strategien erforderlich ist (HÄNSEL, 2014). Experimente, die ein sinnvolles Üben der VKS ermöglichen, unterscheiden sich allerdings von Schülerexperimenten, die eine Vermittlung von Fachwissen zum Ziel haben.

## 3 Merkmale von VKS Übungsexperimenten

In Schülerexperimenten, die zur Vermittlung von Fachwissen konzipiert werden, erhalten die Schüler/innen häufig Versuchsmaterial, das bereits von der Lehrkraft auf das zur Durchführung eines kontrollierten Experiments notwendige Material beschränkt wurde. Die Anzahl an möglichen Versuchsaufbauten ist bei solchen Experimenten folglich gering, weil der Erwerb experimenteller Kompetenzen nicht das intendierte Lernziel ist. Die Schüler/innen müssen bei traditionellen Schülerexperimenten nur selten Variablen auswählen bzw. nicht entscheiden, welche Versuchsbedingungen zu vergleichen sind, um aussagekräftige Ergebnisse zu bekommen (siehe z. B. PHYWE, o. J.). Eine Beschränkung der Versuchsmaterialien mag zur Reduktion der Aufgabenkomplexität sinnvoll sein, wenn ein Schülerexperiment vor allem mit dem Ziel der Vermittlung von Fachwissen eingesetzt wird. Allerdings sind solche Experimente als Übungsexperimente für die VKS ungeeignet, da die Schüler/innen nicht entscheiden können, welche Versuchsbedingungen und welche Variablen bzw. Variablenausprägungen sie vergleichen wollen.

Im Unterschied zu Schülerexperimenten mit dem Fokus Fachwissen müssen bei VKS Übungsexperimenten den Schüler/innen/n daher mehr Materialien zur Verfügung gestellt werden, als sie für die Durchführung eines geeigneten Experiments benötigen würden. Dadurch wird gewährleistet, dass die Schüler/innen eigenständig Variablen und Variablenausprägungen auswählen. Die Schwierigkeit von VKS Übungsexperimenten

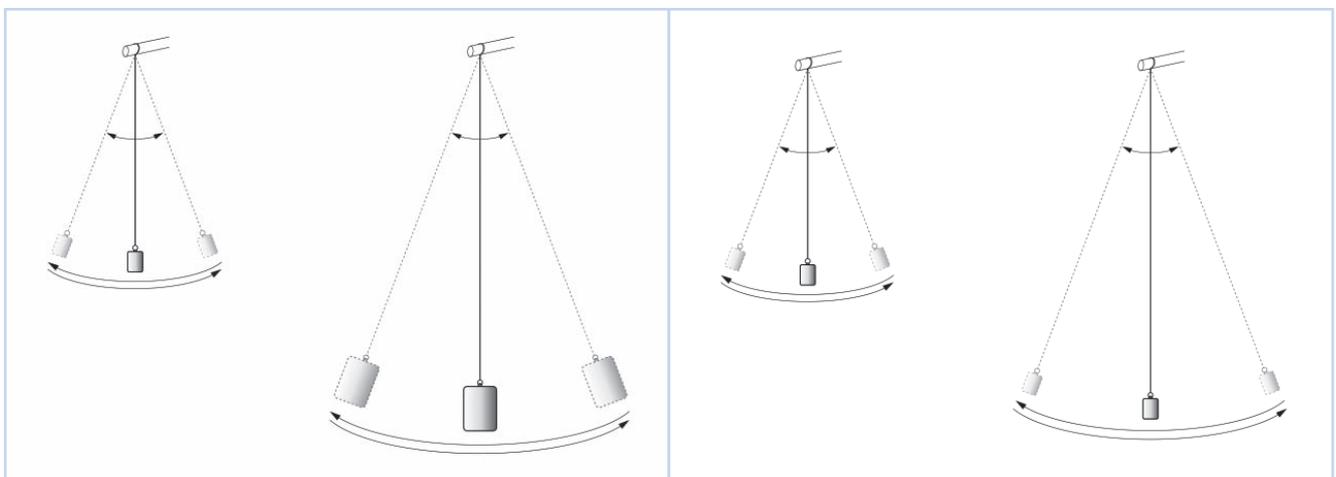


Abb. 1. Beispiel für ein unkontrolliertes (links) und kontrolliertes Experiment (rechts) zum Einfluss der Pendellänge auf die Schwingungsdauer (nach INHELDER & PIAGET, 1958, 68)

kann durch Variation der Anzahl an Variablen und Variablenausprägungen variiert werden. Je geringer die Kombinationsmöglichkeiten aus Variablen und Variablenausprägung sind, desto geringer wird die Anzahl an Experimenten, die mit den gegebenen Materialien durchgeführt werden können und desto leichter werden die Übungsexperimente (STAVER, 1986).

Da der Fokus dieser Übungsexperimente ausschließlich auf der VKS liegt, sollten andere schwierigkeiterzeugende Merkmale möglichst reduziert werden. So sollten z. B. die Experimentiermaterialien so gewählt werden, dass sämtliche kontrollierten Experimente möglichst eindeutige Ergebnisse liefern. Andernfalls hängt es von der zufälligen Auswahl von Variablenausprägungen bzw. dem Fachwissen der Schüler/innen ab, ob sie eindeutige Ergebnisse erhalten. Zwar sind die Ergebnisse von wissenschaftlichen und offenen schulischen Experimenten häufig nicht eindeutig, doch dieser Aspekt der naturwissenschaftlichen Erkenntnisgewinnung soll mit VKS Übungsexperimenten nicht thematisiert werden.



Abb. 2. Übersicht über die verwendeten Experimentiermaterialien

#### 4 Ein VKS Übungsexperiment zum Thema Leitfähigkeit

Die vorgestellten Merkmale von VKS Übungsexperimenten wurden bei der Entwicklung eines entsprechenden Schülerexperiments zum Thema Leitfähigkeit berücksichtigt. Das Thema Leitfähigkeit eignet sich im Inhaltsbereich Elektrizitätslehre zum Üben der VKS, da der Widerstand eines Leiters u. a. von den drei zu variierenden Variablen Leiterlänge, Leiterquerschnittsfläche und Leitermaterial abhängt. Folglich können die Schüler/innen eine wirkliche Variablenkontrolle vornehmen, wenn sie den Einfluss dieser Variablen auf den Widerstand eines Leiters untersuchen. Außerdem kann durch geschickte Wahl des Leitermaterials gewährleistet werden, dass sämtliche kontrollierten Experimente auch eindeutige Ergebnisse liefern. Ein weiterer Vorteil des Themas Leitfähigkeit ist, dass es ein fester Bestandteil von Curricula für die Sekundarstufe I in zahlreichen Bundesländern ist, so dass die vorgestellten Experimente leicht in den Unterricht zu integrieren sind. Aufgrund der relativ hohen Komplexität der Experimente (es sind drei Variablen unabhängig voneinander zu untersuchen) sollten die Schüler/innen vor dem Experimentieren allerdings eine Einführung in die VKS erhalten.

Der spezifische Widerstand eines Leiters kann durch die Formel

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

beschrieben werden. Dabei entspricht  $\rho$  dem materialabhängigen spezifischen Widerstand des Leiters,  $l$  der Leiterlänge und  $A$  dem Flächeninhalt des Leiterquerschnitts. Als Leitermaterialien wurden Konstantan ( $\rho = 0,5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ) und Eisen ( $\rho = 0,1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ) gewählt, da bei diesen Materialien schon relativ kleine Längen- bzw. Querschnittsänderungen aufgrund ihres relativ großen spezifischen Widerstands einen messbaren Effekt auf den Widerstand des Leiters haben. Bei Kupfer sind die Effekte aufgrund des kleineren spezifischen Widerstands ( $\rho = 0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ) deutlich geringer. Für jedes Material wurden Leiter in sämtlichen Kombinationen dreier Längen (15 cm, 30 cm, 45 cm) und zweier Querschnitte (0,2 mm<sup>2</sup>, 0,4 mm<sup>2</sup>) angefertigt. Den Schüler/innen wurden folglich zwei (Materialien) mal drei (Längen) mal zwei (Querschnitte) d. h. 12 unterschiedliche Leiter zur Verfügung gestellt (siehe Tab. 1).

		Länge		
		15 cm	30 cm	45 cm
Querschnittsfläche	0,2 mm <sup>2</sup>	Eisen/ Konstantan	Eisen/ Konstantan	Eisen/ Konstantan
	0,4 mm <sup>2</sup>	Eisen/ Konstantan	Eisen/ Konstantan	Eisen/ Konstantan

Tab. 1. Übersicht über die im Experiment zur Verfügung gestellten Leiter

Unter der Annahme, dass in einem Experiment mindestens zwei unterschiedliche Leiter verglichen werden, könnten mit den Experimentiermaterialien insgesamt  $N = 4.083$  verschiedene Experimente durchgeführt werden. Von diesen theoretisch möglichen Vergleichen stellen jedoch nur 16 Vergleiche (bei der Frage nach dem Einfluss der Länge) bzw. 6 Vergleiche (bei der Frage nach dem Einfluss des Leitermaterials bzw. des Querschnitts) ein kontrolliertes Experiment dar. Dieses Beispiel zeigt, wie groß und unübersichtlich die Anzahl theoretisch möglicher Experimente schon bei drei Variablen ist, und verdeutlicht, dass die Auswahl geeigneter Vergleiche keineswegs trivial ist. Erst die Beherrschung der VKS ermöglicht es den Schüler/innen, aus der großen Auswahl an möglichen Vergleichen diejenigen Vergleiche auszuwählen, die kontrollierte Experimente darstellen, auf deren Grundlage sinnvolle Schlüsse gezogen werden können.

Für den Einsatz im Unterricht wurden die 12 Leiter (siehe Tabelle 1) zu einer Experimentierbox zusammengestellt. Jede Form der Vorsortierung der Leiter wurde vermieden, da das Sortieren der Leiter nach ihren Eigenschaften (sprich nach den relevanten Variablen) ein wichtiger Teilschritt bei der Planung eines Experiments ist. Der Leiterwiderstand soll von den Schüler/innen mit einer einfachen Strom-Spannungsmessung bestimmt werden, so dass neben der Experimentierbox jeweils eine Spannungsquelle, ein Amperemeter, ein Voltmeter und ein Taschenrechner erforderlich sind. Mit den beschriebenen Materialien können Experimente zum Einfluss der drei Variablen Leiterlänge, -querschnitt und -material auf den Widerstand des Leiters durchgeführt werden. Der Messbereich des Amperemeters sollte zwischen den Messungen nicht variiert werden, da ein veränderter Innenwiderstand des Amperemeters die Spannungs- und Strommessung beeinflusst. Ferner ist die Spannung

nur über dem Leiter (spannungsrichtige Widerstandsmessung) und nicht über der Spannungsquelle oder über dem Leiter und dem Amperemeter zu messen. Der Stromfluss durch das Voltmeter ist aufgrund des großen Innenwiderstands des Voltmeters im Vergleich zum Widerstand des Leiters genauso wie der Einfluss der Kontaktstecker zu vernachlässigen. Bei der Durchführung der Experimente sollte darauf geachtet werden, dass die Strom- und Spannungsmessung relativ zügig vorgenommen werden, da die Schaltung einen Kurzschluss darstellt und es zu einer stärkeren Erwärmung der Leiter kommen kann. Aus diesem Grund sollten die Schüler/innen auch darauf hingewiesen werden, den Leiter nicht zu berühren und keine Spannungen oberhalb von 2 V zu wählen. Die Informationen zum Messvorgang sollten den Schüler/innen explizit mitgeteilt werden, um ein erfolgreiches und sicheres Messen zu gewährleisten. Im Gegensatz zu Experimenten mit dem Fokus auf Fachwissen erhalten die Schüler/innen jedoch keine detaillierte Anleitung, wie kontrollierte Experimente zu den gegebenen Forschungsfragen durchzuführen sind. Die Schüler/innen müssen somit selbstständig entscheiden welche Variablenausprägungen sie wählen und vergleichen.

Zur Anleitung und als Hilfestellung für die Schüler/innen wurde ein *Arbeitsblatt* (siehe Online-Beilage) entwickelt. Auf dem Arbeitsblatt werden zunächst das fachliche Ziel des Experiments sowie das Vorgehen bei der Planung kontrollierter Experimente und bei der Bestimmung von Widerständen wiederholt. Anschließend erhalten die Schüler/innen jeweils ein vorgefertigtes Protokoll (siehe Online-Beilage) für die Untersuchung der drei Variablen Leiterlänge, -querschnitt und -material. Neben den entsprechenden inhaltlichen »Forschungsfragen« enthalten die Protokolle Dokumentationstabellen, Platz für eine graphische Auswertung, vorgefertigte Antwortsätze und eine Reflexionsfrage. Durch die Reflexionsfrage sollen die Schüler/innen zum Nachdenken über ihr experimentelles Vorgehen angeregt werden und auf die Bedeutung der Variablenkontrolle für die Güte der experimentellen Befunde eingehen. Zwar wird auf dem Arbeitsblatt ein allgemeiner Hinweis zum adäquaten Vorgehen beim Experimentieren gegeben, jedoch enthalten weder die Protokolle noch das Arbeitsblatt eine konkrete Anleitung (Rezept), wie ein kontrolliertes Experiment zu den entsprechenden Forschungsfragen durchzuführen ist. Die relativ geschlossene Protokollform mit vorgegebenen Antwortsätzen wurde gewählt, da die Komplexität der Experimente durch die offene Aufgabenstellung und die große Anzahl möglicher Experimente bereits relativ groß ist.

### 5 Unterrichtliche Erprobung der Übungsexperimente

Die VKS Übungsexperimente wurden im Rahmen einer Doppelstunde mit N = 46 Schüler/innen der achten Jahrgangsstufe eines Gymnasiums erprobt. Im vorangegangenen Unterricht wurden das Messen von Stromstärke und Spannung und der Ohm'sche Widerstand bereits behandelt, so dass die Schüler/innen das notwendige Fachwissen zur Bestimmung von Widerständen besaßen. Zu Beginn der Doppelstunde erfolgte ein kurzer Unterrichtseinstieg mittels eines gelenkten Unterrichtsgesprächs, in dem die Merkmale kontrollierter (aussagekräftiger) Experimente besprochen wurden. Die verbleibenden etwa 65 Minuten haben die Schüler/innen in Kleingruppen von bis zu vier Personen experimentiert und die Arbeitsblätter bearbeitet. Am Ende der Doppelstunde wurden die Arbeitsblätter zur Evaluation der entwickelten Übungsexperimente eingesammelt. Ziel der Evaluation ist es, herauszufinden, inwiefern Schüler/innen in der Lage sind, aus einer Vielzahl von möglichen Experimenten geeignete (kontrollierte) Experimente

auszuwählen. Es wurde kein Prä-Post Vergleich durchgeführt, da es ausschließlich um eine Erprobung des Übungsmaterials ging.

Zu diesem Zweck wurde bei der Auswertung der Arbeitsblätter zunächst untersucht, ob und wie viele kontrollierte und unkontrollierte Experimente (Vergleiche) die Schüler/innen in ihren Protokollen aufgezeichnet haben. Als ein kontrolliertes Experiment wurde ein Vergleich von mindestens zwei Teilerperimenten gewertet, die sich nur in der untersuchten Variable unterscheiden. Bei der Frage nach dem Einfluss der Leiterlänge auf den Widerstand stellen z. B. nur solche Vergleiche ein kontrolliertes Experiment dar, die Leiter unterschiedlicher Länge aber gleichen Querschnitts und Materials vergleichen. Darüber hinaus wurde bewertet, ob die Schüler/innen fachlich korrekte Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen gezogen haben und ob sie bei der Beantwortung der Reflexionsfrage auf die VKS eingegangen sind. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3–5 dargestellt. Es zeigt sich, dass die meisten Schüler/innen kontrollierte Experimente durchgeführt haben und nur wenige Schülerexperimente unkontrolliert sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass Schüler/innen aus der Vielzahl von möglichen Experimenten zufällig ein kontrolliertes Experiment auswählen, liegt bei nur 0,1 % für die Fragen zum Leitermaterial und -querschnitt bzw. 0,3 % für die Frage zur Leiterlänge. Folglich

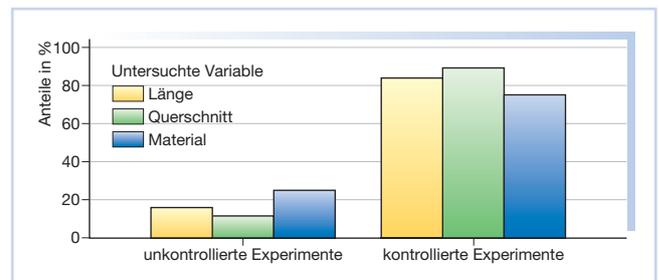


Abb. 3. Anteil an den Schülerexperimenten, die kontrollierte bzw. unkontrollierte Experimente darstellen, aufgeteilt nach der untersuchten Variable

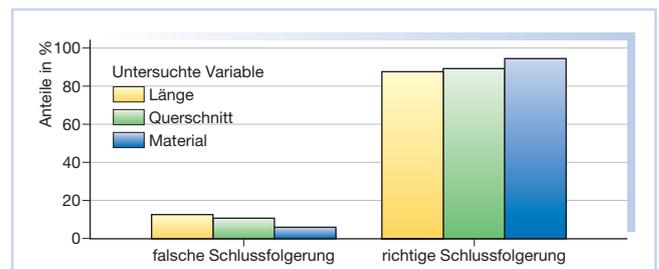


Abb. 4. Anteil der fachlich richtigen Schlussfolgerungen dargestellt für alle drei untersuchten Variablen

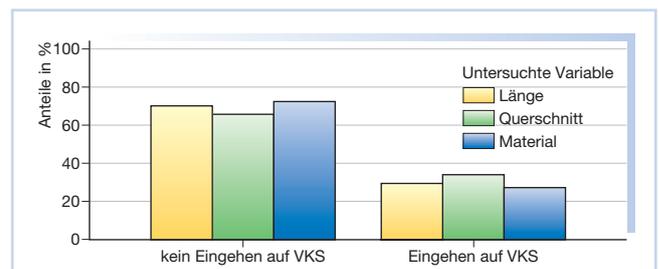


Abb. 5. Schülerantworten auf die Reflexionsfrage; Anteil der Schüler/innen die korrekt auf die VKS in ihren Antworten eingehen

scheinen die meisten Schüler/innen bewusst kontrollierte Experimente durchgeführt zu haben. Des Weiteren hat die überwiegende Mehrheit der Schüler/innen auch die entsprechende fachlich korrekte Schlussfolgerung gezogen. Bei der Beantwortung der Reflexionsfrage hingegen haben nur wenige Schüler/innen entweder explizit benannt welche Variablen sie konstant gehalten haben bzw. argumentiert, dass ihre Befunde gültig sind, da sie auf kontrollierten Experimenten beruhen.

Die Befunde der Unterrichtserprobung zeigen, dass die meisten Schüler/innen in der Lage sind aus der großen Anzahl an theoretisch möglichen Vergleichen diejenigen auszuwählen, die kontrollierte Experimente darstellen. Folglich sind die entwickelten Übungsexperimente nicht zu komplex und für den Einsatz im Unterricht geeignet. Es scheint für die Schüler/innen jedoch deutlich schwieriger zu sein, die Relevanz der VKS für die Gültigkeit der experimentellen Befunde zu benennen. Da gerade dieser Reflexionsprozess jedoch für die Kontrolle eigener Befunde und für den wissenschaftlichen Argumentationsprozess von großer Bedeutung ist, sollte dieser Aspekt im Unterricht explizit behandelt werden.

## 6 Fazit

Das vorgestellte VKS Übungsexperiment konfrontiert die Schüler/innen im Vergleich zu Experimenten, die zur Vermittlung von Fachwissen konzipiert wurden, mit wesentlich mehr Experimentiermaterialien. Trotz der für die Schüler/innen ungewohnten Anforderung scheinen die vorgestellten Experimente für den Einsatz im Unterricht geeignet, da die meisten Schüler/innen der Erprobungsklassen bewusst und nicht zufällig kontrollierte Experimente durchgeführt haben. Dies spricht auch dafür, dass die vorgestellten Merkmale von VKS Übungsexperimenten auf andere physikalische bzw. allgemeine naturwissenschaftliche Kontexte übertragen werden können, um weitere VKS Übungsexperimente zu konstruieren. Entsprechende Übungsexperimente wurden bereits zu den Themen Schmelzen von Eis, Elektromagnetismus, das physikalische Pendel und Strahlungswärme erstellt. Die Materiallisten und Protokollbögen können bei den Autoren angefragt werden.

Es zeigt sich allerdings auch, dass ein Großteil der Schüler/innen bei der Reflexion über ihr experimentelles Vorgehen nicht auf die VKS eingeht. Dies ist problematisch, da eine kritische Reflexion darüber ob Befunde auf kontrollierten Experimenten beruhen eine zentrale Fähigkeit für das Arbeiten mit eigenen bzw. fremden experimentellen Befunden ist. Darüber hinaus fördert eine adäquate Reflexion des eigenen experimentellen Vorgehens ein nachhaltiges Lernen (SMETANA & BELL, 2012). Wenn dieses im Rahmen der Bearbeitung der Arbeitsblätter nicht erfolgt, so ist eine Reflexion im Unterrichtsgespräch denkbar. Um einen solchen Reflexionsprozess zu initiieren, könnten z. B. in einer Tabelle die Längen, Querschnitte und Materialien der von den Schüler/inne/n verglichenen Leiter gesammelt und verglichen werden. Bei alternativen Experimenten, deren Aufbau auf einem Foto gut nachvollziehbar ist, sind auch Fotos der Schülerexperimente zur Initiierung eines Reflexionsprozesses denkbar. Fotos bieten zudem für die Lehrkraft eine Möglichkeit, die experimentellen Fähigkeiten der Schüler/innen zu evaluieren, typische Fehler zu erkennen oder ein gruppenspezifisches Feedback zu geben. Die vorgestellten Übungsexperimente eignen sich zum Einsatz im Physikunterricht und können ein entscheidender Schritt zur Förderung der selbstständigen Erkenntnisgewinnung durch Experimentieren sein. Schlussendlich ist das Beherrschen der VKS nur ein erster Schritt zum erfolgreichen selbstständigen Experimentieren im Unterricht.

## Literatur

- HÄNSEL, M. (2014). Intelligentes Üben in den Naturwissenschaften. *MNU*, 67(5), 288–291.
- HOFSTEIN, A. & LUNETTA, V. N. (2004). The laboratory in science education: Foundations for the twenty-first century. *Science Education*, 88(1), 28–54.
- INHELDER, B. & PIAGET, J. (1958). *The growth of logical thinking from childhood to adolescence: An essay on the construction of formal operational structures*. London: Routledge and Kegan Paul.
- KIRCHER, E., GIRWIDZ, R. & HÄUSSLER, P. (2009). *Physikdidaktik (2nd ed.)*. Heidelberg: Springer.
- KMK. (2005). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss: Beschluss vom 16.12.2004*. München: Wolters Kluwer Deutschland GmbH.
- PHYWE (o. J.). *Der Widerstand von Drähten – Abhängigkeit von Länge und Querschnitt*. [http://repository.phywe.de/files/versuchsanleitungen/p1372500/d/13725\\_01.pdf](http://repository.phywe.de/files/versuchsanleitungen/p1372500/d/13725_01.pdf) [05.07.2015].
- SCHWICHOW, M., CROKER, S., ZIMMERMAN, C., HÖFFLER, T. & HÄRTIG, H. (submitted). Teaching the Control-of-Variables Strategy: A Meta Analysis.
- SILER, S. A. & KLAHR, D. (2012). Detecting, classifying and remediating: Children's explicit and implicit misconceptions about experimental design. In R. W. PROCTOR & E. J. CAPALDI (Eds.): *Psychology of science. Implicit and explicit processes*. New York, NY: Oxford University Press, 137–180
- SMETANA, L. K. & BELL, R. L. (2012). Computer simulations to support science instruction and learning: A critical review of the literature. *International Journal of Science Education*, 34(9), 1337–1370.
- STAVER, J. R. (1986). The effects of problem format, number of independent variables, and their interaction on student performance on a control of variables reasoning problem. *J. Res. Sci. Teach.*, 23(6), 533–542.
- WEIZSÄCKER, C. F. VON. (1951). *Zum Weltbild der Physik (5th ed.)*. Stuttgart: Hirzel.
- MARTIN SCHWICHOW hat an der Philipps-Universität Marburg die Fächer Physik und Geographie auf Lehramt studiert. In seinem Promotionsprojekt beschäftigt er sich mit der Förderung experimenteller Kompetenz im Physikunterricht. Seit 2012 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Didaktik der Physik am Leibniz Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik (IPN) in Kiel. Olshausenstraße 62, 24098 Kiel. [schwichow@ipn.uni-kiel.de](mailto:schwichow@ipn.uni-kiel.de).
- SIMON CHRISTOPH hat an der Universität Kiel die Fächer Physik und Mathematik auf Lehramt studiert. Seit August 2015 ist er Lehrer im Vorbereitungsdienst an der Jungmannschule in Eckernförde. Er hat im Rahmen seiner Masterarbeit u. a. die vorgestellten Experimentiermaterialien entwickelt. [simonchristoph@web.de](mailto:simonchristoph@web.de).
- Dr. phil. nat. HENDRIK HÄRTIG ist Juniorprofessor am IPN – Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel und unterrichtet Physik an der Humboldt-Schule in Kiel. Zu seinen Forschungsinteressen gehören der Einfluss der Sprache auf Kompetenzerwerb im Physikunterricht und die Förderung experimenteller Kompetenzen. [haertig@ipn.uni-kiel.de](mailto:haertig@ipn.uni-kiel.de). ■