

Interaktive Augmentierung eines Lehrfilms – Historische Quellen für den Unterricht digital erschließen

Jürgen Kirstein und Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik
juergen.kirstein@physik.fu-berlin.de

Kurzfassung

Lehrfilme sind im Physikunterricht ein Mittel der Anschauung. Sie dokumentieren Experimente und Prozesse der Erkenntnisgewinnung, nutzen aber auch multiple fachsprachliche Ebenen zur Erklärung physikalischer Konzepte. Studien zur Erklärqualität haben gezeigt, dass die passive Rezeption eines Lehrfilms zum Verstehen nicht ausreicht. Verstehen erfordert vielmehr Lernaktivitäten, mit denen Lernende das im Film erklärte Wissen selbstständig verarbeiten können. Unser Ansatz der „Interaktiven Rekonstruktion“ basiert auf der Idee, für die Konstruktion derartiger Aktivitäten Bildmaterial aus dem Film selbst einzusetzen und so zu bearbeiten, dass Lernende die im Film dargestellten (experimentellen) Handlungen oder auch die Auswertung von Messergebnissen interaktiv nachvollziehen können. Eingebettet in eine an die Dramaturgie des Films angelehnte digitale Lernumgebung, bietet diese Verknüpfung aus erklärenden und aktiven Elementen neue didaktische Gestaltungsmöglichkeiten. Wir erproben dieses Konzept derzeit anhand des Lehrfilms „Time dilation, an experiment with mu-mesons“, der 1963 im Rahmen des US-Bildungsprogramms des Physical Science Study Committee (PSSC) entstand und ein klassisches Experiment zum Nachweis des Phänomens der Zeitdilatation in der speziellen Relativitätstheorie detailliert dokumentiert.

1. Einleitung und Zielsetzung

Das Internet ermöglicht heute den Zugang zu vielfältigen Erklärfilmen, die für den Unterricht aber nur bedingt einsetzbar sind. Ein Beispiel: Zur Erklärung des relativistischen Phänomens der Zeitdilatation wird in einem Video [1] (eines der größten deutschsprachigen Kanäle für Erklärvideos) die folgende Formel gezeigt:

$$t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ein Sprecher erklärt dazu: „Damit kann man berechnen, wie lange eine bei dir echte Sekunde auf einem Objekt dauert, an dem man mit der relativen Geschwindigkeit v vorbeifliegt. Und das ganze Ding wird dann Zeitdilatation genannt.“ Einer der 396.239 (!) Nutzer kommentiert das so: „Und woher habt ihr dann die Einheit Sekunde, wenn ich c^2 gegeneinander gekürzt habe? Dann kommt für t ein dimensionsloser Wert heraus. Wie macht ihr daraus dann mathematisch wieder eine Sekunde? Oder überseh ich hier was? v^2 in m^2/s^2 geteilt durch $c^2 = m^2/s^2$ ergibt für mich am Ende: nichts an Einheiten, was übrig bliebe.“ [1]

Abgesehen von diesem etwas kuriosen Beispiel stößt die Erklärung von Phänomenen der Speziellen Relativitätstheorie wie dem der Zeitdilatation auf Schwierigkeiten. Im Gegensatz zu vielen Themen der Oberstufenphysik fehlt vor allem die Möglichkeit

eines experimentellen Zugangs zu deren Verifizierung. Das macht auch die Darstellung des Themas im Portal LEIFIphysik deutlich. Hier wird nach einer rein formalen Ableitung der Formel für die Zeitdilatation (über das bekannte Gedankenexperiment der Lichtuhr), der experimentelle Nachweis ausschließlich in einer (Rechen)Aufgabe zum Experiment von Rossi und Hall berücksichtigt [2]. Dabei bezieht sich die Darstellung auf Daten aus dem (modernerem) Experiment von Frisch und Smith [3], das allerdings fern jeder praktischen Realisierbarkeit im Unterricht ist.

Eine Forschergruppe der Universität Lyon hat dieses Experiment simuliert [4]. In der Simulation wird dargestellt, wie die Lebensdauer atmosphärischer Myonen von der Höhe des Ortes abhängt, an dem die Messung erfolgt. Die multimediale Lernumgebung dazu enthält Komponenten zur Detektion von Myonen, zur experimentellen Methode und zur Auswertung der Daten. Lernende greifen auf diese Komponenten per Menüauswahl zu und haben damit die Möglichkeit eines selbstgesteuerten und auch tieferen Zugangs zum Thema, als das beispielsweise durch Lehrbuchtexte möglich wäre. Diese Simulation veranschaulicht damit theoretische Konzepte und experimentelle Methoden, bietet aber – formatbedingt – keine Anschauung des realen Experiments und seiner Durchführung.

Diese Lücke der experimentellen Anschauung schließt der historische Lehrfilm „Time dilation, an experiment with mu-mesons“, der das Experiment von Frisch & Smith sehr detailliert und anschaulich darstellt ([5], Abb. 1). Dieser Film ist Teil einer Serie von Lehrfilmen und Begleitmaterialien des „Physical Science Study Committee“ (PSSC). Als Folge des sogenannten „Sputnik-Schocks“ beschloss das am Massachusetts Institute of Technology (MIT) gegründete PSSC ab 1957 eine grundlegende Reform zur Verbesserung der naturwissenschaftlichen Bildung im Sekundär- und Tertiärbereich. Die Filme zeigen Experimente zu grundlegenden Konzepten der Physik, die aus praktischen Gründen im Unterricht selbst kaum realisierbar sind, wie zum Beispiel den Millikan-Versuch mit Röntgenionisierung („The Millikan Experiment“, 1959) oder das Zählen von Elementarladungen in einem elektrischen Stromkreis („Counting Electrical Charges In Motion“, 1961).



Abb. 1: Der PSSC-Film [5] über das Experiment von Frisch & Smith (1963) zum Nachweis der Zeitdilatation durch den Zerfall von Myonen startet mit dem Transport des Experimentiermaterials für eine Messung in großer Höhe. Nicht nur hier wird durch den Realitätsbezug der Gegensatz zur Simulation deutlich, sondern besonders auch durch das narrative Konzept des Films. (Screenshot: From *Time Dilation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)

Alle (englischsprachigen) PSSC-Filme sind inzwischen in digitalisierter Form online verfügbar [6]. Diese klassischen Lehrfilme weisen einen hohen Grad an Didaktisierung auf, erheben einen Anspruch auf Vollständigkeit und Fehlerfreiheit und nutzen Experimente zur induktiven Gewinnung neuer Erkenntnisse. Die Dauer der Lehrfilme bewegt sich im Bereich von 30 Minuten. Erklärfilme sind dagegen in der Regel eher kurz und beziehen sich auf Ausschnitte von Themen, meist ohne konkrete Bezüge zu realen Experimenten. Allen zeitbasierten Formaten gemeinsam ist das Problem, dass Rezipierende Filminhalte aufgrund schneller Darstellungswechsel und hoher Informationsdichte ggf. nicht aufnehmen oder adäquat verarbeiten. Auch

unterschiedliche Voraussetzungen der Lernenden lassen sich nicht berücksichtigen, ebenso wenig wie die Möglichkeit der (inter)aktiven Verarbeitung der im Film dargebotenen Informationen, ein bedeutsamer Faktor für den Lernerfolg [7].

Das in diesem Beitrag vorgestellte Vorhaben will die monolithische Struktur des zeitbasierten Lehrfilms aufbrechen: durch die Zerlegung in kurze instruktionale Filmsequenzen und interaktive Lernelemente, die das Bildmaterial des Films aufgreifen. Zusätzlich wird dafür auch eine Publikation zum Experiment verwendet, die neben zusätzlichem Bildmaterial auch weitere Daten und Detailinformationen umfasst [3]. Das Ausgangsmaterial wird dabei soweit modularisiert, dass sich damit unterschiedliche Lehr-Lernumgebungen flexibel konstruieren lassen. Beispielsweise lässt sich so die narrative Struktur des Films rekonstruieren, jedoch nun angereichert durch filmbasierte Lernaktivitäten. Weiter besteht die Möglichkeit, mit den Modulen kurze Erklärfilme zu gestalten, die Einzelaspekte des Experiments, seiner Auswertung und Ergebnisse thematisieren.

Die aus dem Filmmaterial produzierten Medienelemente bilden die Grundlage für digitale Lernmaterialien, die in Kooperation mit dem QUALiS NRW ergänzend zum „Schlüsselexperiment“ V 23 „Myonenzerfall“ [8] entwickelt und online über die Plattform tet.folio [9] für den Einsatz im digital ergänzten Unterricht bereitgestellt werden.

2. Didaktische Analyse des Ausgangsmaterials

Während die Zeitdilatation für Uhren beispielsweise in schnell fliegenden Überschallflugzeugen zwar messbar, aber sehr klein ist, zeigen ‚Uhren‘, die mit fast Lichtgeschwindigkeit fliegen, einen deutlich größeren Effekt. Als eine solche Uhr wird bei dem im Film gezeigten Experiment die mittlere Lebensdauer von Myonen verwendet. Myonen sind instabile Elementarteilchen, die durch hochenergetische kosmische Strahlung in der oberen Atmosphäre entstehen. Sie besitzen fast Lichtgeschwindigkeit und zerfallen während ihres Fluges zur Erdoberfläche in ein Elektron (Positron) und zwei Neutrinos.

Die Kernidee des im Film „Time dilation, an experiment with mu-mesons“ dargestellten Experiments besteht nun darin, als Uhr die Zerfallsverteilung der Myonen zu verwenden. Für *ruhende* Myonen wird diese Verteilung durch ein Exponentialgesetz beschrieben, aus dem sich eine mittlere Lebensdauer von $\tau = 2,2 \mu\text{s}$ ergibt. Mit einer Messung der Zeit zwischen der Entstehung und dem Zerfall *bewegter* Myonen lässt sich eine um den Faktor $(1-[v/c]^2)^{1/2}$ längere Lebensdauer τ' nachweisen. Die erste Messung erfolgt dazu in großer Höhe auf dem Mt. Washington (1910 m). Danach wird die Messung der Myonenrate in einem Labor auf Meeresspiegelniveau wiederholt. Der Vergleich beider Messungen zeigt, dass die Zerfallsverteilung der von der Erde aus gesehen mit fast

Lichtgeschwindigkeit fliegenden Myonen der Vorhersage der Speziellen Relativitätstheorie entspricht.

Das im Film dargestellte Experiment wurde mit den damals (1963) verfügbaren rein analogen Geräten durchgeführt. Trotz seiner Komplexität wird das Experiment damit für Lernende leichter nachvollziehbar. Bei modernen Experimenten sind viele Schritte von der Datenerfassung bis zur Auswertung durch digitale Elektronik und Software automatisiert und so nicht mehr anschaulich erfahrbar.

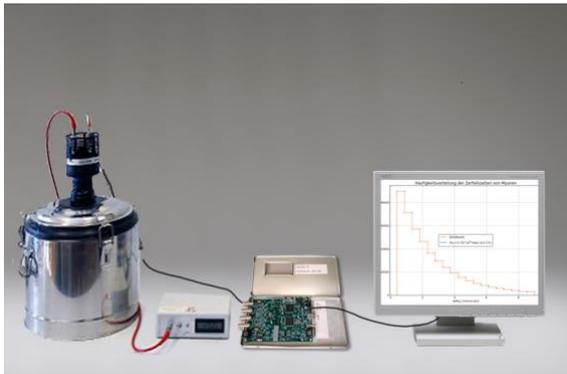


Abb. 2: Das LiDO-Experiment im Format eines IBE. Elektronik und Software automatisieren die Messung der Zerfallsstatistik ruhender Myonen. Am Bildschirm ist die mittlere Lebensdauer direkt ablesbar.

Ein Beispiel dafür sind die Experimente „Cosmic Muon Observer“ (CosMO) und „Liquid Scintillation Muon Decay Observer“ (LiDO) des Schülerlabors „PHYSIK.BEGREIFEN“ des DESY Zeuthen [10], die ergänzend als IBE-Bausteine zur Integration in Lernumgebungen entwickelt werden (Abb. 2). CosMO ermöglicht die Messung der Geschwindigkeit von Myonen aus der Höhenstrahlung, während mit dem Experiment LiDO die mittlere Lebensdauer ruhender Myonen bestimmt werden kann.

Im Film werden hingegen die zur Messung der Zerfallsstatistik notwendigen Schritte – didaktisch sorgfältig mit filmischen Mitteln aufbereitet – vorgeführt. Das Ziel unseres Vorhabens besteht nun darin, diese Schritte durch interaktive Elemente so zu ergänzen, dass ein an den individuellen Wissensstand adaptiertes, aktives Nachvollziehen von Aufbau und Durchführung des komplexen Experiments ermöglicht wird. Die als Ergebnis der Analyse identifizierten Schlüsselszenen des Films bieten dafür erste Anhaltspunkte:

- **Versuchsplan.** Nach einer kurzen Erläuterung des Begriffs der Zeitdilatation gibt der Film eine Übersicht zum weiteren Vorgehen.
- **Nachweis von Myonen.** Der dafür verwendete Detektor wird im Film aus Szintillator und Photomultiplier aufgebaut und erläutert.

- **Lebensdauer und Zerfallsrate.** Die Messung der Zerfallsereignisse erfordert ruhende Myonen im Szintillator. Dazu werden die Myonen über einen entsprechend dimensionierten Eisenblock abgebremst. Im Detail zeigt der Film die Methode der Messung von Zerfallsereignissen mit einem Oszilloskop durch fotografische Registrierung. Ein weiterer an den Bildschirm des Oszilloskops gekoppelter Multiplier wandelt die Zerfallspuls in zählbare Ereignisse um.
- **Messbeispiel und Auswertung.** Mit der fotografischen Registrierung von fünf Zerfallsereignissen wird modellhaft demonstriert, wie daraus die Zerfallsverteilung gewonnen wird.
- **Erste Messung der Zerfallsverteilung.** Diese einstündige Messung der Zerfallsrate im Observatorium auf dem Mt. Washington (1910 m) wird im Zeitraffer dargestellt.
- **Auswertung.** Wie im Beispiel dargestellt, werden hier die fotografisch registrierten 512 Zerfallsereignisse ausgewertet. Das Ergebnis ist eine grafische Darstellung der Verteilung der gemessenen Zerfallszeiten.
- **Nichtrelativistische Hypothese.** Auf Grundlage dieser Verteilung wird die Zerfallsrate bei einer Wiederholung der Messung auf Meeresspiegelniveau bestimmt. Die Berechnung folgt dabei klassischen Bewegungsgesetzen.
- **Zweite Messung auf Meeresspiegelniveau.** Der Film zeigt die vorbereitenden Arbeiten und erläutert Modifikationen der Versuchsanordnung. Die Durchführung der zweiten Messung wird ebenfalls im Zeitraffer dargestellt.
- **Bestimmen des Zeitdilatationsfaktors.** Aus dem Vergleich der Ergebnisse beider Messungen.

Die Anschlussfähigkeit und Vernetzbarkeit des durch interaktive Elemente erworbenen Wissens bezieht sich dabei nicht nur auf das Versuchsergebnis und den theoretischen Hintergrund, sondern auch auf die eingesetzten experimentellen Methoden. Beispiele dafür sind die Funktion des Photomultipliers als Weiterentwicklung der Vakuumphotozelle oder auch der Einsatz des Oszilloskops als Messgerät für sehr kleine Zeiten.

Als weiteres ergänzendes Element ist die interaktive Darstellung der im Film gemessenen Zerfallsverteilung für ein Verständnis des Mess- und Auswerteprozesses von entscheidender Bedeutung. Damit wird die Bestimmung der Lebensdauer von ruhenden Myonen über eine individuelle Auswertung der Filmdaten möglich und so ein Vergleich mit unabhängigen Messungen, etwa mit dem IBE zum LiDO-Experiment (s. Abb. 2).

3. Leitideen der interaktiven Augmentierung

Der hier vorliegende Lehrfilm weist einen hohen Grad an Didaktisierung auf und erhebt den Anspruch auf Vollständigkeit und Fehlerfreiheit. Andererseits ist die Länge eines Films ein bedeutsamer Indikator für das Engagement der Lernenden (Abbruch, Bearbeitung von Aufgaben; vgl. [7]). Die Leitidee der interaktiven Rekonstruktion des Films ist das Bereitstellen von Modulen für eine flexible Gestaltung von Lehr-Lernmaterialien.

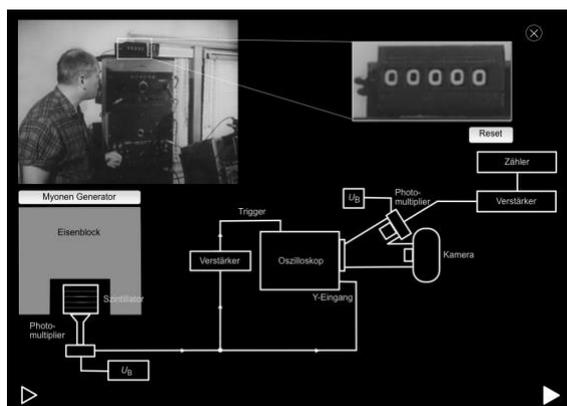


Abb. 3: Das grafische Schema des Versuchsaufbaus aus [3] wird schrittweise zum Ablauf des Films dargestellt. Dreiecke am unteren Bildrand oder das Anklicken von Symbolen in der Grafik steuern den Ablauf. In der dargestellten Szene lässt sich die Funktion der Messanordnung durch Klicken auf die Taste „Myonen-Generator“ individuell nachvollziehen: Das Zählwerk aus dem Film registriert nun den Lichtblitz eines selbst „erzeugten“ Myons. (Screenshot der tet.folio-Einbettung des Films: *From Time Dilatation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)

In diesen Modulen werden kurze Sequenzen des Films unterbrochen von interaktiven Lernelementen. In diesem Wechsel aus instruktionalen und konstruktiven Sequenzen können sich Lernende so mit den im Film dargestellten Sachverhalten und Handlungsmodellen eigenaktiv auseinandersetzen.

Die Verwendung von Filmbildern zur Gestaltung der interaktiven Lernelemente und die interaktive Verknüpfung verschiedener Codierungsebenen soll dabei die kognitive Belastung (Cognitive Load) verringern und das Bilden mentaler Modelle unterstützen. Beispielsweise zeigt das Anklicken der grafische Symbole im Schema des Versuchsaufbaus die dazu passenden erklärenden Filmausschnitte (s. Abb. 3).

Elemente zur Gestaltung der Module sind neben der Segmentierung und der Wiedergabekontrolle (eigenständige Auswahl relevanter Filmabschnitte, Start-Stopp-Funktion) vor allem auch die Manipulation von (Film-)Bildobjekten und die durch Zeitmarken im Film gesteuerten Hervorhebungen

zum Beispiel durch farbliche Markierungen als Hinweis auf relevante Aspekte.

Die spätere Einbettung der Module in die tet.folio-Umgebung ermöglicht dann eine Erweiterung der didaktischen Gestaltungsmöglichkeiten etwa durch eine Notizfunktion, das Stellen von Fragen an eine/n Expert*in oder den Austausch innerhalb einer Lerngruppe über die integrierte Chat-Funktion [9]. Ebenso sind verschiedene Formen der Selbstevaluation wie Quiz oder Zuordnungsaufgaben oder auch Verweise auf ergänzende Lernmaterialien möglich.

Damit lassen sich dann auch bekannte Kriterien für die Erklärqualität von Erklärvideos anwenden [11]. Unter anderem sind dies eine Anpassung an Vorwissen, Interesse und Alltagsvorstellungen, die Darstellung der Relevanz des Lerninhalts sowie Lernaufgaben, die eine Anschlussfähigkeit des Wissens unterstützen. Durch den Ansatz der Modularisierung und die damit mögliche flexible Gestaltung kognitiv anregender Lernumgebungen bietet die interaktive Rekonstruktion einen deutlichen Mehrwert gegenüber der (rein technischen) Digitalisierung des ursprünglichen Lehrfilms.

4. Realisierung und Ergebnisse

Die Autorenumgebung in tet.folio [9] zeichnet sich dadurch aus, dass auch Werkzeuge („tet.tools“) hochgradig modularisiert sind und damit kontinuierlich – an die Anforderungen der Nutzenden entsprechend – anpassbar sind.

So ermöglicht etwa der „presi.controller“ die Steuerung interaktiver Elemente durch Zeitmarken im Film (Abb. 4).

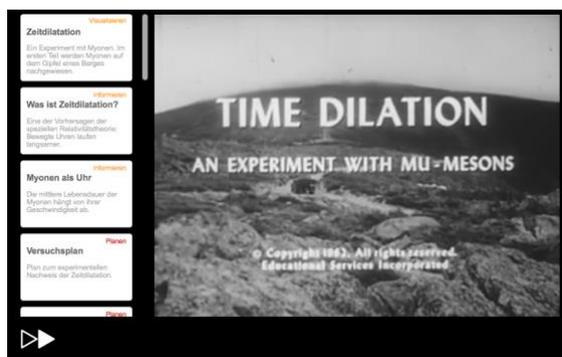


Abb. 4: Die Sequenzierung des Films realisiert über eine Menüleiste zur individuellen Wiedergabesteuerung. (Screenshot der tet.folio-Einbettung des Films: *From Time Dilatation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)

Über einfache Befehle wie „play film 3:12“ wurde in einem ersten Schritt der vollständige Film entsprechend den Ergebnissen einer Inhaltsanalyse strukturiert und durch die Möglichkeit des Schnellzugriffs auf Schlüsselszenen ergänzt.

Studien zur strukturierten Segmentierung und individuellen Wiedergabesteuerung eines Films zeigen bereits da-durch lernwirksame Effekte im Vergleich zur passiven Rezeption [7].

Die weiteren Schritte zur Ergänzung des Films durch interaktive Lernelemente betreffen dann die Entwicklung von sieben Inhaltsmodulen, die sich an den Schlüsselszenen des Films in ihrer chronologischen Abfolge orientieren (s. Abb. 5):

- Modul 1 – Orientieren:** In kurzen Instruktionssequenzen aus dem Film wird zunächst der Begriff der Zeitdilatation abstrakt formuliert, dann in Beispielen erläutert und die Planung des Experiments schrittweise vorgestellt. Das Modul bietet damit mögliche Anknüpfungen zum Gedankenexperiment der Lichtuhr oder zum exponentiellen Zerfallsgesetz instabiler Elementarteilchen.

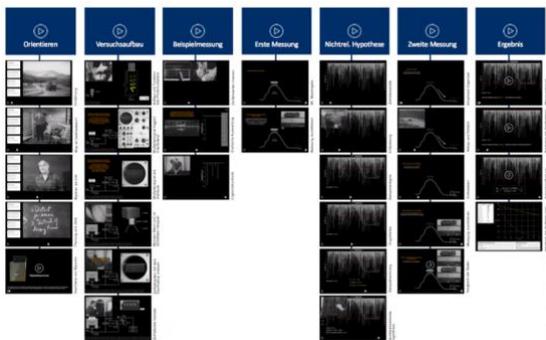


Abb. 5: Grobstruktur des Systems aus sieben Modulen, die Ziel und Aufbau des Experiments, seine Durchführung und Auswertung als Kombination kurzer Filmsequenzen und interaktiven Lernelementen.

- Modul 2 – Versuchsaufbau:** Der im Film dargestellte diskrete Versuchsaufbau mit rein analogen Geräten wird in diesem Modul ergänzt durch ein grafisches Schema (aus [3]), das so im Film nicht dargestellt wird. Dieses Schema wird in diesem Modul nicht vollständig präsentiert, sondern schrittweise, parallel zu der Erklärung des Aufbaus und der Funktion einzelner Komponenten aufgebaut. Hier sind hinsichtlich einer möglichen Anschlussfähigkeit zwei Komponenten von besonderer Bedeutung: der Photomultiplier und das Oszilloskop.

Zu beiden ermöglichen interaktive Elemente in diesem Modul das individuelle Nachvollziehen grundlegender Funktionen, etwa das Triggern des Oszilloskops über ein Multipliersignal durch einen Lichtblitz im Szintillator (s. Abb. 6 und 7). Weitere Filmsequenzen veranschaulichen dann das Abbremsen der Myonen, das Messen und fotografische Registrieren der Zerfallsdauer sowie das Messen der Myonenrate.

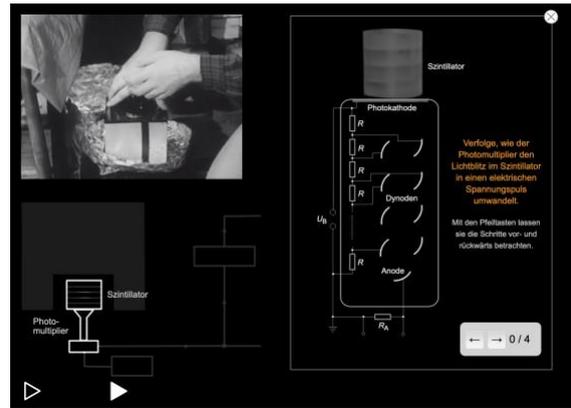


Abb. 6: Ein interaktives Element im Modul 2 veranschaulicht die Funktion des Photomultipliers. (Screenshot der tet.folio-Einbettung des Films: From *Time Dilation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)



Abb. 7: Der vom Myon ausgelöste Lichtblitz im Szintillator erzeugt im Multiplier einen Spannungsimpuls, der das Oszilloskop triggert. Das lässt sich hier über die Taste "Myongenerator" interaktiv nachvollziehen. Die erklärende Filmsequenz dazu pausiert solange, bis der Lernende die Aktivität schließt. (Screenshot der tet.folio-Einbettung des Films: From *Time Dilation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle in den hier beschriebenen Modulen integrierte interaktive Lernelemente, wie auch die einzelnen Teilsequenzen des Films, als separate Elemente zur Konstruktion von Lernumgebungen einsetzbar sind. Damit lässt sich die didaktische Gestaltbarkeit von aktivierenden Lernaufgaben nochmals deutlich erweitern.

- Modul 3 – Beispielmessung:** In diesem für das Verständnis des Experiments und seiner Auswertung zentralen Modul wird anhand einer Beispielmessung für fünf Zerfallsereignisse das Prinzip der statistischen Auswertung demonstriert. Auch in diesem Modul wird der Film durch eine interaktive Sequenz im Kontext

der filmischen Darstellung unterbrochen. Die hierbei selbst erzeugte grafische Darstellung kann der Lernende dann mit dem im weiteren Verlauf des Films dargestellten Ergebnis der Auswertung vergleichen und bei Bedarf wiederholen (s. Abb. 8).

- **Modul 4 – Erste Messung:** Hier erfolgt nun die erste echte Messung der Zerfallsstatistik und der Zerfallsrate. Allerdings nicht im Film, sondern durch die/den Lernenden. Hierzu muss sie/er den im Beispiel demonstrierten Schalter betätigen und damit der Zähl- und Registriervorgang selbst starten (s. Abb. 9).

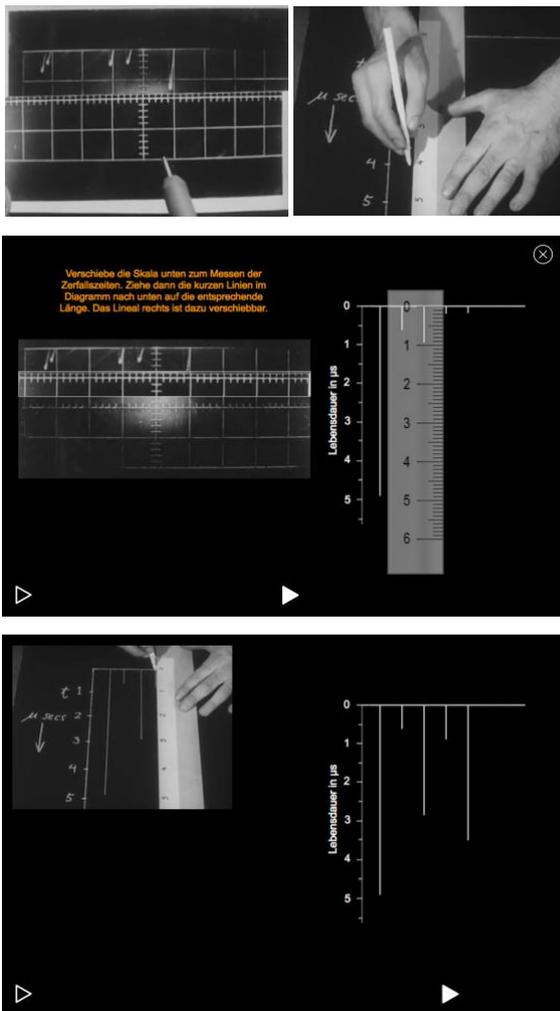


Abb. 8: Beispiel für die Verzahnung interaktiver Elemente mit dem Film. Die Demonstration der Auswertung einer Messung erfolgt im Film. Das interaktive Lernelement (Mitte) ermöglicht das selbstständige Nachvollziehen der vorgeführten Handlung. Unten wird das Ergebnis mit dem Filmbeispiel kontrolliert. (Screenshot der tet.folio-Einbettung des Films: From *Time Dilation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)

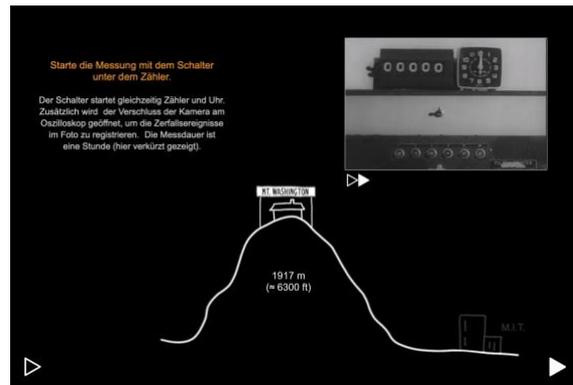


Abb. 9: Das Bestätigen des Schalters im Filmbild startet die erste Messung. (Screenshot der tet.folio-Einbettung des Films: From *Time Dilation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)

- **Modul 5 – Auswertung:** Eine kurze Filmsequenz zeigt zunächst das manuelle Erstellen der grafischen Darstellung der Zerfallsstatistik. Diese Grafik dient im Weiteren dann zur Bestimmung der klassisch zu erwartenden Myonenrate auf Meeresspiegelniveau (nichtrelativistische Hypothese). Im Modul kann diese zunächst in einem interaktiven Element (s. Abb. 10) selbst bestimmt werden um das eigene Ergebnis dann wiederum mit dem im Film dargestellten zu vergleichen.

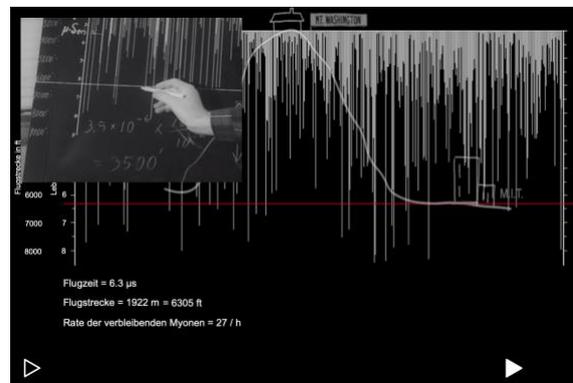


Abb. 10: Kontrolle der mit der interaktiven Zerfallsstatistik (klassisch) ermittelten Zerfallsrate auf Meeresspiegelniveau durch Vergleich mit dem Ergebnis aus dem Film. (Screenshot der tet.folio-Einbettung des Films: From *Time Dilation – An Experiment with Mu-Mesons*, copyright 1963 by Education Development Center, Inc. (EDC). Used with permission and with all other rights reserved.)

- **Modul 6 – Ergebnis:** Im Film wird nun abschließend aus den zwei gemessenen Zerfallsraten mit Hilfe der Zerfallsstatistik der Faktor der Zeitdilatation $(1-[v/c]^2)^{1/2}$ in einer vereinfachten Darstellung experimentell bestimmt.

Ergebnis: Die 'Uhr' schnell bewegter Myonen geht damit für einen Beobachter auf der Erde um den Faktor $1/9$ langsamer als die ruhender Myonen.

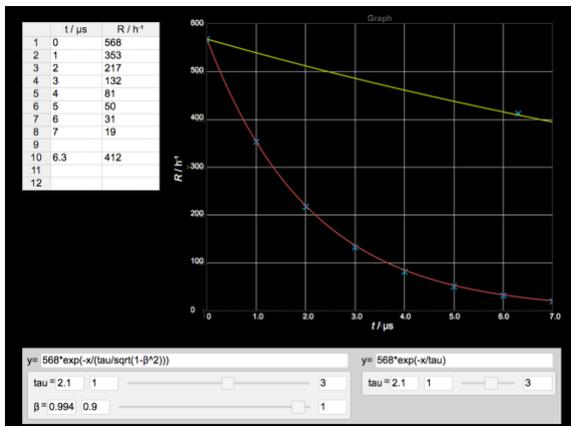


Abb. 11: Interaktive Darstellung der Zerfallskurven aus den der Zerfallsstatistik (Modul 5) entnommenen Messdaten und dem Ergebnis der zweiten Messung (Modul 6).

Dieses Ergebnis lässt sich dann mit dem theoretischen Wert für $v = 0.995c$ vergleichen. Darüber hinaus ermöglicht ein zusätzliches interaktives Element einen Vergleich der aus den Filmdaten ermittelten Zerfallskurven für ruhende und bewegte Myonen (vgl. Abb. 11).

Im Unterschied zur vergleichbaren abstrakten Darstellung aus der Literatur (vgl. Abb. 12, [8]) kann dieses Ergebnis schrittweise selbstständig erarbeitet werden und bietet über den Bezug zum Film eine anschauliche Verknüpfung mit dem hinter der abstrakten Grafik liegenden Experiment.

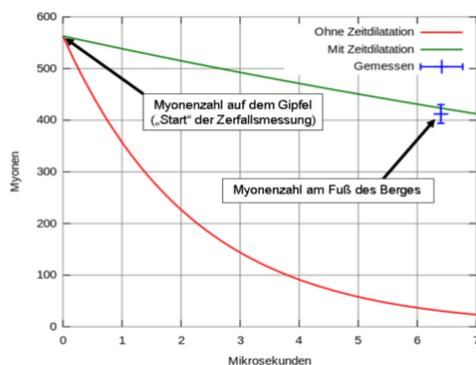


Abb. 12: Darstellung der Zerfallskurven von ruhenden und bewegten Myonen in der Literatur basierend auf den Daten aus dem Experiment von Frisch & Smith [3].

5. Zusammenfassung

Das Beispiel der PSSC-Lehrfilme weist darauf hin, dass es eine große Vielfalt von didaktisch aufbereiteten Darstellungen von unterrichtlich relevanten Experimenten gibt, denen jedoch ein Problem gemeinsam ist: Eine Adaption an das Vorwissen der

Lernenden und die flexible Einbettung in differenzierte Lernumgebungen ist im starren Format des klassischen Lehrfilms nicht möglich. Auch zunächst dann nicht, wenn diese Filme in digitalisierter Form vorliegen.

Allerdings bietet die Digitalisierung durch die Modularisierung und die Gestaltung von mit dem Film visuell verknüpften interaktiven Elemente auch neue Chancen zur Realisierung von Lernumgebungen im Kontext experimenteller Erfahrung, die in vielen Filmen weit über die unterrichtlichen Möglichkeiten hinausgeht.

Hinsichtlich der hier thematisierten Methode des experimentellen Nachweises der Zeitdilatation über die Zerfallsstatistik von Myonen bestehen vielfältige Anschlussmöglichkeiten. Ein Beispiel ist ein Experiment zum Myonenzerfall, das 1975 am CERN mit künstlichen Myonen in einem Speicherring durchgeführt wurde und einen unmittelbaren Vergleich mit den eigenen Ergebnissen erlaubt (vgl. Abb. 13, [12, 13]).

Durch den vergleichsweise geringen (technischen) Aufwand für die Realisierung und Verbreitung der interaktive rekonstruierten Filme und die damit verbundene schnelle Adaptierbarkeit auf die verschiedenen Anforderungen des unterrichtspraktischen Einsatzes, ist dieses Verfahren auf weitere (klassische) Lehrfilme, nicht nur aus der PSSC-Reihe, übertragbar.

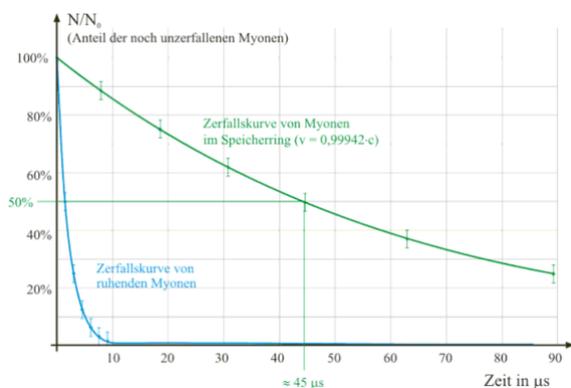


Abb. 13: Vergleich zweier Zerfallskurven für ruhende und bewegte Myonen, die künstlich in einem Speicherring (CERN) erzeugt wurden.

6. Literatur

- [1] SIMPLECLUB: Zeitdilatation - Spezielle Relativitätstheorie 2: <https://youtu.be/nLFJgqfjCA8> (Stand: 5/2022).
- [2] LEIFIPhysik – Experiment von ROSSI und HALL. URL: <https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/aufgabe/experiment-von-rossi-und-hall> (Stand: 5/2022).

- [3] Frisch, D.H.; Smith, J.H. (1963): Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons. In: Am. J. Phys. 31, 342 (1963), URL: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1969508> (Stand: 5/2022).
- [4] Barbier, R.; Fleck, S.; Perriès, S. & Ray, C. (2005): Integration of information and communication technologies in special relativity teaching. Eur. J. Phys. 26 (5), S.13-22, URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0143-0807/26/5/S02> (doi.org/10.1088/0143-0807/26/5/S02) (Stand: 5/2022).
- [5] Friedman, J.R. (1963): Time dilation, an experiment with mu-mesons. URL: <https://archive.org/details/TimeDilation>. (Stand: 5/2022).
- [6] PSSC Film Collection. URL: <https://archive.org/search.php?query=subject%3A%22pssc%22>. (Stand: 5/2022).
- [7] Findeisen, S.; Horn, S. & Seifried, J. (2019): Lernen durch Videos – Empirische Befunde zur Gestaltung von Erklärvideos. MedienPädagogik, (Oktober), S. 16–36, URL: doi.org/10.21240/mpaed/00/2019.10.01.X. (Stand: 5/2022).
- [8] QUA-LiS NRW (2022): Schlüsselexperimente Physik in der gymnasialen Oberstufe, V23 - Myonenzerfall. URL: <https://www.schulentwicklung.nrw.de/materialdatenbank/material/view/5249> (Stand: 5/2022).
- [9] Kirstein, J., Nordmeier, V. (2014): tet.folio: Physik lehren und lernen mit einem digitalen Portfolio. In: Praxis der Naturwissenschaften PHYSIK in der Schule 63 (3 / 63), S. 19
- [10] DESY (2020): Liquid Scintillation Muon Decay Observer. URL: https://physik-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/experimente/lido/index_ger.html (Stand: 5/2022).
- [11] Kulgemeyer, C. (2019): Qualitätskriterien zur Gestaltung naturwissenschaftlicher Erklärvideos. In: Maurer, C. (Hrsg.), Naturwissenschaftliche Bildung als Grundlage für berufliche und gesellschaftliche Teilhabe. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Kiel 2018, Publisher: Universität Regensburg, pp.285-288.
- [12] LEIFIPhysik – Myonen-Experiment in Cern. URL: <https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/versuche/myonen-experiment-cern> (Stand: 5/2022).
- [13] Bailey, J. et al. (1979): Final report on the CERN muon storage ring including the anomalous magnetic moment and the electric dipole moment of the muon, and a direct test of relativistic time dilation. In: Nuclear Physics B, Volume 150, 1979, Pages 1-75, URL: [https://doi.org/10.1016/0550-3213\(79\)90292-X](https://doi.org/10.1016/0550-3213(79)90292-X) (Stand: 5/2022).