

Der äußere Fotoeffekt in neuem Licht



Ein 3D-gedrucktes, Mikrocontroller-gestütztes Schülerexperiment neuer Art

FABIAN BERNSTEIN – OLIVER KELLER – SASCHA SCHMELING – THOMAS WILHELM

Die quantitative Untersuchung des fotoelektrischen Effekts ist ein zentrales Experiment im Physikunterricht der Oberstufe und dient der Einführung und experimentellen Begründung der Lichtquantenhypothese. Eine Durchführung als Schülerexperiment ist aus Kostengründen allerdings zumeist nicht möglich. Um Abhilfe zu schaffen, wurde am Schülerlabor des CERN ein 3D-gedrucktes und Mikrocontroller-gestütztes Lehrmittel entwickelt, um Schüler/innen zu ermöglichen, die physikalischen Zusammenhänge selbst experimentell zu erkunden.

1 Zum Stellenwert des Fotoeffekts im Physikunterricht

Die Untersuchung des äußeren Fotoeffekts ist eines jener Experimente, das sowohl zentral in den Physik-Lehrplänen verankert ist als auch wissenschaftsgeschichtlich eine besondere Stellung einnimmt. Bekanntlich erhielt ALBERT EINSTEIN seinen Nobelpreis 1921 nicht für die Spezielle oder Allgemeine Relativitätstheorie, sondern für seine Erklärung dieses fotoelektrischen Effektes, die er 1905 in seiner Abhandlung „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ gegeben hatte (EINSTEIN, 1905).

Im unterrichtlichen Kontext wird eine quantitative experimentelle Untersuchung des Fotoeffektes zumeist eingesetzt, um die Lichtquantenhypothese einzuführen, indem auf Widersprüche der experimentellen Befunde zu den aus der klassischen Elektrodynamik abgeleiteten Erwartungen verwiesen wird. Zwar weist KRAGH (1992) überzeugend darauf hin, dass die typische unterrichtliche Vorgehensweise gegenüber den tatsächlichen wissenschaftsgeschichtlichen Abläufen stark verkürzt ist; dennoch hat sie sich vom didaktischen Standpunkt aus bewährt und erlaubt, zentrale Konzepte der modernen Physik an einem Beispiel von überschaubarer Komplexität zu diskutieren. Man sollte sich allerdings bewusst machen, dass es sich um eine stark simplifizierende Darstellung handelt und dass der Fotoeffekt einschließlich der Frequenzabhängigkeit durchaus im Rahmen semiklassischer Näherungen, die keine Quantisierung des elektromagnetischen Feldes voraussetzen, erklärt werden kann (siehe z.B. MANDEL & WOLF, 2008).

Für die experimentelle Umsetzung im Unterricht wird zumeist auf kommerziell erhältliche Lehrmittel zurückgegriffen, die sich in ihrem Aufbau geringfügig unterscheiden: So werden je nach Hersteller LEDs oder Quecksilberdampflampen als Lichtquelle eingesetzt und die Gegenspannung wird teils als externe Spannungsquelle, teils durch einen Kondensator zwischen Anode und Kathode, der durch den Fotostrom geladen wird, realisiert. Die verschiedenen experimentellen Aufbauten eint jedoch, dass sie zumeist so kostenintensiv sind (üblicherweise entstehen für einen experimentellen Aufbau Kosten in Höhe von einigen Tausend Euro), dass der Einsatz als Schülerexperiment ausgeschlossen ist; so bleibt allein die Durchführung als Demonstrationsexperiment.

Alternativ zu den kommerziellen Lehrmitteln kommen kostengünstige Selbstbau-Varianten in Betracht (z.B. PRUTCHI & PRUTCHI, 2012, GARVER, 2008, und RABLAU et al., 2019), die allerdings nicht für den schulischen Unterrichtseinsatz, sondern für die universitäre Lehre bzw. das Heimexperimentieren konzipiert wurden und aufgrund abweichender Erfordernisse und Zielstellungen nur bedingt für den Einsatz im Physikunterricht geeignet sind.

2 Ein Lehrmittel neuer Art

Um dieses Dilemma von geeigneten, aber nicht finanzierbaren und finanzierbaren, aber ungeeigneten Lehrmitteln aufzulösen, wurde am S’Cool LAB – dem Schülerlabor des CERN – in Zusammenarbeit mit der Goethe-Universität Frankfurt am Main ein neuer Typus von Lehrmittel entwickelt (zu grundsätzlichen Erwägungen s. BERNSTEIN, KELLER, SCHMELING & WILHELM, 2021), der zugleich leistungsfähig, kostengünstig und für den Einsatz im Unterricht geeignet ist. Er soll den Schüler/innen ermöglichen, selbst zu experimentieren, dadurch eigene Erfahrungen zum Fotoeffekt zu sammeln und letztlich ein tieferes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge zu gewinnen.



Abb. 1. 3D-gedrucktes Experiment zum Fotoeffekt: Lichtquelle, Fotozelle (mittig mit gelbem Fuß), drei Displays und Bedienelemente

Der experimentelle Aufbau verbindet dabei Vorteile kommerzieller Lehrmittel – hohe Zuverlässigkeit, schneller Aufbau, Nutzerfreundlichkeit – mit denen von Selbstbau-Experimenten, insbesondere geringere Kosten und dadurch reduzierte Berührungssängste der Schüler/innen. Möglich wird dies durch die Verbindung von 3D-Druck, Arduino-Mikrocontroller und eigens entwickelten Shields (siehe Abb. 2 und 3) – dabei handelt es sich um Steckaufsätze für Arduino-Uno-Boards, die zusätzliche Funktionalität bereitstellen und direkt auf den Arduino Uno aufgesteckt werden können.

2.1 Das Experiment im Überblick: Übersicht, Aufbau, Montage

Das vollständig zusammengebaute Experiment, das ausschließlich aus LowCost-Teilen besteht, ist in Abbildung 1 zu sehen. Die mittig angeordnete Fozelle wird von einer wechselbaren LED beleuchtet und mittels einer aufsteckbaren schwarzen Kappe vom Umgebungslicht abgeschirmt. Die LED-Helligkeit und die Gegenspannung der Fotokathode lassen sich durch zwei Drehregler einstellen und werden zusammen mit dem Fotostrom auf drei Displays angezeigt. Dies ermöglicht die Bestimmung der Stoppspannungen für LEDs unterschiedlicher Wellenlänge (eine Stoppspannung ist die jeweilige Gegenspannung, bei der der Fotostrom null wird, wenn die Fozelle mit Licht einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt wird). Außerdem sind klassische Sättigungskurven für verschiedene LED-Helligkeiten damit experimentell bestimmbar. Neben einer manuellen Messwertaufnahme mithilfe der Displays können, sofern gewünscht, Messdaten per USB-Anschluss direkt auf einen Computer übertragen werden. Das ganze Experiment, das in seiner Handhabung kommerziellen Produkten nahezu ebenbürtig ist, kostet mit allen Bauteilen nicht mehr als 150 € und ist somit mehr als eine Größenordnung preisgünstiger als alle kommerziell verfügbaren Angebote. Dies ermöglicht Schüler/innen, selbst die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen physikalischen Größen zu erkunden.

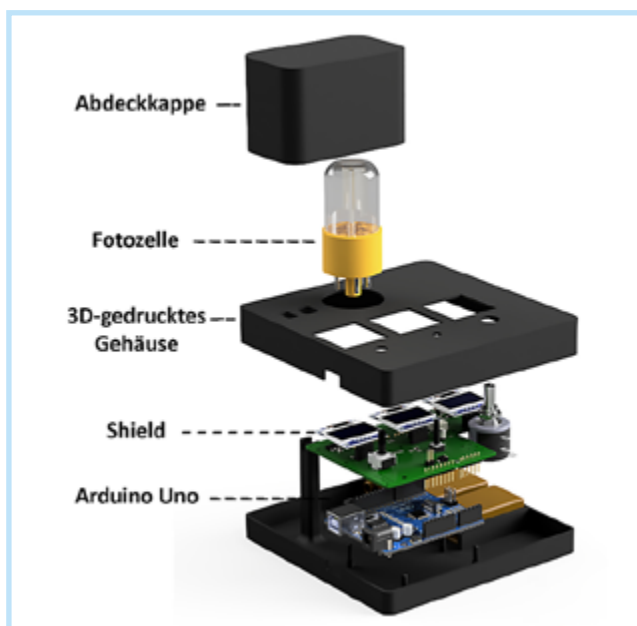


Abb. 2. Explosionsansicht des Fotoeffekt-Experiments

Der grundsätzliche Aufbau des Lehrmittels ist der Explosionsansicht Abbildung 2 zu entnehmen. In das 3D-gedruckte Gehäuse wird ein handelsüblicher Arduino-Mikrocontroller eingesetzt, der Steuerung und Messdatenaufnahme verwaltet. Um einen schnellen, zuverlässigen und unkomplizierten Aufbau zu ermöglichen, wurde die zusätzlich erforderliche Messelektronik (wie z.B. das Nanoamperemeter zur Messung des Fotostroms) in eine eigene Platine bzw. Leiterplatte – ein sogenanntes „Shield“, siehe Abb. 3 – integriert. Das bringt den großen Vorteil mit sich, dass Fehlerquellen minimiert werden und der Zusammenbau des Experiments in einigen Minuten vonstatten geht. Ein solches Shield kann man online kostengünstig bestellen, wenn man die erforderlichen Design-Dateien (im sogenannte „Gerber“-Format, die den Aufbau der Leiterplatte spezifizieren) übermittelt. In einem zweiten Schritt wird das Shield auf den Mikrocontroller aufgesteckt. Abschließend sind noch einige externe Bauteile – wie das Drehpotentiometer, die Displays und die Fozelle – einzusetzen oder mit Schraubverbindungen anzuschließen. Das 3D-gedruckte Gehäuse beinhaltet sowohl Halterungen für Fozelle, Arduino-Mikrocontroller und Shield als auch Aussparungen für die Anzeige- und Bedienelemente sowie eine LED-Schnellwechsel-Fassung, so dass der Zusammenbau insgesamt nicht mehr als 15 Minuten in Anspruch nimmt.



Abb. 3. Das Fotoeffekt-Shield zum Aufstecken auf einen Arduino Uno

Eine vollständige, bebilderte Anleitung ist auf den Internetseiten des S’Cool LABs unter <https://scoolab.web.cern.ch/classroom-activities> verfügbar. Darüber hinaus stehen dort die .stl-Dateien für den 3D-Druck, der Sketch (d.h. das Programm, das auf den Arduino geladen wird) sowie die Gerber-Dateien für das Shield zum Download bereit.

Die Online-Bestellung von eigens entwickelten Leiterplatten, wie dem hier vorgestellten Shield, ist im schulischen Kontext bisher noch eher unüblich und erst in den letzten Jahren überhaupt erschwinglich geworden. Inzwischen ist es allerdings recht unkompliziert, auch dank offener Projekt-Plattformen wie www.kitspace.org, welche die Bestellung von Bauteilen und Platinen bei verschiedenen Anbietern mit wenigen Mausklicks bündeln. Alternativ genügt es, die zur Verfügung gestellten Dateien im Gerber-Format – welche die mechanischen Fertigungsdaten der Leiterplatte enthalten – direkt bei einem der zahlreichen Hersteller (wie z.B. JLCPCB, <https://jlcpcb.com/>) hochzuladen und die Bestellung auszulösen. Seit kurzer Zeit

ist es zudem möglich, vollständig „bestückte“ Leiterplatten günstig zu bestellen – das bedeutet, dass fast alle erforderlichen Bauteile bereits auf der Leiterplatte aufgelötet sind. Ein – zeitintensives und fehleranfälliges – händisches Löten entfällt weitestgehend. Die Leiterplatte, die man auf diese Weise erhält, ist direkt einsatzfähig und muss nur noch auf den Arduino Uno aufgesteckt und mit wenigen Komponenten verbunden werden.

Im Sinne der Open Hardware Bewegung sind alle Bestandteile des hier vorgestellten Experiments – Hardware wie Software – unter offenen Lizenzen veröffentlicht, frei herunterladbar, vollständig transparent und bei Bedarf auch modifizierbar.

2.2 Experimentelle Resultate

Um die Genauigkeit der entwickelten Messelektronik abzuschätzen (zur Spannungsmessung auf dem Shield wird ein ADS1115 Analog-Digitalwandler von Texas Instruments eingesetzt) wurden Vergleichsmessungen mit einem Fluke 89 IV Multimeter vorgenommen. Es zeigt sich, dass über den gesamten Messbereich eine Messgenauigkeit von ± 1 mV erreicht werden kann. Um den Nullpunkt wird mit ± 200 μ V noch eine deutlich höhere Präzision erzielt; dies ist für die Messung des Fotostromes bei der Gegenfeldmethode von Relevanz und entspricht einer Auflösung von ± 2 nA.

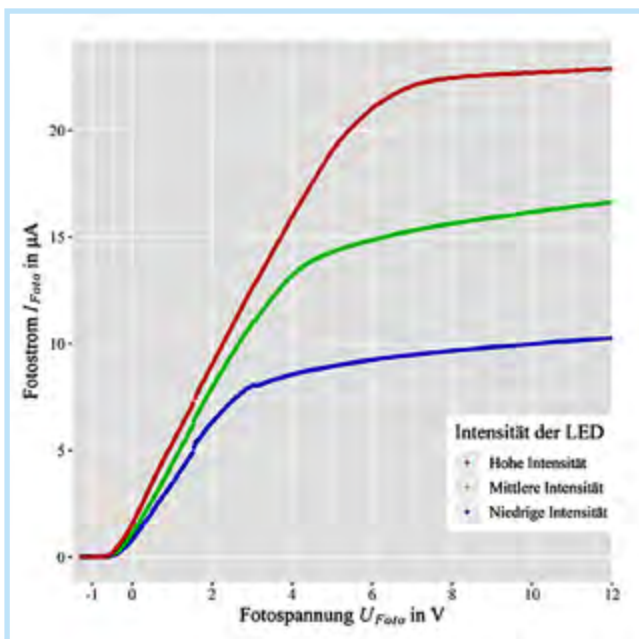


Abb. 4. Sättigungskurven des Fotostroms I für verschiedene Intensitäten bei konstanter Wellenlänge $\lambda_{LED} = 515$ nm

Einige Messdaten, die mit dem Aufbau aufgenommen wurden, sind in Abbildung 4 bis 7 graphisch aufbereitet. Dabei zeigt Abbildung 4 die charakteristische Abhängigkeit des Sättigungsstromes von der Intensität des eingestrahlenen Lichtes. Der Abbildung 5 ist zu entnehmen, dass die Stoppspannung erwartungsgemäß von der Intensität des einfallenden Lichtes unabhängig ist (hier bei $U_0 = 0,86$ V).

Indes gilt dies nicht für den Zusammenhang zwischen der Stoppspannung und der Frequenz des Lichtes, wie in Abbildung 6 zu sehen ist.

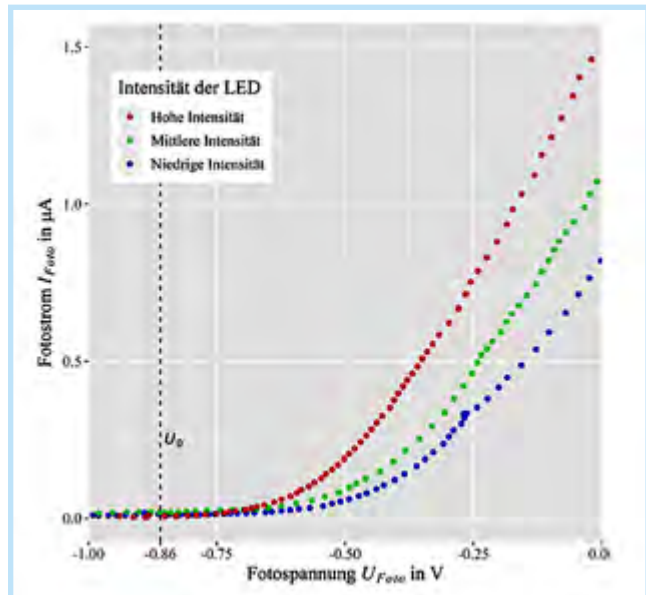


Abb. 5. Fotostrom in Abhängigkeit der Gegenspannung bei verschiedenen Intensitäten und konstanter Wellenlänge $\lambda_{LED} = 515$ nm

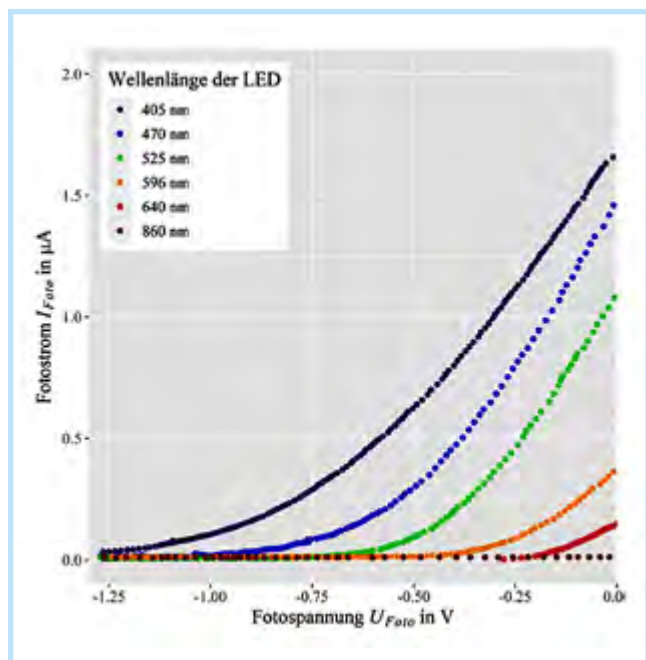


Abb. 6. Fotostrom in Abhängigkeit der Gegenspannung für LEDs verschiedener Wellenlänge

Deutlich wird, dass die Stoppspannung umso größer ist, je kleiner die Wellenlänge des eingestrahlenen Lichtes ist. Trägt man die jeweils erforderlichen Stoppspannungen multipliziert mit der Elementarladung e in ein $E(v)$ -Diagramm ein (Abb. 7), so lässt sich wegen $E(v) = hv - W$ aus der Steigung der Ausgleichsgeraden bekanntlich h bestimmen. Aus der durchgeführten Messung ergibt sich in guter Näherung der experimentelle Wert von h zu $5,8 \cdot 10^{-34}$ Js (Literaturwert: $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js). Die Austrittsarbeit kann nicht direkt als Achsenabschnitt abgelesen werden, ergibt sich aber aus dem Kurvenfit zu $2,0 \cdot 10^{-19}$ J = 1,2 eV.

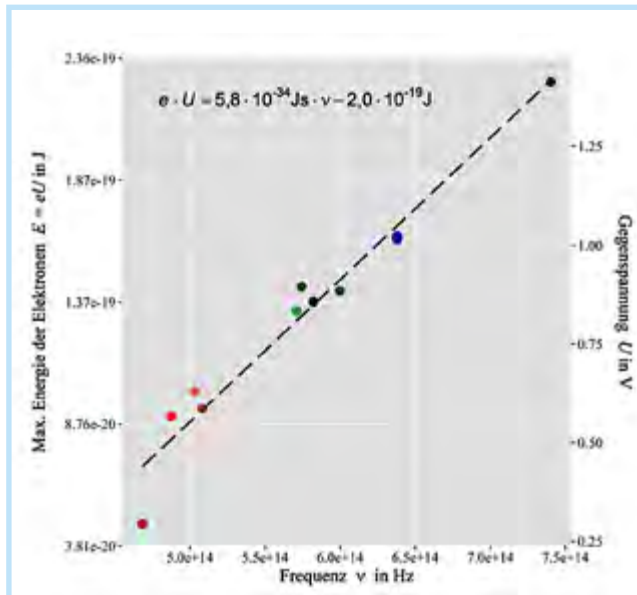


Abb. 7. Maximale Energie der ausgetretenen Elektronen (bzw. die Stoppspannung) in Abhängigkeit der Frequenz des einfallenden Lichtes

3 Diskussion & Ausblick

Der hier vorgestellte Aufbau bietet unseres Erachtens die Chance, ein Schlüsselexperiment der modernen Physik als Schülerexperiment durchzuführen und zeigt einen dritten Weg auf, zwischen der Verwendung kommerzieller Lehrmittel und dem aufwendigen Eigenbau von Experimentiermaterial. Die Entwicklungsperspektive ist eine doppelte: Einerseits sollen Schüler/innen das Experiment erfolgreich durchführen und zu wesentlichen Einsichten gelangen, aber andererseits ist uns nicht weniger wichtig, dass die Bedürfnisse von Lehrkräften, die sich aus den Rahmenbedingungen des schulischen Unterrichts ergeben, bei solchen Entwicklungen mitberücksichtigt werden. Dazu zählt aus unserer Sicht ein schneller, unkomplizierter Aufbau ebenso wie eine zuverlässige und reproduzierbare Messwertermittlung. Nur unter dieser Bedingung, so die Prämisse, ist ein solches Experiment praxistauglich und den Anforderungen des schulischen Alltags gewachsen.

Aus der generellen Modifizierbarkeit von offenen Lehrinstrumenten wie dem hier vorgestellten Versuchsaufbau zum Fotoeffekt ergeben sich außerdem weitere Anwendungsmöglichkeiten. Die genaue Strommessung im Nanoampere-Bereich eröffnet eine Reihe weiterer experimenteller Anwendungsmöglichkeiten, wie beispielsweise die Aufnahme von charakteristischen Strom-Spannungskurven von Halbleitern. Hierzu können handelsübliche Siliziumdioden oder aber auch selbstgebaute Metalloxid-Dioden genauer untersucht werden.

Insgesamt scheint uns, dass die Verbindung von 3D-Druck, Mikrocontrollern und speziellen Shields die Tür zu einer Vielfalt von hochentwickelten, aber kostengünstigen Experimenten zur modernen Physik aufstößt. Vom unterrichtlichen Standpunkt eröffnet das die Chance, je nach Kontext, verfügbarer Zeit und Schülerschaft unterschiedliche Lernangebote verschiedener Vertiefungsgrade zu unterbreiten. Wir hoffen, dass dies mittel-

fristig einen Beitrag dazu leisten kann, die experimentelle moderne Physik den Schüle/rinne/n näher zu bringen.

Literatur

BERNSTEIN, F., KELLER, O., SCHMELING, S., WILHELM, T. (2021). 3D-Druck und Mikrocontroller: Ein Dreamteam für Lowcost-Hightech-Experimente? Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung. <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/1155/1241> (03.11.2021)

EINSTEIN, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. Annalen der Physik, 322(17), 32–148. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/andp.19053220607> (03.11.2021)

KRAGH, H. (1992). A sense of history: History of science and the teaching of introductory quantum theory. Science Education, 1 (4), 349–363.

GARVER, W. (2008). LED Photoelectric Effect Apparatus. http://www.slapt.org/resources/equipment/LEDphotoelectric_apparatus.pdf (12.05.2021)

PRUTCHI, D., PRUTCHI, S. R. (2012). Exploring quantum physics through hands-on projects. Hoboken, N.J.: Wiley.

RABLAU, C. I., RAMABADRAN, U., BOOK, B., CUNNINGHAM, R. (2019). The photoelectric effect: project-based undergraduate teaching and learning optics through a modern physics experiment redesign. In Fifteenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2019, ETOP 2019 Papers (Optical Society of America, 2019) Beitrag 11143_135. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11143/1114335/The-photoelectric-effect--project-based-undergraduate-teaching-and-learning/10.1117/12.2523860.full?SSO=1> (12.05.2021).

FABIAN BERNSTEIN ist Physiklehrer und Physiker und war zuletzt an der Internatsschule Schloss Hansenberg, Hessen, tätig. Derzeit entwickelt er am CERN im Rahmen seiner Promotion 3D-gedruckte Experimente für den Unterrichtseinsatz.

OLIVER KELLER war als Ingenieur in verschiedenen Entwicklungsabteilungen tätig. Derzeit promoviert er am CERN und der Universität Genf in Physik über neuartige Halbleiter-Detektoren und Experimente zu Radioaktivität im Kontext formaler Bildung und citizen science.

Dr. SASCHA SCHMELING ist studierter Physiklehrer und Hochenergiephysiker und leitet das Physics Education Team am CERN in Genf.

Prof. Dr. THOMAS WILHELM, wilhelm@physik.uni-frankfurt.de, war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik und ist Professor für Didaktik der Physik an der Goethe-Universität Frankfurt am Main