

## 3D-Druck und Mikrocontroller: Ein Dreamteam für Lowcost-Hightech-Experimente?

Fabian Bernstein<sup>\*,+</sup>, Oliver Keller<sup>\*</sup>, Sascha Schmeling<sup>\*</sup>, Thomas Wilhelm<sup>+</sup>

<sup>\*</sup>CERN, 1211 Genève 23, Schweiz

<sup>+</sup>Institut für Didaktik der Physik, Goethe-Universität Frankfurt, Max-von-Laue-Str.1, 60438 Frankfurt  
[fabian.bernstein@cern.ch](mailto:fabian.bernstein@cern.ch), [oliver.michael.keller@cern.ch](mailto:oliver.michael.keller@cern.ch), [sascha.schmeling@cern.ch](mailto:sascha.schmeling@cern.ch),  
[wilhelm@physik.uni-frankfurt.de](mailto:wilhelm@physik.uni-frankfurt.de)

### Kurzfassung

Die eingeschränkte Verfügbarkeit von kommerziellen Lehrmitteln zur modernen Physik an allgemeinbildenden Schulen führt im Ergebnis dazu, dass sich Schülerinnen und Schülern nur sehr begrenzte Erkundungsmöglichkeiten zur modernen Experimentalphysik im schulischen Rahmen bieten. Um diese Lücke zu verringern, können 3D-gedruckte Bauteile und Mikrocontroller zur Entwicklung und Reproduktion neuer, innovativer Lehrmittel zur modernen Physik eingesetzt werden. Gerade die Kombination von Mikrocontrollern und 3D-Druck scheint vielversprechend, da diese Technologien wesentliche Bestandteile moderner Experimente abdecken können. Mögliche Strategien zur Realisierung solcher Lehrmittel werden am Beispiel dreier Experimentiermaterialien, die am Schülerlabor S’Cool LAB des CERN entwickelt wurden, exemplarisch diskutiert: einem interferometrischen Analogieexperiment zur Gravitationswellendetektion, einem funktionalen Modell eines Wechselspannungs-Linearbeschleunigers sowie einem 3D-gedruckten Experiment zum äußeren Fotoeffekt.

### 1. Das Ressourcenproblem im Physikunterricht

#### 1.1. Problemstellung bei Experimenten zur modernen Physik

Die Beschäftigung mit Experimenten zur modernen Physik wird im schulischen Physikunterricht durch verschiedene Faktoren erschwert. So sind kommerzielle Lehrmittel zur modernen Physik aufgrund begrenzter finanzieller Ressourcen an Schulen oftmals nur eingeschränkt vorhanden. Darüber hinaus stehen in den Sammlungen regelmäßig nur veraltete oder nicht voll funktionstüchtige Lehrmittel zur Verfügung, die nur begrenzt Zugänge zur modernen Experimentalphysik vermitteln können. Schließlich tendieren moderne experimentalphysikalische Aufbauten, wie man sie bspw. an Forschungsinstituten oder Universitäten vorfindet, dazu, immer aufwendiger und komplexer zu werden – die experimentalphysikalischen Anlagen des CERN verdeutlichen dies exemplarisch –, was eine Aufbereitung für den schulischen Physikunterricht zusätzlich erschwert. Infolgedessen sind die Begegnungs- und Erkundungsmöglichkeiten für Schülerinnen und Schüler mit zeitgemäßen experimentellen Aufbauten und Fragestellungen im schulischen Rahmen häufig eng begrenzt.

#### 1.2. Empirische Indikatoren

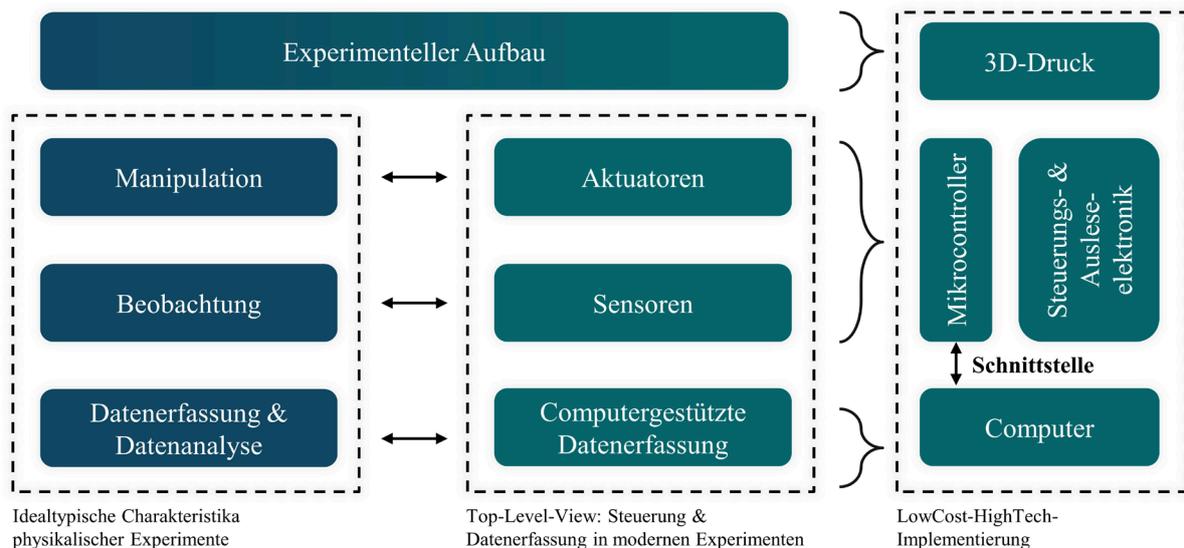
Dass ein Mangel an adäquatem Experimentiermaterial den schulischen Physikunterricht *de facto* ausbremst, lässt sich u.a. anhand der PISA-Studie 2015 [1] nachvollziehen, für die die Verfügbarkeit von Experimentiermaterial an Schulen und der Ein-

fluss auf den Lernerfolg der Schülerinnen und Schüler explizit untersucht wurde. Methodisch wurde aus Auskünften von Schulleitern ein „Index of science-specific resources“ gebildet. Dabei zeigte sich einerseits, dass deutsche Schulen bei diesem Index im Mittel unter dem OECD-Schnitt liegen, und andererseits, dass ein positiver Zusammenhang zwischen den verfügbaren Ressourcen und der Leistung der Schülerinnen und Schüler in den naturwissenschaftlichen Fächern besteht (siehe [1], S. 53-56).

Eine kritische Einschätzung von Lehrkräften hinsichtlich der verfügbaren Ressourcen wurde auch im Rahmen einer 2018 am CERN durchgeführten Studie deutlich, bei der 130 Lehrkräften aus Deutschland, Italien und dem Vereinigten Königreich befragt wurden [2]. Mangel an Experimentiermaterial und mangelnde Eignung des vorhandenen Experimentiermaterials waren neben einem Mangel an Vorbereitungs- und Unterrichtszeit die am häufigsten von den Lehrkräften genannten erschwerenden Faktoren für den Einsatz von Experimenten im Physikunterricht.

#### 2. 3D-Druck und Mikrocontroller to the rescue?

Da eine grundsätzliche Verbesserung der finanziellen Ausstattung von Schulen mittelbar nicht zu erwarten steht, scheint es naheliegend, über Alternativen nachzudenken, wie innerhalb der gegebenen Spielräume innovative Lösungen der Problemstellung gefunden werden können. Ein möglicher Ansatz besteht darin, das Potential neuer Technologien wie bspw. additiver Fertigung oder programmierbarer Mikrocontroller für



**Abb. 1:** Charakteristika physikalischer Experimente und Chancen zu ihrer technischen Implementierung

die Gestaltung neuartiger Lehrmittel zu evaluieren und gegebenenfalls neue Konzepte zu deren Einsatz zu entwickeln.

Dabei zeigt eine genauere Analyse, dass zwar Einsatzmöglichkeiten von 3D-Druck und Mikrocontrollern im Physikunterricht *je für sich* verschiedentlich erörtert und teils auch Unterrichtsvorschläge ausgearbeitet wurden (siehe z. B. [3-5]), dass aber das Potenzial der *Verbindung* dieser beiden Technologien für den Physikunterricht noch weitgehend ungenutzt zu sein scheint. Gerade die Kombination eröffnet aber, wie im Folgenden gezeigt werden soll, Möglichkeiten zur Gestaltung ganz neuer Lehrmittel und wurde am Schülerlabor des CERN eingesetzt, um attraktive und kostengünstige Experimentiermaterialien zur modernen Physik zu gestalten.

### 2.1. Charakteristische Elemente moderner Experimente

Um das grundsätzliche Potential solcher Lösungen abzuschätzen, ist es hilfreich, sich die Bestandteile eines idealtypischen Experimentes zu vergegenwärtigen: Als konstitutiv für physikalische Experimente kann dabei gelten, dass die Auswirkungen von Manipulationen an experimentellen Aufbauten beobachtet, diese Beobachtungen systematisiert und aus ihnen Schlussfolgerungen über zugrundeliegende Wirkzusammenhänge abgeleitet werden (siehe z. B. [6]). Während in „klassischen“ Experimenten die Manipulation oftmals händisch und die Beobachtung mit den menschlichen Sinnen erfolgt, ist dies bei modernen Experimenten nur in Ausnahmefällen möglich. Im Regelfall kommen Aktuatoren und Sensoren zum Einsatz, die elektronisch gesteuert werden; Datenaufzeichnung und -analyse erfolgen ganz überwiegend computergestützt.

Betrachtet man die typischen Einsatzgebiete von 3D-Druck und Mikrocontrollern und gleicht sie mit den angeführten Charakteristika moderner Experimente

ab, so zeigt sich, dass die erforderlichen Funktionalitäten häufig durch diese beiden Technologien abgebildet werden können. So können Mikrocontroller-Boards, wie bspw. der Arduino Uno, sowohl dafür genutzt werden, Aktuatoren zu steuern und Sensoren auszulesen, als auch dafür, Daten an einen Computer zu übertragen und Steuerungsbefehle für die Aktuatoren zu empfangen.

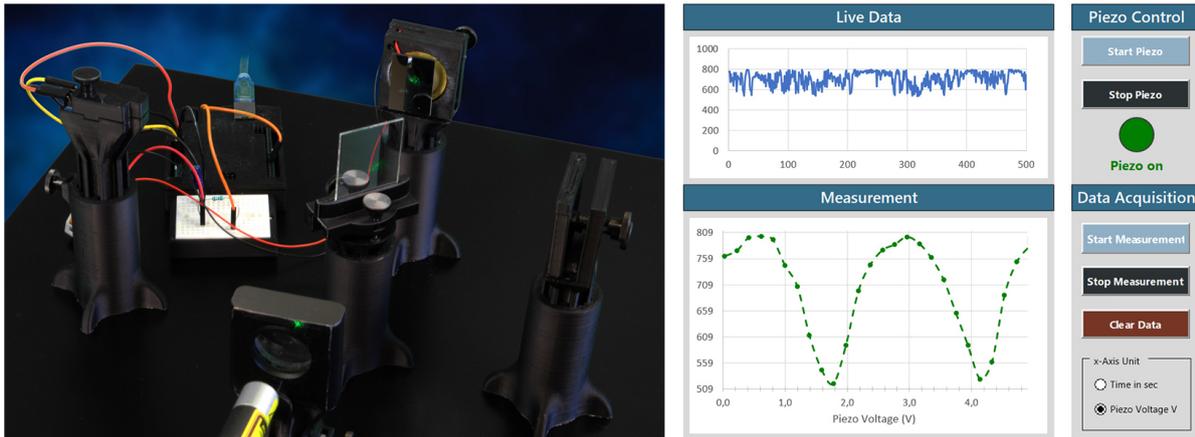
3D-Druck (in der Form von Consumer-FDM-Druck) ist aufgrund von Designfreiheit, Reproduzierbarkeit und niedrigen Kosten prädestiniert, um spezifische experimentelle Aufbauten zu entwickeln und am Einsatzort zu replizieren. Dies wurde für den Bereich der wissenschaftlichen Instrumentierung bereits erkannt und hat zu einer Vielfalt an anspruchsvollen Projekten im Umfeld von „Open Source“ und „Open Labware“-Bewegungen geführt (siehe z. B. [7-8]).

Wenngleich es zutrifft, dass in der Regel weitere Bauteile erforderlich sind, um ansprechende und funktionale Lowcost-Hightech-Experimente zu realisieren, kann dieser Prozess jedoch mithilfe von 3D-Druck und Mikrocontrollern wesentlich vereinfacht und der Nachvollzug erleichtert werden.

## 3. Lowcost-Hightech-Lehrmittel: Beispiele

### 3.1. Analogieexperiment zur Gravitationswellendetektion

Ein Beispiel für ein solches mikrocontroller-gestütztes und 3D-gedrucktes Experiment, das am S’Cool LAB – dem Schülerlabor des CERN – entwickelt wurde, ist ein funktional angereichertes Michelson-Interferometer, das als Analogieexperiment zur Gravitationswellendetektion fungiert. Es dient dazu, die physikalischen Grundprinzipien der interferometrischen Gravitationswellendetektion für Schülerinnen und Schüler nachvollziehbar zu machen und ist einem Exponat, das ursprünglich für Museen und Ausstellungen entwickelt wurde, nachempfunden [9]. Der



**Abb. 2:** 3D-gedrucktes Michelson-Interferometer als Analogieexperiment zur Gravitationswellendetektion (links)  
Interaktives Excel-Worksheet zum Interferometer, implementiert mittels „Microsoft Datastreamer“ (rechts)

grundsätzliche Aufbau ist Abbildung 2 (links) zu entnehmen. Alle optischen Halter sind 3D-gedruckt, die verwendeten optischen Elemente kostengünstige Bastlermaterialien. Technische Details können [10] und [11] entnommen werden.

Als Lichtquelle des Interferometers dient ein handelsüblicher Laserpointer. Die Besonderheit des Aufbaus besteht darin, dass a) anstelle eines optischen Schirms ein Fotodioden-Modul eingesetzt wird – was eine quantitative Auswertung des Experiments erlaubt – und dass b) einer der Spiegel auf einem Piezolautsprecher montiert wurde. Dies ermöglicht, diesen Spiegel durch Anlegen einer geringen Spannung (0-5 V), die vom Mikrocontroller bereitgestellt wird, in der Größenordnung von einigen hundert Nanometern zu verfahren, was zu einer Änderung der optischen Weglängendifferenz führt und sich in der Folge als Modulation des Interferenzmusters bzw. des an der Fotodiode ausgelesenen Intensitätswertes bemerkbar macht. Die Steuerung des Piezoelements und das Auslesen der Fotodiode erfolgt mithilfe des Arduino Uno Mikrocontrollers.

Der Datenaustausch mit dem Computer wurde mithilfe von „Microsoft Datastreamer“ – einer nativen Excel-Schnittstelle – realisiert [12]. Diese Schnittstelle wurde von Microsoft im Rahmen des Projektes „Hacking STEM“ [13] in Excel implementiert und erlaubt eine unkomplizierte Kommunikation zwischen Arduino und Microsoft Excel. Sie ist in Excel ab Installation vorhanden und wird im Menüband sichtbar, sobald sie als Add-In aktiviert wird.

Einer der Vorteile von Microsoft Datastreamer besteht darin, dass sich die Steuerung und der Datenaustausch mit dem Arduino in ein interaktives Excel-Tabellenblatt einbetten lassen, das grafisch ansprechend gestaltet und mittels VBA (Visual Basic for Applications) mit komplexen Interaktionen versehen werden kann. Im Beispiel des Gravitationswellen-Analogie-experiments ist die technische Implementierung der Funktionalitäten als VBA-Skript im Hintergrund umgesetzt, das der Nutzer, der nur mit einer grafischen Nutzeroberfläche interagiert, nicht zu Gesicht bekommt.

### 3.2. Modell-LINAC

Ein anderes Beispiel, das die Möglichkeiten der Kombination von 3D-Druck und Mikrocontroller in anderer Richtung auslotet, ist das funktionale Modell eines Wechselspannungs-Linearbeschleunigers (Details siehe [14] und [15]), das ebenfalls am S’Cool LAB entwickelt wurde. Dieses Modell dient ebenfalls dem Zweck, grundlegende physikalische Prinzipien und deren technische Nutzbarmachung für Schülerinnen und Schüler erfahrbar machen.

Das Funktionsprinzip besteht darin, einen graphitebeschichteten Tischtennisball mithilfe elektrostatischer Felder in einer Plexiglasröhre zu beschleunigen, um hierdurch die Funktionsweise der ersten Wechselspannungs-Linearbeschleuniger anschaulich zu demonstrieren. Die experimentellen Herausforderungen bestehen einerseits darin, die durch eine Influenzmaschine erzeugte Hochspannung von einigen 10 kV zu schalten, andererseits darin, dass sich Hochspan-



**Abb. 3:** 3D-gedrucktes, mikrocontroller-gesteuertes Modell eines Wechselspannungs-Linearbeschleunigers

nungskabel und Steuerungsleitungen des Mikrocontrollers in räumlicher Nähe zueinander befinden, was eine elektromagnetische Entstörung erforderlich macht. Die Notwendigkeit der elektrischen Entstörung zieht ihrerseits einen recht aufwendigen Breadboard-Aufbau nach sich, um die Eingänge und Ausgänge des Arduino durch Schutzdioden von der Hochspannung abzuschirmen. Dies erhöht die Störanfälligkeit des Experiments sowie die zu seinem Aufbau erforderliche Zeit.



**Abb. 4:** LINAC-Shield zum Aufstecken auf einen Arduino Uno

Um den Nachvollzug des Experiments zu erleichtern und die Fehleranfälligkeit zu reduzieren, wurde daher zusätzlich ein Shield – ein Steckaufsatz für den Arduino Uno – entworfen, das alle erforderliche elektronischen Komponenten enthält und das für wenige Euro vollständig bestellt werden kann (siehe Abbildung 4). Das Shield enthält ebenfalls die Bedienelemente des User-Interfaces in Form von Druckknöpfen und Drehpotentiometern. Um den experimentellen Aufbau in Betrieb zu nehmen, genügt es dann, das Shield auf den Arduino Uno aufzustecken und die Sensoren und Aktuatoren des Linearbeschleuniger-Modells anzuschließen. Ein 3D-gedrucktes Gehäuse nimmt diese aus Mikrocontroller und Shield bestehende Steuereinheit für den LINAC auf.

### 3.3. Experiment zum äußeren Fotoeffekt

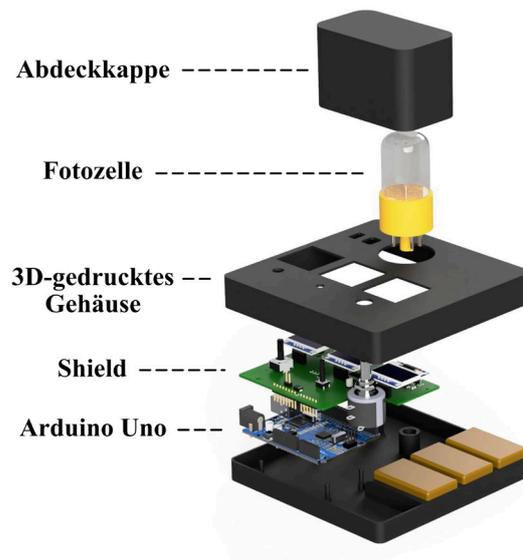
Dass auch solche Experimente, die zum klassischen Bestand des Physikunterrichts der Sekundarstufe II zählen, sich auf diese Weise aufbereiten lassen, zeigt ein 3D-gedrucktes Experiment zur Untersuchung des äußeren Fotoeffektes (siehe Abbildung 5). Es besteht neben einem Arduino Uno und dem 3D-gedruckten Gehäuse ebenfalls aus einem speziell entwickelten Shield, das in diesem Fall eine recht ausgefeilte Ausleseelektronik – u. a. ein Nanoamperemeter auf Basis eines ADS1115-Analog-Digitalwandlers – beherbergt.

Mit diesem Aufbau können jene Messungen zur Intensitätsunabhängigkeit und Frequenzabhängigkeit der Stoppspannung (der Gegenspannung, bei der der Fotostrom null wird) durchgeführt werden, die zentral für die typische Argumentation bei der Einführung der Lichtquantenhypothese im Physikunterricht sind.

Ferner lässt sich aus diesen Messungen das Plancksche Wirkungsquantum bestimmen, indem man die maximale Energie der Elektronen als Funktion der Frequenz des jeweils einfallenden Lichtes abträgt und die Steigung der Ausgleichsgeraden ermittelt.

Aufgrund einer Kostenreduktion um mehr als eine Größenordnung im Vergleich zu kommerziellen Lehrmitteln ist es möglich, das Experiment als Schülerexperiment durchzuführen. Auf diese Weise können Schülerinnen und Schüler selbst experimentieren und eigene Erfahrungen mit dem Experiment gewinnen, anstatt es nur im Rahmen einer (i. d. R. einmaligen) Demonstration während des Unterrichts kennenzulernen.

Darüber hinaus besteht hinsichtlich der Messwertaufnahme die Wahl zwischen einer manuellen Erfassung mithilfe von Displays oder einer computergestützten Datenerfassung, bei der die Messwerte über die USB-Schnittstelle an einen Computer übertragen werden. Details zum Aufbau und den durchführbaren Messungen können [16] entnommen werden.



**Abb. 5:** 3D-gedrucktes Experiment zum äußeren Fotoeffekt

## 4. Schlussbetrachtungen

Diese Beispiele zeigen, dass es gelingen kann, durch die Verbindung von 3D-Druck und Mikrocontrollern experimentelle Lehrmittel zur modernen Physik zu gestalten, die kostengünstig, aber gleichzeitig leistungsfähig, zuverlässig und attraktiv sind und somit den Bedingungen des schulischen Alltags gewachsen sind. Dabei ist sowohl möglich, gänzlich neue Lehrmittel zur modernen Physik zu entwerfen als auch klassische Lehrmittel nachzubilden und dadurch neue didaktische Einsatzmöglichkeiten zu erschließen.

Mittelbar scheint es darüber hinaus denkbar, die Beschäftigung mit Experimenten zur modernen Physik vom schulischen Kontext hin zu informellen Lernorten, wie z. B. Makerspaces, zu verlagern.

## 5. Literatur

- [1] OECD (2016): PISA 2015 Results (Volume II): Policies and Practices for Successful Schools, PISA, OECD Publishing, Paris.  
Url:  
<https://read.oecd.org/10.1787/9789264267510-en?format=pdf>  
(Stand: 5/2021)
- [2] Bernstein, F., Schmeling, S., Wilhelm, T., Woithe, J. (2020): Saliente Überzeugungen von Physiklehrkräften zum Experimentieren, GDPC Jahrestagung Wien 2019 (Bd. 40), S. 86-89,  
Url:  
[https://www.gdpc-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020\\_86\\_Bernstein.pdf](https://www.gdpc-ev.de/wp-content/tb2020/TB2020_86_Bernstein.pdf)  
(Stand: 5/2021)
- [3] Girwidz, R., Watzka, B. (Hrsg.) (2018): Arduino, Raspberry Pi & Co, Naturwissenschaften im Unterricht Physik, 11/2018, 29 (167)
- [4] Wiesner, H. (Hrsg.) (2018): Plus Lucis, Arduino, 1/2018
- [5] Hopf, M. (Hrsg.) (2020): Plus Lucis, 3D-Druck, 4/2020
- [6] Kircher, E., Girwidz, R., Häußler, P. (2007): Physikdidaktik. Theorie und Praxis, 1. Aufl., S. 230
- [7] Pearce, J. (2014): Open-source lab. How to build your own hardware and reduce research costs. Amsterdam: Elsevier.
- [8] Courtney, A., Alvey, L., Merces, G., Burke, N., Pickering, M. (2020): The Flexiscope: a low cost, flexible, convertible and modular microscope with automated scanning and micromanipulation. In: Royal Society Open Science 7 (3), S. 191949.
- [9] Cooper, S., Green, A., Middleton, H., Berry, C., Buscicchio, R., Butler, E. et al. (2020): An Interactive Gravitational-Wave Detector Model for Museums and Fairs. Url:  
<http://arxiv.org/pdf/2004.03052v1>  
(Stand 5/2021)
- [10] Bernstein, F., Schmeling, S., Wilhelm, T. (2020): 3D-gedruckte Experimente zur modernen Physik. Vom Michelson-Interferometer zum Quantenradierer. In: Plus Lucis, 3D-Druck, 4/2020, S. 33-39
- [11] Laserlab auf der Homepage des Schülerlabors S‘Cool LAB des CERN:  
<https://scoollab.web.cern.ch/laserlab3D>  
(Stand 5/2021)
- [12] Microsoft Datastreamer Support Page:  
<https://support.microsoft.com/de-de/office/was-ist-datenstreamer-1d52ffce-261c-4d7b-8017-89e8ce2b806f>  
(Stand 5/2021)
- [13] Microsoft Hacking STEM-Projekt: <https://education.microsoft.com/en-us/hackingStem>  
(Stand 5/2021)
- [14] Bernstein, F., Keller, O., Schmeling, S., Wilhelm, T., Woithe, J. (2020): Ein LINAC zum Selberbauen. Funktionales Modell eines elektrostatischen Linearbeschleunigers. In: Unterricht Physik (180) 2020, S. 33-35
- [15] Modell-LINAC auf der Homepage des Schülerlabors S‘Cool LAB des CERN:  
<https://scoollab.web.cern.ch/linac3D>  
(Stand 5/2021)
- [16] Bernstein, F., Keller, O., Schmeling, S., Wilhelm, T. (eingereicht): Der äußere Fotoeffekt in neuem Licht. Ein 3D-gedrucktes, Mikrocontroller-gestütztes Schülerexperiment neuer Art, MNU-Journal