

Von Schnee- und Elektronenlawinen: Entwicklung eines Erklärvideos zu Einzelphotonendetektoren

Anna Donhauser¹, Philipp Bitzenbauer² und Jan-Peter Meyn²

¹TU Kaiserslautern, Fachbereich Physik, ²FAU Erlangen-Nürnberg, Physikalisches Institut
donhauser@physik.uni-kl.de

Kurzfassung

Analogiebildung ist ein methodisches Werkzeug zur Förderung naturwissenschaftlicher Lernprozesse. Für das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik wurde zur Vermittlung des Lernbereichs *Einzelphotonendetektoren* eine Analogie erarbeitet. Die Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren wird dabei mit dem Entstehen und Abgehen von Schneelawinen verglichen. Mittels eines für die Vermittlung dieser Analogie konzipierten Erklärvideos werden die Schülerinnen und Schülern im Rahmen einer Unterrichtssequenz schrittweise durch die funktionalen Zusammenhänge und Entsprechungen geführt. Die Akzeptanz der Analogie als Lernhilfe wurde in Akzeptanzbefragungen mit Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe evaluiert.

1. Detektoren im Experiment

Begriffe der klassischen Physik behalten in der Quantenphysik nicht uneingeschränkte Gültigkeit. Ein prominentes Beispiel ist der Ort: die Dynamik ermöglicht in der klassischen Physik die Festlegung des exakten Ortes eines Körpers zu jedem Zeitpunkt. Quantenobjekte, wie Elektronen oder Photonen hingegen, besitzen die Eigenschaft Ort gar nicht permanent. Vom Ort eines Quantenobjekts kann nur im Kontext einer Messung gesprochen werden. Der Begriff des Messens nimmt eine zentrale Stellung in der Quantenphysik ein.

Um den quantenphysikalischen Messprozess in einem adäquaten Kontext zu lehren, ist der Bezug zu technischen Aspekten entsprechender Experimente notwendig. Das Erlanger Unterrichtskonzept zur Quantenoptik für die gymnasiale Oberstufe führt die Lernenden von technischen Aspekten moderner Experimente der Quantenoptik zu den Wesenszügen der Quantenphysik, wie sie Küblbeck und Müller formulierten [1].

Zentrales Element des Konzepts ist das Experiment von Grangier, Roger und Aspect von 1986 mit dem gleichzeitig die Unteilbarkeit des Photons am halbdurchlässigen Spiegel und die Einzelphotoneninterferenz gezeigt werden kann [2]. Mittels interaktiver Bildschirmexperimente werden die Lernenden in die experimentellen Grundlagen der Quantenphysik eingeführt [3]. Um die Bedeutung der Art der experimentellen Beobachtung zu hinterlegen, wird die Funktionsweise von Detektoren direkt zu Beginn des Konzepts behandelt. Ziel ist die Sensibilisierung der Lernenden für den experimentellen Aufbau zu Beginn des Versuchs, den Umgang mit Variablen und eine Identifikation und Interpretation der Ergebnisse. Dafür ist ein Verständnis der funktionalen Komponenten bedeutend. In diesem Artikel soll aufgezeigt

werden, wie die Funktionsweise der Detektoren adressatengerecht mit Hilfe einer verfilmten Analogie vermittelt und veranschaulicht werden kann.

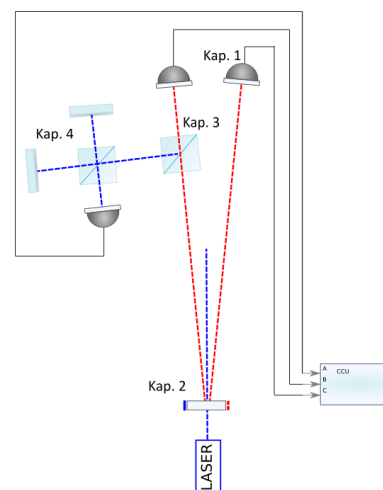


Abb. 1: Schematische Darstellung des dem Konzept zugrunde liegenden Experiments.

2. Detektoren in Physikunterricht und Lehre

Wenn in Schulbüchern oder Lernhilfen Experimente zur Quantenphysik vorgestellt werden, dann erscheinen Detektoren zumeist in idealisierter bzw. schematischer Form (vgl. Abb. 2).

In derartigen Darstellungen werden weder die Detektionseffizienz η , noch das Dunkelrauschen oder die Totzeit τ der Detektoren thematisiert. Die Idealisierung von Messgeräten kann je nach Kontext selbstverständlich didaktisch begründet sein und soll hier nicht grundsätzlich in Abrede gestellt werden. Wir werden jedoch im Folgenden aus fachlicher und didaktischer Perspektive darstellen, wie für die Lehre der Quantenphysik eine tiefergehende Behandlung

der Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren gewinnbringend sein kann. Anschließend beschreiben wir einen Weg, zentrale Aspekte der Detektoren schülergerecht zu elementarisieren.

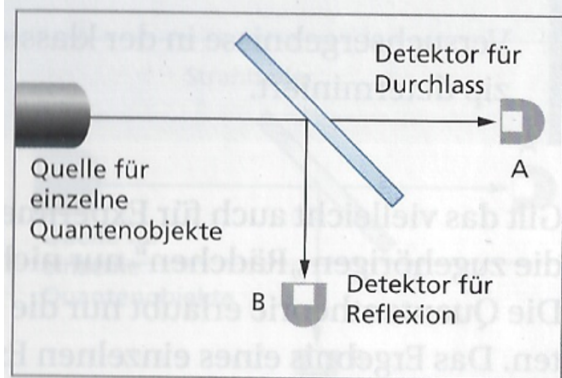


Abb. 2: Schematische Darstellung von Detektoren in Experimenten mit einzelnen Quantenobjekten aus [17].

2.1 Fachliche Perspektive

Gegen eine stark vereinfachte Darstellung von Detektoren spricht beispielsweise eine mechanistisch geprägte Sprache, die es in der Quantenphysik zu vermeiden gilt. Nimmt man einen Detektor an, der jedes einfallende Photon – ausgehend von einer Quelle¹ – mit Wahrscheinlichkeit $\eta = 1$ detektieren, so befindet man sich schnell in einem Sender-Empfänger-Regime. Der Weg hin zur Diskussion über Trajektorien von Quantenobjekten ist hier nicht mehr weit.

Betont man stattdessen den technischen In- und Output an Binärdetektoren, so umgeht man mechanistische Sprech- und Denkweisen und legt die Grundlage für die Vermittlung des Präparationsgedankens. Dies erscheint als notwendige Voraussetzung für das Ablegen einer naiven Teilchenvorstellung von Quantenobjekten.

Analog zu modernen Forschungseinrichtungen kommen in den Experimenten des Erlanger Unterrichtskonzepts Avalanche Photo Dioden – kurz APDs – zum Einsatz (vgl. Abb. 3). Avalanche bedeutet übersetzt Lawine, weshalb bereits der Begriff APD einen Vergleich zu Schneelawinen nahelegt. Im *Geiger-Modus* werden APDs oberhalb der Durchbruchspannung betrieben, sodass Verstärkungen von $10^6 - 10^8$ möglich sind [6]. Für Details zur Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren sei auf die einschlägige Fachliteratur zum Thema verwiesen, z.B. [7, 8].

¹ Darüber, wie „Einzelphotonenquellen“ realisiert werden, haben wir an der Stelle noch kein Wort verloren. Dazu

Infobox APD

APDs sind Lawinenphotodioden. Eine typische Silizium-APD hat ein p^+ipn^+ -Dotierprofil. Wie bei einer *pin*-Diode dient die schwach *p*-dotierte intrinsische *i*-Schicht als Absorptionsbereich. Einfallendes Licht erzeugt Elektron-Loch-Paare und Elektronen werden aus dem Absorptionsgebiet in Richtung der *p*-Schicht beschleunigt. Hohe elektrische Feldstärken im pn^+ -Übergang sorgen für eine starke Beschleunigung der Elektronen. Durch Stoßionisation können so weitere Elektron-Loch-Paare erzeugt werden und die Sekundärladungsträger werden ebenfalls beschleunigt. Dies führt auf eine Elektronenlawine und damit auf ein messbares elektrisches Signal.

Abb. 3: Informationen zur Avalanche Photo Diode.

2.2 Didaktische Perspektive

Die Vermittlung von Aspekten der Nature of Science (NoS) im Physikunterricht und darüber hinaus ist ein anerkanntes Ziel der Physikdidaktik. Dabei bleibt die Thematisierung von Nature of Science im Physikunterricht oftmals implizit [5]. Anhand der Diskussion über Einzelphotonendetektoren im Kontext des Quantenphysikunterrichts, können wesentliche NoS-Aspekte vermittelt werden, die folgende Tabelle gibt einen Einblick:

NoS-Aspekt	Behandlung Einzelphotonendetektor
Beobachtungen sind Theorie-geleitet	Was ist der In- was der Output der Experimente? Was ist technisch bedingt, was ist Ergebnis?
Wissen in den Naturwissenschaften beruht stark [...] auf Beobachtungen, experimentellen Resultaten, rationalen Begründungen und einer gewissen Skepsis	Empirischer Charakter von Naturwissenschaft: statistisches Rauschen, ...
Naturwissenschaftler sind kreativ	Technisch nicht-perfektes Gerät wird durch Messmethodik (Koinzidenzmessung) nutzbar gemacht

Tab. 1: Ausgewählte NoS-Aspekte nach [16], die anhand der Vermittlung der Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren im Physikunterricht expliziert werden können.

3. Detektoren und die Schneelawinenanalogie

Schneelawinen sind zur Vermittlung der Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren geeignet, weil eine „Oberflächenähnlichkeit zwischen primärem und analogen Lernbereich“ existiert [9].

könnte man im Kontext der Lehre eine ähnliche Diskussion führen, wie zur Behandlung der Detektoren.

Wir wollen kurz auf die einzelnen Entsprechungen (Abb.4) der Analogie eingehen:

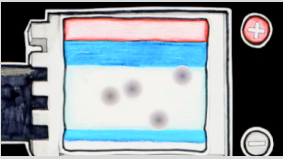
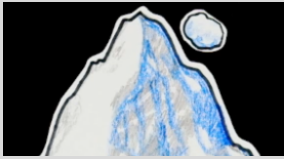
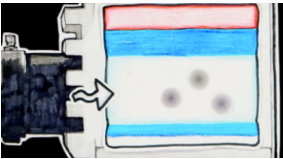

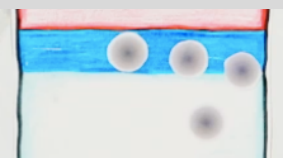
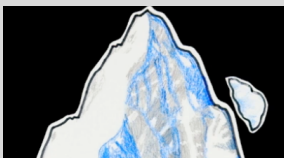
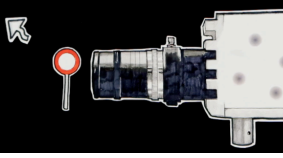

AVALANCHE PHOTO DIODE	SCHNEELAWINE
	
In den Detektoren wird intern eine Hochspannung erzeugt. Die Elektronen im Silizium-Kristall befinden sich auf hohem elektrischem Potential .	Schnee, der sich auf einem Berg ansammelt befindet sich analog auf hohem Gravitationspotential .
	
Eine kleine in den Detektor einfallende Energiemenge reicht aus, um Elektronen freizusetzen.	Eine kleine mechanische Störung genügt, um große Schneemassen freizusetzen, z.B. verursacht durch Wind.
	
Freigesetzte Ladungsträger setzen durch Stoßionisation weitere Ladungsträger frei. Hier wird der Verstärkungsprozess deutlich.	Beim Abgang von Schnee wird immer mehr Schnee Teil der Lawine .
	
Die Detektoren besitzen auch ohne Beleuchtung eine Zählrate , die von Null verschieden ist. Für die Ursache der Dunkelzählereignisse sei auf die Fachliteratur verwiesen. Das Auftreten solcher Dunkelzählereignisse ist zufällig, weil die Detektoren selbst einer Poisson-Statistik unterliegen [10].	Zufällige kleine Lawinen wie Dachlawinen entstehen durch spontane Schneeeabgänge .

Abb. 4: Übersicht der Entsprechungen zwischen Aspekten der Diodenfunktion und der Schneelawinenanalogie mit Filmausschnitten.

² Die Akzeptanzbefragungen wurden im Rahmen einer formativen Evaluation für sieben Key-Ideas des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik genutzt. Eine Key-

Notwendige Voraussetzung für die Annahme einer solchen Analogie durch die Schülerinnen und Schüler ist nach [12] unter anderem, dass dieses neue wissenschaftliche Konzept einleuchtend und auf Anhieb plausibel ist.

Inwiefern diese Voraussetzungen für die Erläuterung der Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren erfüllt sein können, wurde daher mittels Akzeptanzbefragungen geklärt². Dazu wurde $N = 13$ Schülerinnen und Schüler der gymnasialen Oberstufe in Einzelsitzungen das Konzept vermittelt. Die Akzeptanzbefragung fand in den Schritten nach Blumör statt [13]:

1. Informationsvermittlung, wie im Unterricht
2. Befragung nach Akzeptanz
3. Paraphrasierung der Lernenden
4. Anwendungsaufgabe

Auf die Anwendungsaufgabe wurde verzichtet. Die Ergebnisse wurden mittels skalierender Inhaltsanalyse ausgewertet und zwar von zwei unabhängigen Ratern ($\kappa = .87$).

Akzeptanz		Qualität d. Paraphrasierung
hoch	0,0	hoch
mittel	0,5	mittel
niedrig	1,0	niedrig

Tab. 2: Auswertung der Schülerinterviews mittels skalierender Inhaltsanalyse auf dreisstufiger Ordinalskala.

Das Ergebnis: Die Erklärung der Einzelphotonendetektoren in Analogie zur Lawine wurde sehr positiv bewertet (Mittelwert: 0,00). Der Aspekt der Dunkelzählereignisse wurde von allen Befragten verstanden und akzeptiert. Die gut aufgenommenen Erklärungen zeigen sich nicht nur in den niedrigen Akzeptanzwerten, sondern auch in der hohen Qualität der wiedergegebenen Paraphrasierungen (Mittelwert: 0,23).

4. Detektoren im Erklärvideo

Für die Vermittlung komplexer, funktionaler Zusammenhänge bieten Wissenschaftskommunikation und Didaktik eine Vielzahl methodischer Werkzeuge. Die Nutzung von Videos zum Verstehen wissenschaftlicher Inhalte „on demand“ gewinnt fachbereichs- und zielgruppenübergreifend zunehmend an Bedeutung. Wissenschaftsinteressierte informieren sich über Videoplattformen oder Mediatheken. Wissenschaft Kommunizierende setzen eigens- oder fremdproduzierte Videos in der Lehre ein, deutsche Forschungseinrichtungen nutzen das Bewegtbild zur wissenschaftlichen Selbstvermarktung oder für den verfilmten Blick hinter die Labortüre. [18]

Idea war die Funktionsweise der Einzelphotonendetektoren und nur darauf wird hier Bezug genommen. Details werden berichtet bei [14].

Um den Ansprüchen eines didaktisch hochwertigen und nachhaltigen Lernvideos zu genügen, orientierte sich die Konzeption an evaluierten Richtlinien [20][24][25]. Die Umsetzung dieser Qualitätsmerkmale und die Verfilmung der Analogie werden nachfolgend lernpsychologisch und didaktisch begründet.

4.1 Lernpsychologische Aspekte

Ein Erklärvideo als Wahl der Vermittlungsform lässt sich aus verschiedenen Perspektiven begründen. Einige mediale Spezifika eines Videos erfüllen automatisch lernpsychologische Gestaltungskriterien für multimediale Lernformate. Nach dem *Modality Principle* [19] wird ein abstrakter Lerngegenstand leichter verstanden, wenn dessen Präsentation sowohl den visuellen, als auch den auditiven Sinneskanal anspricht. Komplexe Inhalte sind also genau dann zugänglicher, wenn sie wie im Videoformat audio-visuell aufbereitet ist. Begründet wird die Optimierung von Lernprozessen mit der Reduktion der kognitiven Belastung. Lernende sind gemäß der Cognitive-Load-Theory [20] mit drei Dimensionen der Limitation des Arbeitsgedächtnisses durch dargebotenes Informationsmaterial konfrontiert:

1. Der *intrinsic cognitive load* beschreibt die kognitive Belastung durch die Komplexität und den themenspezifischen Anspruch des Lerninhalts selbst.
2. Der *extraneous cognitive load* bezeichnet die den Lernprozess beeinflussende Gestaltung der Lernumgebung und des Lernmaterials.
3. Der *germane load* bezieht sich auf die kognitiven Aktivitäten des Lernenden zur Vernetzung des Erlernten.

Die gezielte Gestaltung von Lernvideos kann bei einer feststehenden, zu verfilmenden Thematik somit nur den *extraneous cognitive load* reduzieren. Auch dafür findet die Lernpsychologie Kriterien und Einflussfaktoren [21][22][23]:

Die kognitive Belastung lässt sich gemäß dem *Kontiguitätsprinzip* durch die räumlich und zeitlich nahe

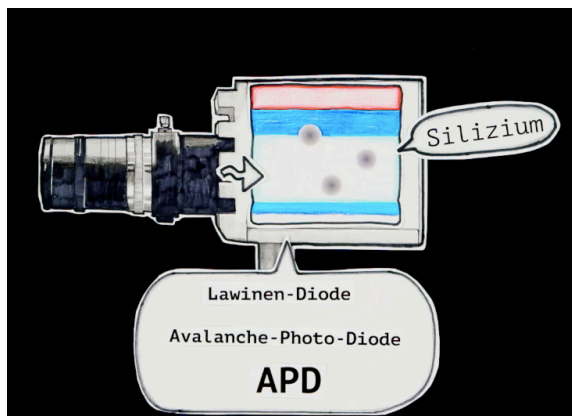


Abb. 5: Räumlich und zeitlich nahe Darstellung relevanter Informationen zur Vermeidung des *Split-attention Effekts*.

Darstellung zusammengehöriger Informationen (vgl. Abb. 5) reduzieren. Werden das Bildmaterial erklärende Begriffe und Texte willkürlich und ohne Zusammenhang im Sichtfeld eingeblendet, kommt es zum *Split-attention effect*: die Lernenden müssen sich die notwendigen Informationen suchen. Gleichzeitig gesprochener Text wird überhört, das Dargebotene kann nicht verarbeitet werden.

Der *Redundancy effect* beschreibt eine ähnlich interferierende und damit lernhinderliche Wirkung: die zeitgleiche visuelle und auditive Darbietung von Textpassagen verringern die Aufnahmefähigkeit. Lernende können nicht gleichzeitig Texte lesen, zuhören und Bildsequenzen folgen.

Die Reduktion der kognitiven Belastung durch das *Sequenzprinzip* [24] lässt sich im Videoformat leicht umsetzen. Komplexe Zusammenhänge und Inhalte in kleine Einheiten zu unterteilen und nacheinander in einzelnen Sequenzen zu präsentieren entspricht der Idee einer verfilmten Entwicklung wie sie in Abbildung 6 dargestellt ist.

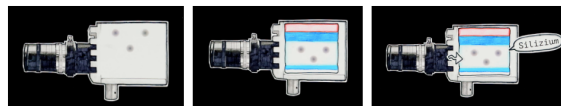


Abb. 6: Das Sequenzprinzip im Erklärvideo: Zusammenhänge werden in einzelne Sinneseinheiten zerlegt und nacheinander präsentiert.

Im Sinne des Sequenzprinzips gilt auch für den Sprechertext: kurze Sätze und nur eine Informationseinheit pro Satz und Bild. Um ein synchrones Verständnis von visueller und auditiver Ebene zu ermöglichen, wird mit jedem Einzelbild eine Informationseinheit gesprochen. Wie wichtig ein solch gleichmäßiger und synchroner Informationsfluss für die Aufnahmefähigkeit ist, wird meist erst beim Ansehen einer Produktion bewusst, die dieses Prinzip missachtet. Ändert sich beispielsweise über einige Sekunden das Bild nicht, während der Sprechertext mehrere Informationseinheiten vermittelt, kann der Zuschauer der Audiospur nicht folgen.

Ähnlich verwirrend wirken auch Bilder, in denen zentrale Informationen nicht entsprechend ersichtlich sind. Das Auge muss auf das Wesentliche gelenkt werden, indem der Fokus durch farbliche Codierung und Reduktion der dargestellten Elemente auf die wichtigsten Informationen gesetzt wird. Zu dieser Idee des *Kohärenzprinzips* zählt auch die Abstimmung der Lerninhalte auf die Lernvoraussetzungen der Zuschauer. Der *Imagination effect* beschreibt die Notwendigkeit der Passung zwischen Informationsangebot, Vorstellungsvermögen und Vorwissen der Lernenden.

4.2 Verfilmung der Analogie

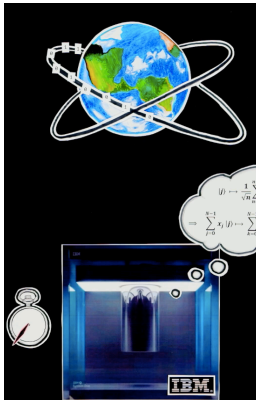
Neben den in der Produktion berücksichtigten, lernpsychologischen Richtlinien zur Reduktion der kognitiven Belastung finden sich Kriterien, die Kulgemeyer [25] speziell für Erklärvideos formuliert.

Nachfolgend wird eine Auswahl dieser Kriterien (Abb. 7) vorgestellt und deren Umsetzung im Detektorenvideo beschrieben.

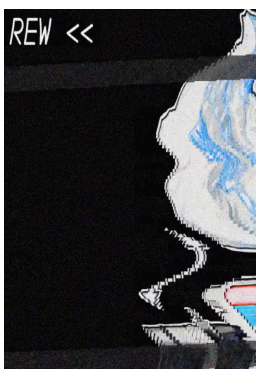


Eine *adressatengerechte Sprache* wirkt bewusst der Entstehung von Fehlvorstellungen entgegen.

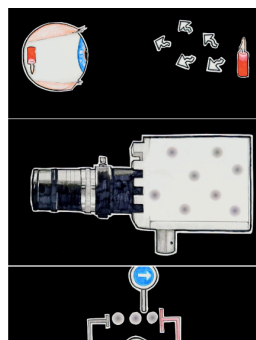
Der Sprechertext besteht aus kurzen Sätzen, einer Informationseinheit pro Satz und entwickelt sich synchron zur Bildebene.



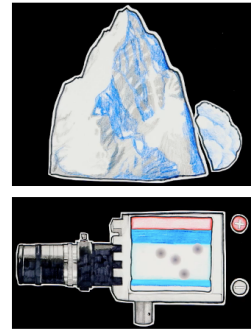
Um die Relevanz der verfilmten Thematik zu *verdeutlichen*, gilt es, *Bedeutbarkeit* und Mehrwert für die Lernenden zu vermitteln. Deshalb beginnt das Erklärvideo mit Anwendungsbezügen wie Datensicherheit und Quantencomputern, die eine Auseinandersetzung mit funktionalen Grundlagen rechtfertigen sollen.



Eine Möglichkeit zur *Strukturierung* der Inhalte ist eine *Zusammenfassung*. Die abschließende Gesamtdarstellung der Schneelawinen-Analogie vereint wiederholend die einzelnen Entsprechungen. Der Rewind-Effekt am Ende des Videos zeigt die Einzelbilder erneut im Schnelldurchlauf.



Das Kriterium der *Adaption* berücksichtigt das Vorwissen, Interesse und Präkonzepte der Zuschauer. Die Darstellungen im Detektoren-Video berücksichtigen bekannte Fehlvorstellungen zum Sehprozess, zu Teilchenvorstellungen und der Elektrizitätslehre.



Analogien und Modelle werden zur Veranschaulichung und Wissensvernetzung der dargebotenen Lerninhalte empfohlen. Die Schneelawinen-Analogie ist nicht nur Bestandteil, sondern Kernidee des Erklärvideos.

Abb. 7: Ausgewählte Produktionskriterien [25] für Erklärfilme mit entsprechenden Filmausschnitten.

4.3 Detektoren in der Elaboration

Im Kriteriensystem nach Kulgemeyer [25] findet sich auch der Hinweis, dass verfilmte Lerninhalte erst dann nachhaltig gelernt werden können, wenn sie vertiefend elaboriert werden. Durch das schriftliche Ergänzen einer Tabelle zu den Entsprechungen der Analogie sichern die Schülerinnen und Schüler bereits parallel zum Verlauf des Videos die einzelnen Lerneinheiten. Diese Tabelle wird im Anschluss an die experimentelle Lernphase im Physikunterricht besprochen.

5. Zusammenfassung

Die Vermittlung grundlegender Aspekte der Funktionsweise von Einzelphotonendetektoren wurde aus fachlicher und didaktischer Sicht begründet: gängige Visualisierungen von Detektoren in Simulationen oder Abbildungen werden stark vereinfacht und stellen idealisierte Detektoren dar. Dadurch können sich mechanistische Sprech- und Denkweisen entwickeln, die den Aufbau quantenphysikalisch adäquater Vorstellungen verhindern.

Die Schneelawinen-Analogie macht die Funktionsweise der Detektoren mit dem Vorwissen der gymnasialen Oberstufe zugänglich. Die Präsentation der Analogie im Rahmen eines Erklärvideos initiiert unter Berücksichtigung didaktischer und lernpsychologischer Aspekte Lernprozesse. Die Ergebnisse einer Akzeptanzbefragung liefern empirische Indizien dafür, dass dieser Zugang von Lernenden akzeptiert und verstanden wird.

Damit ist ein Einstieg in den Unterricht moderner Quantenphysik möglich, der auf direktem Weg zur Präparation von Quantenzuständen führt. Nämlich, wenn mit Schülerinnen und Schülern die Frage diskutiert wird, wie nun mit einem Gerät, das zufällig auch ohne Beleuchtung klickt, auf die Messung einzelner Photonen geschlossen werden kann.

6. Literatur

- [1] J. Küblbeck und R. Müller, *Die Wesenszüge der Quantenphysik: Modelle, Bilder, Experimente*, Aulis-Verlag Deubner, 2003.
- [2] P. Grangier, G. Roger und A. Aspect, „Experimental evidence for a photon anticorrelation effect on a beam splitter: A new light on single-photon interferences,“ *Europhys. Lett.*, Bd. 1, p. 173, 1986.
- [3] P. Bronner, A. Strunz, C. Silberhorn und J. Meyn, „Interactive screen experiments with single photons,“ *Eur. J. Phys. (30)*, pp. 345-353, 2009.
- [4] A. Kohnle, C. Bailly, C. Hooley und B. Torrance, „Optimization Of Simulations And Activities For A New Introductory Quantum Mechanics Curriculum,“ *Phys. Ed.*, 2013.
- [5] D. Ertl, „The Nature of Science,“ *Plus Lucis*, 1-2, pp. 5-7, 2010.
- [6] M. Stipcevic, H. Skenderovic und D. Gracin, „Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range,“ *Opt. Express*, Bd. 18, Nr. 16, pp. 17448-17459, 2010.
- [7] M. Itzler, X. Jiang, R. Ben-Michael, B. Nyman und K. Slomkowski, „Geiger-mode APD single photon detectors,“ *Optical Fiber Communication Conference*, 2008.
- [8] E. Hering, K. Bressler und J. Gutekunst, *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*, Heidelberg: Springer Verlag, 2014.
- [9] S. Weiß und S. Liebenwein, „Veranschaulichung,“ in *Unterricht sehen, analysieren, gestalten*, E. Kiel, Hrsg., Bad Heilbrunn, Klinkhardt, 2008, pp. 97-118.
- [10] S. Cova, M. Ghioni, A. Lacaita, C. Samori und F. Zappa, „Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection,“ *Appl. Opt.*, Bd. 12, pp. 1956-1976, 1996.
- [11] E. Kircher, R. Girwidz und P. Häußler, *Physikdidaktik*, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [12] G.-J. Posner, K.-A. Strike, P.-W. Hewson und W.-A. Gertzog, „Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change,“ *Science Education*, Bd. 66, pp. 211-227, 1982.
- [13] R. Blumör, *Schülerverständnisse und Lernprozesse in der elementaren Optik*, Essen: Westarp-Wissenschaften, 1993.
- [14] P. Bitzenbauer und J.-P. Meyn, „Quantenphysik g²reifbar machen,“ *Plus Lucis*, Bd. 3, pp. 17-21, 2019.
- [15] A. Kohnle, „QuVis - The Quantum Mechanics Visualisation Project,“ University of St. Andrews, North Haugh.
- [16] B. Priemer, „Deutschsprachige Verfahren der Erfassung von epistemologischen Überzeugungen,“ *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, Nr. 12, pp. 159-175, 2006.
- [17] D. Hoche, *Selbstverständlich Physik. Kursstufe Baden-Württemberg*, Mannheim: Duden Schulbuchverlag, 2010.
- [18] T. Körkel, K. Hoppenhaus, „Web Video Wissenschaft. Ohne Bewegtbild läuft nichts mehr im Netz: Wie Wissenschaftsvideos das Publikum erobern“, Heidelberg, 2016, Spektrum der Wissenschaft.
- [19] R. Low, J. Sweller, "The modality principle in multimedia learning", 2014 10.1017/CBO9781139547369.012.
- [20] P. Chandler, J. Sweller, "Cognitive load theory and the format of instruction", *Cognition and Instruction*, 8, 293-332.
- [21] J. Sweller, "Visualisation and Instructional Design", in: *Proceedings of the International Workshop on Dynamic Visualizations and Learning*, pp.1501-1510, 2002, Tübingen, Knowledge Media Research Center.
- [22] R. E. Mayer, "Multimedia Learning", 2009, New York, NY: Cambridge University Press
- [23] P. Ayres, J. Sweller, "The split attention principle in multimedia learning", 2014, *The Cambridge handbook of multimedia learning*. 206-226.
- [24] G. Maresch, "Die Cognitive Load Theory - Kriterien für multimediale Lernmaterialien.", 2006, *eLearning-Didaktik an Österreichs Schulen*. 1.
- [25] C. Kulgemeyer, "Qualitätskriterien zur Gestaltung naturwissenschaftlicher Erklärvideos." In: C. Maurer (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe*, 2019, *Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018*, S. 285-288.