Leibniz Universität Hannover

Fakultät für Mathematik und Physik

Institut für Didaktik der Mathematik und Physik

Masterarbeit

Experimentieren für alle - Entwicklung eines interaktiven Bildschirmexperiments unter didaktischen und praktischen Aspekten

Vorgelegt von: Felix Hentel

Matrikelnummer: 3118960

28. Februar 2019

Erstprüfer: Prof. Dr. Gunnar Friege

Zweitprüfer: Dr. Jan-Willem Vahlbruch

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe. Ich versichere, dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommenen Aussagen als solche gekennzeichnet habe und dass die eingereichte Arbeit weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen ist.

Hannover, den 28. Februar 2019. Felix Hentel

Verzeichnisse

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnisse **v**

1 Einleitung **1**

2 Digitale Experimente **3**
2.1 Didaktische Bedeutung von (Real-)Experimenten 4
2.1.1 Schülerexperimente 7
2.2 Arten digitaler Experimente 9
2.2.1 Simulationen und Virtuelle Labore 9
2.2.2 Interaktive Bildschirmexperimente 11
2.2.3 Remotely Controlled Labs 12
2.2.4 Interaktive Videos 14
2.3 Vor- und Nachteile digitaler Experimente zum Realexperiment 15

3 Gammaspektrometrie als remotely controlled lab **19**
3.1 Das Projekt MEET-CINCH 19
3.2 GammaLab 20
3.3 Gammaspektrometrie mit dem GammaLab 23
3.3.1 Auswertung nach DIN ISO 11929 24
3.3.2 Messunsicherheiten 27
3.3.3 Kalibrierung 28

4 Erstellung des IBE **33**
4.1 tet.folio 34
4.1.1 ibe.maker 35
4.2 Vom GammaLab zum IBE 36
4.2.1 Entwicklung mit ibe.maker 36
4.2.2 Entwicklung ohne ibe.maker 40
4.3 Vergleich des IBEs und GammaLab 44

5 Didaktische Möglichkeiten der Gammaspektrometrie für verschiedene Niveaus **47**
5.1 Oberstufe 47

5.2 Bachelorkandidaten 49
5.3 Masterkandidaten 50
5.4 Exkludierte Inhalte 51

6 Diskussion der Ergebnisse 53

7 Ausblick 57

Literaturverzeichnis 59

A Anhang 65
A.1 Ergänzungen 65
A.2 Versuchsanleitungen 68
A.3 Codes 72

Danksagung 119

Abbildungsverzeichnis

2.1 Virtuelles Experiment zur Bestimmung der Halbwertszeit von Barium-137m[1] . . 10
2.2 IBE Gitterspektrometrie 11
2.3 Darstellung der Funktionsweise eines RCL 13

3.1 Aufbau des GammaLab im IRS 21
3.2 Benutzeroberfläche des GammaLab - Probenwechsel 22
3.3 Benutzeroberfläche des GammaLab - Messung 23
3.4 Energiekalibrierung 30
3.5 Interpolation der Efficiency mit der Jäckel-Westmeier-Funktion 31

4.1 Werkzeuge des ibe.maker 35
4.2 Das IBE im Bearbeitungsmodus des ibe.maker 37
4.3 Vergleich der Oberfläche beider IBEs 43
4.4 Vergleich der Oberfläche RCL und IBEs 44

A.1 Werkzeuge des tet.folios als Screenshoot der Plattform 65
A.2 Das Layout des IBEs für den ibe.maker 66
A.3 Einstellung der Switch Zone für Probe 1 66
A.4 Einstellung der Bildfläche für die Webcam-Aufnahmen 66
A.5 Einstellung der Bildfläche für die Messzeit-Vorwahl 67
A.6 Layoutmodus des IBEs ohne ibe.maker 67
A.7 Einstellungsmöglichkeiten der tet.box 68
A.8 Versuchsanleitung für die Oberstufe 69
A.9 Versuchsanleitung für das Bachelorniveau 70
A.10 Versuchsanleitung für das Masterniveau 71

Tabellenverzeichnis

2.1 Eigenschaften digitaler Experimente 15

3.2 Standardunsicherheit verschiedener Messgrößen 28
3.3 Multinuklidlösung QCY-48 29

4.1 Vergleich der IBEs 44
4.2 Vergleich des GammaLab und IBEs 45

Abkürzungsverzeichnis

IBE interaktives Bildschirmexperiment

RCL remotely controlled lab

SuS Schülerinnen und Schüler

VL virtuelle Labore

IV interaktive Videos

IRS Institut für Radioökolgie und Strahlenschutz

LUH Leibniz Universität Hannover

MOOC Massive Open Online Course

EP Einführungsphase

QP Qualifikationsphase

KC Kerncurriculum

1 Einleitung

Digitale Medien sind fester Bestandteil der Lehre. Dabei unterliegen diese einer stetigen Weiterentwicklung, so auch im Fach Physik. Mittlerweile existieren verschiedene Möglichkeiten, Experimente nicht nur real, sondern auch durch digitale Medien durchzuführen. Eine Möglichkeit stellt hier das interaktive Bildschirmexperiment dar.
Interaktive Bildschirmexperimente wurden vor mehr als 20 Jahren an der TU Berlin entwickelt und seitdem fortwährend optimiert, um vor allem den hohen Aufwand für die Entwicklung zu reduzieren (Kirstein, Haase, Mühlenbruch & Nordmeier, 2016). Auf die Entwicklung folgte die Erforschung dieser Alternative zum Realexperiment, so stellten Hüther und Theyssen (2005, S. 127 f.) in ihrer Studie fest, dass das Experimentieren in der hypermedialen Lernumgebung bei richtiger Anwendung den gleichen Lernzuwachs erreicht wie im realen Praktikumsversuch. Gleichzeitig wird angemerkt, dass das Potential der hypermedialen Lernumgebung noch nicht ausgeschöpft werden könnte, da unter anderem der Lernort und -zeitpunkt vorgegeben waren. Bis heute existieren allerdings kaum empirische Daten zur Anwendung von interaktiven Bildschirmexperimenten in der Lehre.
Die existierenden interaktiven Bildschirmexperimente beschränken sich auf die Darstellung von einfachen Experimenten, in denen die Manipulationen sich auf wenige Variablen mit einfacher Abhängigkeit beziehen. Komplexere Experimente, in denen Interaktionen von mehreren Variablen abhängen, lassen sich dagegen nicht finden.
Das fernsteuerbare GammaLab zur Gammaspektrometrie stellt ein solches komplexeres Experiment dar. Die Digitalisierung des Experiments bietet dabei den besonderen Anreiz, dass dieses als Realexperiment aufgrund des hohen Aufwands nicht in Schulen und vielen Universitäten durchgeführt werden kann. Eine digitale Repräsentation eines solchen Experiments könnte daher neue Perspektiven eröffnen.
Daher sollen im Rahmen dieser Masterarbeit zwei Ziele verfolgt werden. Erstens soll getestet werden, ob komplexe Experimente als interaktives Bildschirmexperiment gestaltet werden können und wenn, unter welchem Aufwand. Hierdurch sollen eventuelle Grenzen dieses digitalen Experiments geklärt werden, um die Einsatzmöglichkeiten besser abschätzen zu können. Zudem soll der Aufwand für die Entwicklung abgeschätzt werden, da dies für die Planung zukünftiger Projekte relevant sein könnte. Zweitens soll aufgezeigt werden, welche Möglichkeiten sich durch die Entwicklung eines interaktiven Bildschirmexperiments für die Lehre der

Physik eröffnen. Dabei soll dessen Potential sowohl durch theoretische Überlegungen als auch praktisch in Form von Versuchsanleitungen dargestellt werden.
Durch die Entwicklung des interaktiven Bildschirmexperiments auf Basis des GammaLab soll in Anbetracht dieser Ziele eine Schnittstelle zwischen den aktuellen technischen Möglichkeiten, Experimente in digitale Formate zu überführen, und der weiteren Erforschung dieser bei der Anwendung in Schulen und Universitäten geschaffen werden.

Zum Erreichen der Ziele dieser Masterarbeit wird daher wie folgt vorgegangen:
Zuerst werden in Kapitel 2 digitale Experimente thematisiert, wobei auf die didaktische Bedeutung des Experiments eingegangen wird und auf verschiedene Arten digitaler Experimente. Dadurch sollen die Besonderheiten des interaktiven Bildschirmexperiments herausgestellt werden. In Kapitel 3 wird zum einen das GammaLab als Teil des MEET-CINCH-Projekts vorgestellt und zum anderen die Auswertung der Gammaspektrometrie, um sich hierauf in den zu entwickelnden Versuchsanleitungen beziehen zu können. Das 4. Kapitel behandelt die praktische Erstellung des interaktiven Bildschirmexperiments. An dieser Stelle wird zudem genauer auf die Plattform tet.folio der FU Berlin eingegangen, die als Basis für die Erstellung dienen kann. In Kapitel 5 werden didaktische Möglichkeiten für verschiedene Zielgruppen aufgezeigt, die Anwendung in den Versuchsanleitungen finden werden. Das Kapitel 6 dient der Diskussion der formulierten Ziele, die hier im Zusammenhang der Erkenntnisse und Ergebnisse der vorherigen Kapitel stattfinden wird. Abschließend wird eine zusammenfassende Betrachtung der Masterarbeit vorgenommen.

2 Digitale Experimente

Im folgenden Kapitel soll sich digitalen Experimenten gewidmet werden. Dabei wird zuerst auf die Bedeutung von Experimenten, explizit Realen, im Zusammenhang mit der Didaktik eingegangen. Anschließend werden verschiedene Arten digitaler Experimente beschrieben, um vor allem Unterschiede dieser herausstellen zu können. Abschließend sollen digitale Experimente dem Realexperiment gegenübergestellt werden, sodass Vor- und Nachteile herausgearbeitet werden können.

Bevor über die didaktische Bedeutung von Experimenten gesprochen wird, soll zuerst geklärt werden, wie der Begriff "digitale Experimente" im Zusammenhang dieser Arbeit zu verstehen ist.
Wenn von Experimenten gesprochen wird, die nicht analog, sondern ausschließlich am Computer, Tablet oder Smartphone durchgeführt werden, existieren eine Vielzahl an Begriffen, um diese zu benennen. Kirstein et al. (2016, S. 1) sprechen von „Repräsentation physikalischer Experimente in Medien“. Dabei wird der Medienbegriff jedoch nicht genauer erläutert, wodurch diese Bezeichnung etwas unpräzise wird. Zu Medien gehören sowohl digitale als auch analoge Medien wie die Tafel, Bücher oder der Overheadprojektor (R. Berger, Girwidz, Heering, Höttecke & Hopf, 2011, S. 115). Daher benutzen andere Autoren den Zusatz "neue" Medien, wodurch ausdrücklich Medien wie das Smartphone oder Tablet bezeichnet werden sollen (Kircher, Girwidz & Häußler, 2015, S. 402). Alternativ wird auch direkt der Zusatz "digital" verwendet (Autorengruppe der DPG, 2016, S. 108). Folglich könnte die Bezeichnung von Kirstein et al. (2016) um das Wort *digitale* oder *neue* erweitert werden. Hierdurch wird jedoch eine ohnehin lange Bezeichnung weiterhin vergrößert, was die Handhabung umständlich macht.
Als weitere Bezeichnung besteht der "virtuelle Versuch"[1], allerdings beschränkt sich dieser Begriff auf Experimente, denen Simulationen zugrunde liegen (M. Berger, 2018, S. 113). Er fasst dabei keine Experimente auf digitalen Medien mit ein, die reale Versuche repräsentieren. Aufgrund dieser in der Literatur vorherrschenden Uneinigkeit über einen Obergriff für Experimente, die auf digitalen Medien durchgeführt werden, wurde für diese Arbeit der Begriff

[1] Die Begriffe *Experiment und Versuch* weisen keinen systematischen Unterschied auf, daher kann die Bedeutung als synonym betrachtet werden (R. Berger et al., 2011, S. 106).

"digitale Experimente" geschaffen. Als digitale Experimente werden in dieser Arbeit Experimente bezeichnet, die vollständig mit Digitaltechnik umgesetzt werden (Duden, o. J.). Folglich schließt diese Bezeichnung keine Experimente, die durch digitale Instrumente unterstützt werden, ein, sondern lediglich solche, die ausschließlich auf digitalen Medien umgesetzt werden. Wenn folgend von digitalen Experimenten gesprochen wird, bezieht sich der Begriff auf die in dieser Arbeit getroffene Definition.
Im folgenden Abschnitt soll auf die allgemeine didaktische Bedeutung von Experimenten eingegangen werden, bevor sich dieses Kapitel ausführlicher den digitalen Experimenten widmet.

2.1 Didaktische Bedeutung von (Real-)Experimenten

Die „Physikdidaktik befasst sich mit der Theorie und Praxis des Lernens und Lehrens von Physik “ (R. Berger et al., 2011, S. 7).
In diesem Abschnitt soll speziell aus der Perspektive des Lehrens und auch Lernens von Physik auf die Bedeutung des Experiments eingegangen werden. Dabei beschränken sich die Ausführungen auf die für diese Arbeit relevanten Aspekte. Daher wird vor allem auf die didaktischen Ziele beim Experimentieren eingegangen und auf Empfehlungen für eine optimale Lernwirksamkeit von Experimenten.

> *„Experimente sind gezielt eingeleitete planmäßige Beobachtungen. Die überwiegende Anzahl physikalischer Beobachtungen geschieht durch Experimente.“ (Scobel, Lindström & Langkau, 2002, S. 3)*

Scobel et al. (2002) beschreiben das Experiment als nicht zufällige Beobachtung, die somit zielgerichtet stattfindet. Die Funktion dieser als Experiment beschriebenen Beobachtung ist jedoch abhängig vom Zusammenhang, in dem diese durchgeführt wird. So dienen Experimente in der Forschung zur Diskussion von Theorien, in der Lehre[2] dagegen vor allem dem Vermitteln von Inhalten und Kompetenzen (R. Berger et al., 2011, S. 106). Doch auch die Interesse weckende und motivierende Komponente von Experimenten ist in der Didaktik von Bedeutung (V. Berger, 2006, S. 151).
V. Berger (2006, S. 149) definiert im Zusammenhang der Physikdidaktik das Experiment wie folgt:„... so wird man unter dem Experiment [...] ein objektives und wiederholbares Verfahren zur Erkenntnisgewinnung verstehen“. Die didaktischen Funktionen des Experiments überstei-

[2] Wird im Zusammenhang dieser Arbeit der Begriff *Lehre* verwendet, bezieht sich dieser auf die Vermittlung physikalischer Inhalte im Zusammenhang der Institutionen Schule **und** Universität. Daher wird der Begriff *Physikunterricht* vermieden.

gen jedoch die reine Erkenntnisgewinnung. R. Berger et al. (2011, S. 107) liefern in diesem Zusammenhang die umfangreichste Betrachtung. Diese deckt sich inhaltlich mit etablierten Ausführungen wie von (Reinhold, 1996, S. 15) oder (Kircher et al., 2015, S. 229) und ergänzt diese zustäzlich um weitere Aspekte. Insgesamt umfasst die Betrachtung von R. Berger et al. (2011) 16 Beiträge des Unterrichtsexperiments zu den verschiedenen **Zielen des Physikunterrichts**, die folgend aufgezeigt werden:

Vermittlung von Fachwissen

(1) Überzeugende Darstellung eines Phänomens
(2) Veranschaulichung eines Konzepts
(3) Überprüfung physikalischer Gesetze

Begriffswechsel

(4) Erzeugung eines kognitiven Konflikts
(5) Plausibles Argument für eine neue Vorstellung

Naturwissenschaftliches Arbeiten

(6) Entwicklung von Fragestellungen und Hypothesen
(7) Versuchsplanung und -durchführung
(8) Auswerten von Daten
(9) kritischer Umgang mit Versuchsergebnissen und deren Verallgemeinerung
(10) Erwerb experimenteller Fähigkeiten

Kommunizieren über Physik

(11) Dokumentation von Versuchen und Daten
(12) Gegenüberstellung und Diskusssion unterschiedlicher Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Lernen über die Natur der Naturwissenschaften

(13) Anlass zur Diskussion über Wissensentstehung in der Naturwissenschaft

Interesse anregen

(14) Alltagsbezüge aufzeigen
(15) Forschungsexperimente veranschaulichen
(16) Aufmerksamkeit erregen, zum Staunen bringen, unterhalten

Die von R. Berger et al. (2011) dargestellten Unterrichtsziele weisen keine signifikanten Unterschiede zu den im Kerncurriculum Niedersachsens beschriebenen Kompetenzbereichen für die Sekundarstufe I auf (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2015, S. 7). Auch die erhoffte Wirkung von Experimenten im Physikunterricht entsprechen den zuvor beschriebenen 16 Aspekten (ebd., S. 18 ff.)

> *„Experimente haben ihren festen Platz in Lehrplänen, Schulbüchern, und der Unterrichtspraxis. Umso erstaunlicher ist es, dass es nach den konsistenten Ergebnissen der fachdidaktischen Forschung keinen Zusammenhang zwischen dem Lernerfolg der Schüler und dem Einsatz von Unterrichtsexperimenten gibt“* (R. Berger et al., 2011, S. 111).

Diese Diskrepanz zwischen der Forderung nach Experimenten im Physikunterricht und dem mangelnden Beitrag zum Lernerfolg werden verschiedene Ursachen zu Grunde gelegt.
R. Berger et al. (2011, S. 111) beschreiben, dass beispielsweise das Demonstrationsexperiment nicht zum besseren Verständnis bei den Schülerinnen und Schülern (SuS) beiträgt. Dies liege an den Beobachtungen der SuS, die sich aufgrund verschiedener Alltagsvorstellungen und Erwartungen an den Ausgang des Experiments unterscheiden. Daher könne die Beobachtung eines lehrerzentrierten Experiments keinen gezielten kognitiven Prozess hervorrufen. Folglich müssten Experimente ausführlich vorbereitet werden, damit bereits vor der Durchführung über mögliche Ausgänge gesprochen wird. Ebenso sollten Experimente nach der Durchführung ausführlich besprochen werden, damit Fragen geklärt werden können wie: *Entsprechen die Beobachtungen den Erwartungen?* oder *Was kann aus den Beobachtungen gefolgert werden?*(ebd., S. 112) ist.
Auch Tesch und Duit (2004, S. 53 f.) heben die Einbettung des Experiments in den Unterrichtszusammenhang als existentiell für den Lernerfolg hervor. Die „subtile Balance zwischen Theorie und Experiment sowie zwischen Instruktion (dem angeleiteten Lernen) und Konstruktion (der eigenständigen Exploration, Diskussion, Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente und der Darstellung der Ergebnisse)“ (Euler, 2001, zitiert nach (Tesch & Duit, 2004, S. 54)) sei dabei entscheidend.
Die Probleme beim Experimentieren ergeben sich somit zum einen aus einer mangelnden Verbindung von Theorie und Praxis, sodass eine Zielklarheit auf Seiten der SuS fehlt. Zum anderen sind die Experimente zu wenig schülerzentriert, was widerum ersteres teilweise bedingt. Das mangelnde Involvement der Lernenden kann dazu führen, dass diesen die Verbindung zwischen dem Unterrichtsinhalt und dem Zweck des Experiments unbekannt ist.
Tesch (2005, S. 46 f.) führt weiterhin auf, dass auch bei Schülerexperimenten das Problem auftritt, dass diese häufig trivial sein. Zudem wiesen Experimente vermehrt keinen Bezug zu den Interessen und Fähigkeiten der SuS auf.
PISA und TIMSS im Jahr 2000 hatten gezeigt, dass deutsche SuS in den Naturwissenschaften unterdurchschnittliche Ergebnisse im Vergleich zu den OECD-Staaten aufwiesen, die sich jedoch bis 2012 über den Durchschnitt verbessern konnten (Schiepe-Tiska, Schöps, Rönnebeck, Köller & Prenzel, 2012, S. 24). Dies sei unter anderem auf eine bessere Einbettung von Experimenten in den Unterricht zurückzuführen. Doch weiterhin fordern Schiepe-Tiska et al. (2012, S. 25) die stärkere Berücksichtigung von Motivation und Interesse im naturwissenschaftlichen Unterricht.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass das Experiment zum einen mit einer ausführlichen Vor- und Nachbereitung in den Unterricht eingebettet werden sollte. Zum anderen die Lehrerzentrierung von Experimenten verringert werden sollte, da „das Beobachten eines lehrerzentrierten Unterrichtsexperiment nicht automatisch eine [...] Entwicklung des Wissens nach sich [zieht, FH]“ (R. Berger et al., 2011, S. 111). Daher soll im folgenden Abschnitt genauer auf das Schülerexperiment eingegangen werden. Dieses bietet eine Alternative zum Demonstrationsexperiment um der methodischen Monokultur des Unterrichts entgegenzuwirken, die Tesch und Duit (2004, S. 48) eher als Hauptproblem beschreiben, nicht die Lehrerzentrierung an sich.

2.1.1 Schülerexperimente

Das Schülerexperiment zeichnet sich durch die selbstständige Planung, Durchführung und Auswertung des Experiments durch die SuS aus, wobei die Selbstständigkeit von den (altersbedingten) Fähigkeiten selbiger abhängt (V. Berger, 2006, S. 154). Dies steht im deutlichen Gegensatz zum Demonstrationsexperiment, welches durch die Lehrkraft[3] durchgeführt wird (ebd., S. 152). Die Gründe für eine lehrerzentrierte Durchführung von Experimenten können bestehende Gefahren [4] oder erforderliche Geschicklichkeit bei der Durchführung darstellen (R. Berger et al., 2011, S. 109).
Damit ein Experiment als Schülerexperiment geeignet ist, sollten laut V. Berger (2006, S. 154 f.) daher folgende Bedingungen überprüft werden:

- Das Experiment eignet sich inhaltlich als Schülerexperiment.
- Die Ausstattung der Schule/Fachräume lässt eine Durchführung des Experiments in ausreichende Anzahl zu.
- Die Räumlichkeiten eignen sich zur Durchführung des Experiments.
- Es steht genügend Zeit für das Schülerexperiment zur Verfügung.
- Die Zusammensetzung der Klasse ermöglicht geeignete Schülergruppen zur Durchführung.
- Das Ergebnis ist kontrollierbar.

Können diese Bedingungen erfüllt werden und in der Folge das Experiment in Form eines Schülerexperiments, so ergeben sich nach (Kircher et al., 2015, S. 241 f.) folgende Vorteile:

[3] Im Einzelfall werden Demonstrationsexperimente auch von einem Schüler durchgeführt, doch auch hier besteht der signifikante Unterschied zum Schülerexperiment im geringen Involvement der gesamten Klasse.
[4] z.B. Hochspannung

- Schülerübungen kommen dem Drang nach Eigentätigkeit entgegen und ermöglichen einen Wechsel der Unterrichtsform.
- Aufbau und Ablauf des Versuchs werden aufgrund der direkten Beteiligung im Allgemeinen gut erfasst.
- Der Umgang mit technischen Geräten und Versuchsaufbauten wird gelernt.
- Überwinden von Schwierigkeiten und erfolgreiche Datenerfassung sind wichtige Grunderfahrungen.
- Individualisierungs- und Differenzierungsmöglichkeit lassen sich in Kleingruppen realisieren.
- Kooperatives Arbeiten in Gruppen wird geübt.

Doch auch Schülerexperimente weisen erstens Nachteile gegenüber dem Demonstrationsexperiment auf und zweitens Probleme, die bei falscher Anwendung auftreten können.
Zum einen können Experimente aufgrund mangelnder Ausstattung nicht als Schülerexperiment umsetzbar sein (M. Berger, 2018, S. 53). Zum anderen erfordern Schülerexperimente einen höheren Zeitaufwand in der Vorbereitung als auch in der Durchführung (Kircher et al., 2015, S. 242). Weiterhin kann die Betreuung durch eine Lehrkraft die Anzahl möglicher Schülergruppen begrenzen und es können in Folge der Organisationsform vermehrt Disziplinschwierigkeiten auftreten (ebd.).
Hopf (2007, S. 13-18) beschreibt in seiner Arbeit über problemorientierte Schülerexperimente verschiedene Probleme, die bei Schülerexperimenten auftreten können. Zum einen kann, teilweise bedingt durch kochbuchartige Handlungsanweisen, ein Experimentieren ohne nachzudenken stattfinden. Hierdurch werden keine höheren kognitiven Strategien verwendet. Zum anderen können sich die wahrgenommenen Ziele des Experiments zwischen Lehrkraft und SuS unterscheiden. So empfinden die SuS teilweise als Ziel das Befolgen der Versuchsanleitung oder das finden der richtigen Antwort, anstatt die Beobachtungen aus dem Experiment mit der Theorie des Unterrichts in Zusammenhang zu bringen. Weiterhin können mangelnde Vorkenntnisse der SuS und Alltagsvorstellungen die Durchführung und Auswertung des Experiments negativ beeinflussen. Sogar die Förderung der experimentellen Fähigkeiten gelingt teilweise nicht, da diese nur in Verbindung mit den fachlichen Inhalten erlernt werden kann.
Insgesamt haben Forschungsergebnisse gezeigt, dass unkritisch eingesetzte Schülerexperimente weder zum Lernerfolg noch zur Motivation beitragen (R. Berger et al., 2011, S. 112). Auch hier empfehlen sowohl Hopf (2007, S. 36) als auch R. Berger et al. (2011, S. 113) eine gezielte Einbettung der Schülerexperimente in den Unterricht, wie dies bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben wurde.
Nachdem in diesem Kapitel bisher auf das Experiment aus didaktischer Sicht eingegangen wurde, soll im folgenden Abschnitt genauer auf die verschiedenen Arten digitaler Experimente eingegangen werden.

2.2 Arten digitaler Experimente

Experimente unterscheiden sich nicht nur in der Organisationsform, sondern auch in der Art der Sachbegegnung (R. Berger et al., 2011, S. 108 f.). So können physikalische Inhalte durch die Nutzung von Realexperimenten verdeutlicht werden. Dem gegenüber stehen Modellexperimente, die einen Sachverhalt indirekt abbilden (ebd.).
Digitale Experimente weisen solche Unterschiede auf, dass nicht alle der einen oder anderen Art der Sachbegegnung zugeordnet werden können. Um die Unterschiede der Arten von digitalen Experimenten herauszuarbeiten, werden diese im folgenden beschrieben.

2.2.1 Simulationen und Virtuelle Labore

> *„Simulationen rekonstruieren Sachverhalte auf der Basis von formal-logischen Modellen. Ein Anwender kann verschiedene Parameter variieren und ihren Einfluss und ihre Bedeutung im Rahmen des Modells erfahren " (R. Berger et al., 2011, S. 122).*

H. Bergers et al. Definition von Simulationen spricht verschiedene Aspekte der Simulation an. Zum einen wird deutlich, dass es sich bei der Simulation um eine Rekonstruktion eines Sachverhaltes handelt, somit um ein virtuelles Abbild der Realität (Kircher et al., 2015, S. 403). Dieses Abbild basiert auf Modellen, die für gewöhnlich nur einen Ausschnitt der Realität beschreiben und die Bedingungen idealisieren (Autorengruppe der DPG, 2016, S. 114). Infolge dieser Idealisierung können in Simulationen häufig nur bestimmte Bereiche der Realität verstanden werden (ebd.).
Durch die Manipulation einzelner Parameter in der Simulation und die Beobachtung der Auswirkungen können Benutzer[5] Abhängigkeiten sowie die Bedeutung von Einflussfaktoren erfassen (Kircher et al., 2015, S. 403). Gleichzeitig kann durch die Benutzung der Simulation die Steuerung komplexer Systeme erprobt werden (ebd.).
Auch Neugebauer (2006, S. 2) beschreibt, dass Simulationen „insbesondere für komplexe physikalische Sachverhalte ein beträchtliches Potential zu besitzen [scheinen, FH]". Dieses Potential wird bei der Betrachtung von *virtuellen Laboren* deutlich. Scherp, Appelrath und Boles (2001, S. 11) definieren das virtuelle Labor als „die multimediale Nachbildung eines realen Labors im Rechner". Hierbei werden alle Räume, Gegenstände und Geräte des realen La-

[5] Zur besseren Lesbarkeit werden in dieser Masterarbeit personenbezogene Bezeichnungen, die sich zugleich auf Frauen und Männer beziehen, teilweise nur in der im Deutschen üblichen männlichen Form angeführt. Dies soll jedoch keinesfalls eine Geschlechterdiskriminierung oder eine Verletzung des Gleichheitsgrundsatzes zum Ausdruck bringen.

bors virtuell umgesetzt, sodass ein vollständig eingerichtetes Labor zum Experimentieren zur Verfügung steht (ebd.). Der enorme Vorteil eines solchen Labors besteht darin, dass der Anwender Experimente durchführen kann, die aus Kosten- oder Kapazitäts- sowie Zeitgründen nicht umgesetzt werden können (Pester & Auer, 2011, S. 4).
Die Johannes Gutenberg Universität hat in Zusammenarbeit mit dem Deutsch-Schweizerischen Fachverband für Strahlenschutz ein solches virtuelles Experiment entwickelt, welches kostenlos Schulen und Lehrkräften zur Verfügung steht[6]. Das abgebildete Experiment dient zur Bestimmung der Halbwertszeit mit Hilfe eines Isotopengenerators, die in Schulen nicht mehr zulässig ist.

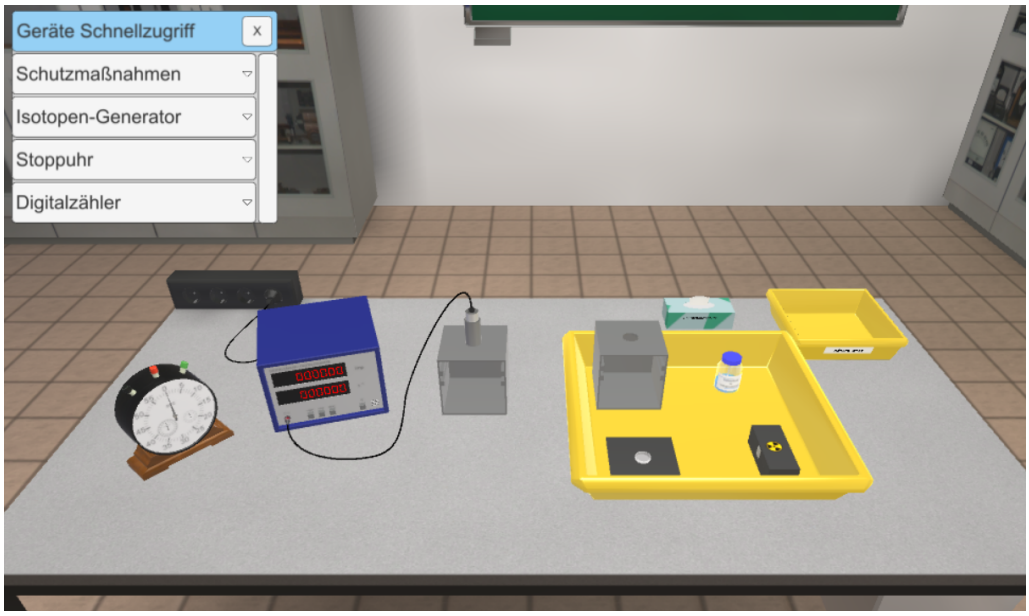


Abbildung 2.1: Virtuelles Experiment zur Bestimmung der Halbwertszeit von Barium-137m[7]

Das virtuelle Labor in Abbildung 2.1 besteht aus verschiedenen Geräten, hierzu zählen Stoppuhr, Geiger-Müller-Zählrohr, Digitalzähler, und einer Versuchsanleitung, die den Benutzer bei Unklarheiten durch das Experiment führen kann. Die Geräte können mit der Maus oder über ein Touchpad bedient werden. Somit ist das virtuelle Labor auf verschiedenen Endgeräten wie dem Computer, Whiteboard, Tablet oder Notebook umsetzbar. In diesem Beispiel kann durch das virtuelle Labor ein Experiment von SuS umgesetzt werden, welches aufgrund der Gefahren als Realexperiment in der Schule nicht mehr zugelassen ist. Diese können somit mit Geräten und Chemikalien umgehen, die sie in der Schule nicht vorfinden.
Die Simulation oder auch das virtuelle Labor sind beides virtuelle Abbilder der Realität, wodurch sowohl die Schwächen als auch Stärken bestimmt werden. Die Lernwirksamkeit in Bezug auf reale Sachverhalte kann eher als gering eingestuft werden (Kirstein et al., 2016, S. 2).

[6] https://www.vre.uni-mainz.de/cs-ba-isotopengenerator/
[7] Bei der Abbildung handelt es sich um einen Screenshot des virtuellen Labors der Universität Mainz.

Abstrakte Modelle lassen sich dagegen sehr gut durch Experimente auf virtueller Basis veranschaulichen (Jeschke, Richter, Scheel, Seiler & Thomsen, 2005, o.S.). Weiterhin wird für die Durchführung nur ein digitales Endgerät benötigt und keine kostenintensive Laborausrüstung, wodurch Experimente für zuvor ausgeschlossene Anwender zugänglich werden.

2.2.2 Interaktive Bildschirmexperimente

Ein interaktives Bildschirmexperiment (IBE) stellt eine Repräsentation eines realen Experiments durch Fotoserien dar (Kirstein et al., 2016, S. 2). Hierbei wird das Experiment mit Hilfe der Stopp-Trick-Animation[8] bildhaft erfasst und kann zusätzlich mit Video-, Audio- und Messdaten erweitert werden, um das reale Experiment möglichst genau digital abzubilden (ebd.). Somit besteht das IBE ausschließlich aus realen Daten und greift dabei nicht auf die Verwendung von Modellen zurück, wie dies bei Simulationen der Fall ist (siehe 2.2.1). Deshalb ordnen es R. Berger et al. (2011, S. 108) in der Art der Sachbegegnung den Realexperimenten zu, da es sich um die digitale Aufzeichnung eines Versuches handelt.

(a) Linse links (b) Linse mittig

Abbildung 2.2: Beispiel eines IBEs der FU Berlin zur Gitterspektrometrie, testbar unter http://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/ibe/beispiele/index.html

Die Abbildung 2.2 zeigt ein IBE, welches ein Gitterspektrometer mit einer Natriumlampe darstellt. In diesem IBE kann nur der Abstand der Linse, welche in Abbildung 2.2 (a) rot eingekreist ist, variiert werden. Durch die direkte Manipulation der Linse mit der Maus kann in das Experiment eingegriffen werden. Das Resultat ist eine veränderte Darstellung der Spektrallinien auf dem zentralen Monitor.

[8] Als Stopp-Trick-Animation wird die Aufzeichnung einzelner Fotos von Objekten bezeichnet, die zusammengefügt eine flüssige Bewegung/Veränderung des Objekts hervorrufen (Holzwarth, 2010, S. 193)

Diese Art der Benutzeroberfläche soll eine möglichst realitätsnahe Bedienung des Experiments ermöglichen, was ein grundlegendes Element der IBEs darstellt (Kirstein et al., 2016, S. 2). Dabei reagiert diese Art der digitalen Experimente direkt auf die Handlung des Benutzers. „Diese Form der Interaktivität erzeugt beim Lernen-den die Illusion des unmittelbaren Umgangs mit dem abgebildeten realen Objekten im Experiment“ (ebd.).
Als Nachteile der IBEs beschreiben Kirstein et al. (2016, S. 2) zum einen den Aufwand, der mit der Erstellung verbunden ist. Dieser bezieht sich einerseits auf das Equipment, welches für die Aufnahmen erforderlich ist. Andererseits auf die informatischen Kompetenzen, die zum Programmieren der Benutzeroberfläche notwendig sind. Zum anderen ist durch das IBE die experimentelle Anordnung limitiert. Diese kann nicht einfach um Daten und Geräte ergänzt werden, sondern ist auf die erfassten Daten und Geräte des Realexperiments beschränkt.
Dennoch bieten IBEs zahlreiche Perspektiven für das Experimentieren. So nennen Neuhaus, Kirstein und Nordmeier (2009, S. 2 f.) die Möglichkeit, Praktikumsexperimente mit toxischen Präparaten an der Hochschule in Form von IBEs zu digitalisieren, um schwangeren und stillenden Frauen ein unterbrechungsfreies Studium bieten zu können. Weiterhin führen diese auf, dass die Studierenden die Praktikumsexperimente durch das IBE unbegrenzt wiederholen können. Hierdurch kann sowohl die Vor- als auch Nachbereitung der Experimente verbessert werden oder sogar neue Aufgabenstellungen außerhalb des Praktikumslabors bearbeitet werden (ebd.). Auch Kirstein, Fröhlich, Hoedt und Nordmeier (2010, S. 2) heben die durch das IBE gebotene Flexibilität hervor, wodurch auch außerhalb des Labors aktiv experimentiert werden kann und Laborgeräte und ihre Funktionen kennengelernt werden können. Zudem können Experimente, die aus praktischen Gründen im Kontext schulischen Unterrichts als nicht realisierbar eingestuft werden, durch IBEs für SuS nutzbar gemacht werden (ebd.).
Dennoch empfehlen Neuhaus et al. (2009, S. 2 f.), dass IBE nicht als Ersatz für Realexperimente zu betrachten, sondern als Ergänzung zu diesen einzusetzen, um zum einen die Vorteile für die Vor- und Nachbereitung zu nutzen, zum anderen das praktische Handeln im Labor nicht zu vernachlässigen. Im Falle von Experimenten, die aufgrund von chemischen oder physikalischen Gefahren von Schwangeren oder SuS gar nicht durchgeführt werden könnten, stellt das IBE auch für diese Gruppen einen Zugang und erweitert folglich das Repertoire an Experimenten, dass diese durchführen können, bzw. dürfen.

2.2.3 Remotely Controlled Labs

remotely controlled lab (RCL) sind „reale Experimente, die von einem Standort außerhalb des Labors kontrolliert werden“ (Jeschke et al., 2005, o.S.). Um dies zu ermöglichen, muss zum einen ein reales Experiment existieren, dass zum anderen durch digitale Technologie ferngesteuert werden kann (ebd.).

Wie in Abbildung 2.3 gezeigt wird, kann bei einem RCL ein Benutzer über seinen internetfä-

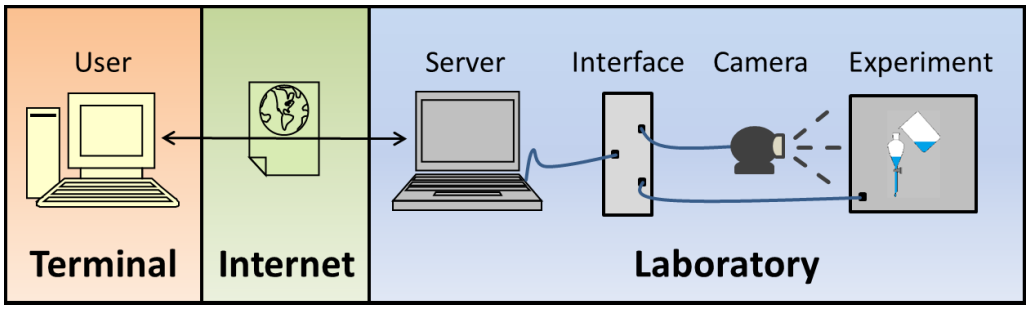


Abbildung 2.3: Darstellung der Funktionsweise eines RCL (MEET-CINCH, 2017-2018, S. 15)

higen Rechner auf das Interface des Labors zugreifen. Mit diesem Interface kann das Experiment gesteuert werden. Gleichzeitig sendet eine Webcam Livebilder des Experiments an das Interface, welches diese an den Benutzer weiterleitet. Somit kann der Benutzer das Experiment selbstständig steuern, sich dabei gleichzeitig beobachten und gegebenenfalls Messwerte einer realen Messung aus einem entfernten Labor erhalten (Altherr, Vetter, Eckert & Jodl, 2005, S. 1).

In Abbildung 3.1 ist die Benutzeroberfläche eines RCLs dargestellt. Dort ist sowohl das Bild der Webcam zu sehen, als auch die Bedienoberfläche, bestehend aus mehreren Registrierkarten, in denen verschiedene Funktionen angeklickt werden können. Auf das dargestellte RCL wird in Abschnitt 3.2 genauer eingegangen. Im Gegensatz zum IBE interagiert der Benutzer nicht direkt mit den Gegenständen im Labor, sondern diese werden üblicherweise über einen fernsteuerbaren Roboter manipuliert. Das Interface wird für gewöhnlich mit Labview programmiert (Jeschke et al., 2005, o.S.).

Das RCL kann für verschiedene Anwendungen genutzt werden. Zum einen kann dieses ein Selbststudium ermöglichen, indem es den Studierenden oder auch SuS unabhängig vom Labor macht (Altherr et al., 2005, S. 2). Zum anderen können auch Laien ein sonst eher unzugängliches Thema praktisch vertiefen oder Studenten aus ökonomisch schwachen Ländern Experimente, die an dortigen Hochschulen nicht verfügbar sind, durch das RCL durchführen (ebd.).

Dennoch sollten RCLs auch kritisch betrachtet werden. Erstens kann nur schwer festgestellt werden, ob der Benutzer das RCL wirklich zum Lernen, bzw. Forschen benutzt, oder lediglich damit "spielt". Zweitens erfordert ein RCL einen großen Aufwand, sowohl bezogen auf den Aufbau als auch auf die Instandhaltung sowie finanziell (ebd.). Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass ein RCL ausschließlich von einem Nutzer gleichzeitig bedient werden kann, sodass bei größeren Lerngruppe der Rest nur eine Beobachterfunktion einnehmen kann (Kirstein et al., 2016, S. 2).

Daher sollte die Entwicklung eines RCL erst nach Abwägung folgender Bedingungen erfolgen (Thoms & Girwidz, 2012, S. 113, zitiert nach (M. Berger, 2018, S. 98 f.)):

- Der Aufbau des Experiments ist besonders schwierig, langwierig oder teuer.
- Die Durchführung birgt besondere Gefahren oder erfordert besondere Hilfestellungen.
- Die Anzahl veränderlicher Parameter übersteigt die mögliche Komplexität von IBEs.

Abschließend kann festgehalten werden, dass RCLs zwar auf reale Experimente live zugreifen, dabei allerdings im Gegensatz zum IBE keine direkte Manipulation der Objekte möglich ist, sondern nur indirekt über eine Steuerung. Außerdem ist keine simultane Nutzung mehrerer Personen möglich.

2.2.4 Interaktive Videos

Eine weitere Möglichkeit des digitalen Experiments ist das (interaktive) Video (Kirstein et al., 2016, S. 1). So kann im Video ein Demonstrationsexperiment inklusive Vorbereitung, Durchführung, Beobachtung und den Ergebnissen dargestellt werden (ebd.). Dabei beschränkt sich das Video als digitales Experiment nicht nur auf das passive Anschauen, sondern durch interaktive Formate kann auch die aktive Einbindung von SuS gewährleistet werden. So können Nutzer im "Interactive Video" durch numerische Eingaben Parameter definieren, die das entsprechende Video vom gewählten Experimentzustand abspielen lassen (ebd., S. 2). Bei einem nicht-linearen Video kann der Nutzer innerhalb des Videos navigieren und zusätzliche Inhalte aufrufen, wie beispielsweise Bilder, Texte und Animationen (ebd.).
Kircher et al. (2015, S. 224) schreiben dem Video aus didaktischer Sicht im Allgemeinen eine hohe Anschaulichkeit durch die Kombination aus auditiver und visueller Informationen zu. Hierdurch ließen sich Inhalte präziser darstellen als durch rein verbale Beschreibungen. Dies stellt zwar keinen Vorzug zum Realexperiment dar, aber für Experimente, die aus Zeitgründen oder aufgrund von Gefahren nicht im Unterricht durchgeführt werden können, stellt das Video eine bessere Alternative gegenüber einem beschreibenden Text dar (ebd.). Weiterhin bieten Videos den Vorteil, dass die Informationsdichte durch Zeitlupen, Standbilder, Zoom oder das Einblenden von Zusatzinformationen variiert werden kann und somit zu besseren Beobachtung oder zum Verständnis beitragen können (ebd., S. 225 f.).
In der folgenden Tabelle 2.1 sollen die bisher beschriebenen Eigenschaften der vorgestellten Arten digitaler Experimente zusammenfassend dargestellt werden[9]. Dies dient der Veranschaulichung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden, die besonders in Bezug auf den folgenden Abschnitt, in dem Vor- und Nachteile digitaler Experimente gegenüber dem Realexperiment dargestellt werden sollen, von Bedeutung sind.

[9] Die Tabelle ist angelehnt an die Darstellung der FU Berlin, abrufbar unter https://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/ibe/beschreibung/index.html

Tabelle 2.1: Eigenschaften digitaler Experimente

Eigenschaften	Simulationen/VL	IBE	RCL	IV
Art der Sachbegegnung				
Reale Abbilder	nein	ja	ja	ja
Virtuelle Abbilder	ja	nein	nein	nein
Herkunft der Daten				
Reale Daten	nein	ja	ja	ja
Mathematisch modelliert	ja	nein	nein	nein
Interaktionsmöglichkeiten				
Direkt	ja	ja	nein	nein
Indirekt	nein	nein	ja	(ja)

2.3 Vor- und Nachteile digitaler Experimente zum Realexperiment

Bisher wurde die Bedeutung des Experiments für den Physikunterricht sowie verschiedene Arten digitaler Experimente beschrieben. Im Folgenden sollen die Vor- und Nachteile digitaler Experimente auf der Basis dieser Beschreibungen diskutiert werden. Dabei soll zuerst auf die möglichen Beiträge des Experiments zum Physikunterricht eingegangen werden, die im Abschnitt 2.1 aufgezeigt wurden. Außerdem soll auf die Möglichkeiten zur Schülerzentrierung durch digitale Experimente eingegangen werden. In diesem Zusammenhang werden zusätzlich die motivationalen Auswirkungen dieser thematisiert.

Über die Umsetzbarkeit der verschiedenen Beiträge von Experimenten zum Physikunterricht existieren keine empirischen Daten. Daher werden folgend nur Vermutungen auf Basis der Eigenschaften digitaler Experimente angestellt.
Zuerst werden die Beiträge betrachtet, zu denen digitale und reale Experimente keinen offensichtlichen Unterschied aufweisen. Hierzu zählen die Oberkategorien *Vermittlung von Fachwissen, Begriffswechsel, Kommunizieren über Physik* und das *Lernen über die Natur der Naturwissenschaften*. Wobei darüber diskutiert werden kann, ob eine digitale Repräsentation eines Experiments "überzeugend" ist (1). Hier bestehen sicherlich Unterschiede zwischen Experimenten, die auf realen Versuchen basieren und solchen, die virtuellen Ursprungs sind (siehe 2.1).
Deutliche Unterschiede bestehen dagegen beim *Naturwissenschaftlichem Arbeiten*. Die Entwicklung von Fragestellungen und Hypothesen (6) wird zwar weniger durch die Art des Experiments beeinflusst, dagegen wirken sich digitale Experimente deutlich auf die Durchführung (7) aus. In digitalen Experimenten kann die aktive Handhabung von Geräten nicht umgesetzt werden. Das IBE und virtuelle Labor lassen zumindest eine direkte Manipulation der Geräte am Bildschirm zu, dennoch kann dies die Kompetenz der Versuchsdurchführung nicht ausrei-

chend ausbilden (Neuhaus et al., 2009, S. 1). Weiterhin ist beispielsweise bei einem IBE der Versuchsaufbau vorgegeben, wodurch auch der Aufbau eines Experiments nach Anleitung oder eigenen Ideen nicht geübt werden kann (Kirstein et al., 2016, S. 2). Diese Inhalte überschneiden sich mit dem *Erwerb experimenteller Fähigkeiten* (10). Daher sind speziell in Bezug auf das naturwissenschaftliche Arbeiten signifikante Einschränkungen bei jeder Art digitaler Experimente zu sehen. Dies betrifft jedoch nicht alle Aspekte. Das *Auswerten von Daten* (8) ist durch die digitale Umsetzung eines Experiments nicht betroffen. Besonders das IBE und das RCL bieten dabei reale Messergebnisse, wobei die des letzteren sogar live aufgenommen werden.

In Bezug auf das Unterrichtsziel *Interesse* anregen bieten digitale Experimente eindeutige Vorteile gegenüber Realexperimenten. Betrachtet man den Aspekt der Alltagsbezüge (14) besteht der Vorteil des digitalen Experiments aus zwei Komponenten. Zum einen wird der mangelnde Bezug zu den Interessen und Fähigkeiten (Tesch, 2005, S. 46 f.) der SuS aufgehoben, da das Experimentieren mit Medien wie Tablet und Smartphone motivierend wirkt (Hillmayr, Reinhold, Ziernwald & Reiss, 2017, S. 12). Zum anderen lässt sich durch digitale Experimente die Funktionsweise verschiedener Alltagsgegenstände darstellen, die ansonsten aus praktischen Gründen nicht darstellbar sind. Die FU Berlin hat beispielsweise IBEs erstellt, mit denen Ampeln geschaltet werden können, Spiegelreflexkameras untersucht oder ein Planetarium gesteuert werden kann. Weiterhin können durch Virtuelle Labore, IBEs oder RCLs *Forschungsexperimente veranschaulicht* (15) werden, die aus finanziellen, sicherheitstechnischen oder räumlichen Gründen sonst keinen Einzug in die Schule erhalten (M. Berger, 2018, S. 23). Gleiches gilt für den Aspekt des *Aufmerksamkeitserregens, zum Staunen bringen, unterhalten* (16). Durch die digitale Umsetzung von Experimenten lässt sich das Repertoire an möglichen Experimenten für Lehrkräfte erheblich erweitern.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass digitale Experimente definitiv Nachteile in Bezug auf das Erlernen des naturwissenschaftlichen Arbeitens aufweisen, dagegen ein besonderes Potential zeigen, das Interesse anzuregen.

Digitale Experimente ermöglichen jedoch nicht nur die allgemeine Umsetzung von Versuchen, die in der realen Durchführung nicht umsetzbar sind, sondern auch die schülerzentrierte Durchführung von Experimenten, die bisher auch aufgrund von Gefahren nicht erlaubt waren. Die Bedeutung der Schülerzentrierung sollte dabei nicht unterschätzt werden. So können digitale Experimente Motivationsfaktoren begünstigen und in der Folge die Motivation fördern Petko (2014, S. 114 f).

Bei der Betrachtung des Lernens aus psychologischer Sicht spielt die Motivation eine besondere Rolle. Als Motivation bezeichnet „man die Bereitschaft einer Person, sich intensiv und anhaltend mit einem Gegenstand auseinanderzusetzen“ (Hasselhorn & Gold, 2009, S. 103). Dabei ist nach der Selbstbestimmungstheorie von Deci und Ryan (1985) die intrinsische Motivation von besonderer Bedeutung, da diese auf dem angeborenen Bedürfnis nach Kompetenz basiert. Voraussetzungen hierfür sind autonomes Handeln, das Erleben eigener Kompetenz

sowie soziale Eingebundenheit (Gebhard, Höttecke & Rehm, 2017, S. 127). SuS seien daher grundlegend motiviert, da sie am eigenen kompetenten Handeln interessiert sind. Aus diesem Grund sei es wichtig, diese Motivation nicht durch den Entzug der Kontrolle über das Tun zu zerstören (ebd., S. 130).
In diesem Zusammenhang scheinen digitale Experimente, aufgrund ihrer schülerzentrierten Umsetzungsmöglichkeit, einen enormen Wert aufzuweisen. Das selbstbestimmte Experimentieren kann sich positiv auf die Motivation auswirken. Die Motivation der Lernenden übt dabei einen erheblichen Einfluss auf den Lernerfolg aus. In der Hattie-Studie wurde eine deutliche Effektstärke (d=0,48) der Motivation auf diesen nachgewiesen (Lotz & Lipowsky, o. J., S. 103). Auch andere Studien (M. Berger, 2018, S. 52) belegen, dass sich das Schülerexperiment per se mit kleiner bis mittlerer Effektstärke auf den Wissenszuwachs auswirkt. Zudem haben Leal, Leal und Fernandes (2015, S. 1 ff., zitiert nach Berger, 2018, S. 99) belegen können, dass sich Onlinelabore ebenso wie reale positiv auf die Interessenslage und Motivation auswirken. Um digitale Medien im Allgemeinen sinnvoll in den Unterricht einzubetten, haben Hillmayr et al. (2017, S. 26) als Resultat einer Auswertung verschiedener Studien einige Empfehlungen formuliert. Zum einen sei der Einsatz digitaler Medien ergänzend zu traditionellen Unterrichtsmethoden vorteilhaft für die Leistung und Motivation. Dies deckt sich mit Aussagen wie denen von Neuhaus et al. (2009), dass digitale Experimente ergänzend zu realen eingesetzt werden sollten. Weiterhin gelte für digitale Medien ebenso wie für Experimente (siehe 2.1), dass diese sinnvoll anhand der individuellen Voraussetzungen der Nutzer in die Lehre eingebettet werden müssen, damit diese lernwirksam sind (Hillmayr et al., 2017, S. 27).

> *„[...] mit einem sinnvollen und durchdachten Computereinsatz im Physikunterricht sollte sich das Spektrum inhaltlicher und didaktisch-methodischer Aspekte des Experiments beträchtlich erweitern können“* (V. Berger, 2006, S. 149).

Aufgrund der Diskussion der Vor- und Nachteile digitaler Experimente kann die Aussage von Berger definitiv bestätigt werden. Dabei sollte stets Berücksichtigt werden, dass digitale Experimente das Realexperiment nicht ersetzen sollten und auch nicht vollständig können. Dennoch bieten digitale Experimente auch Perspektiven durch die Möglichkeit, Experimente ohne deren Gefahrenpotential und Kostenaufwand durchführen zu können. Dies gilt vor allem im schulischen Kontext, kann aber auch Möglichkeiten für die Hochschulbildung eröffnen, beispielsweise im Kontext schwangerer oder stillender Frauen in naturwissenschaftlichen Studiengängen.

Nachdem digitale Experimente in diesem Kapitel behandelt wurden, wird sich das nächste Kapitel dem Versuch widmen, welcher im Rahmen dieser Arbeit digitalisiert werden soll.

3 Gammaspektrometrie als remotely controlled lab

Die Gammaspektrometrie ermöglicht die Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt (Arnold et al., 2018). Hierbei können gleichzeitig die Radionuklide einer Probe identifiziert und deren Aktivität bestimmt werden, dies zumeist ohne aufwendige Aufbereitung der Probe (ebd.). Daher nimmt dieses Messverfahren eine wesentliche Rolle in der Radioanalytik ein. Daher wurde im Rahmen des Projekts CINCH II ein RCL zur besseren Erreichbarkeit eines solchen Experiments entwickelt, dass aufgrund des hohen Kostenfaktors nur an wenigen Standorten zur Verfügung steht (MEET-CINCH, 2017-2018, S. 14 f.).
Das folgende Kapitel stellt zum einen das Projekt MEET-CINCH[1] vor, in dessen Rahmen das remotely controlled lab *GammaLab* entstanden ist, welches im Anschluss beschrieben wird. Weiterhin werden Grundlegende Aspekte zur Auswertung einer gammaspektrometrischen Messung erläutert.

3.1 Das Projekt MEET-CINCH

MEET-CINCH ist ein länderübergreifendes europäisches Projekt, finanziert durch das Forschungs- und Entwicklungsprogramm der Euratom (MEET-CINCH, 2017-2018, S. 1)[2]. Das Ziel des Projektes ist die Umsetzung eines Ausbildungs- und Trainingskonzeptes zu Inhalten der Nuklear- und Radiochemie. Das MEET-CINCH Projekt ist der Nachfolger der Projekte CINCH I und CINCH II, die von 2010-2016 liefen.
Die Projekte CINCH I & II hatten die Verbesserung der Ausbildung von Master- und Doktoranden sowie dem Mangel an Fachkräften im Bereich der Nuklearchemie entgegenzuwirken. Das Institut für Radioökolgie und Strahlenschutz (IRS) der Leibniz Universität Hannover (LUH) hat im Rahmen des CINCH II-Projekts drei RCLs entwickelt, sogenannte RoboLabs. Diese sollen verschiedene Inhalte der Nuklear- und Radiochemie repräsentieren. Folgende RoboLabs

[1] MEET-CINCH ist der Nachfolger des CINCH II-Projekts und die Ausführungen beinhalten die vorherigen Projekte.
[2] Der gesamte Abschnitt 3.1 stellt eine Zusammenfassung der Ausführungen von MEET-CINCH (2017-2018) dar.

wurden entwickelt:

- **GammaLab** - ermöglicht die gammaspektrometrische Messung und Auswertung verschiedener Proben.
- **PAULA** - veranschaulicht das Prinzip der Autodeposition.
- **IonLab** - ermöglicht die Durchführung einer Ionenchromatographie von Y-90/Sr-90.

Durch den Internetzugriff auf die Experimente, die nur in Verbindung mit einem hohen Kostenaufwand in radiochemischen Laboren betrieben werden können, erhalten auch Studierende Zugriff, die an Universitäten studieren, die nicht über solche Labore verfügen. Folglich sollen durch die RoboLabs die Möglichkeiten zur praktischen Ausbildung in diesem Bereich verbessern.
Nach der Schaffung dieser Lern- und Lehrangebote in den Projekten CINCH I & II soll in MEET-CINCH sichergestellt werden, dass diese besser zugänglich für die Zielgruppe werden. Dieses Ziel soll durch die Entwicklung von Massive Open Online Courses (MOOCs) und die Untersuchung der Anwendbarkeit innerhalb des Flipped Classroom Konzepts erreicht werden. Weiterhin sollen für die nukleare Forschung neue Interessenten geworben werden. Hierfür werden unter anderem Lehrangebote geschaffen, die sich speziell an SuS der Oberstufe richten.
Die "Konservierung" der RoboLabs über die Laufzeit des MEET-CINCH-Projekts hinaus in Form von IBEs ist ebenfalls Teil dessen, da die RoboLabs aufgrund ihres Wartungsaufwands wahrscheinlich nicht unbegrenzt lange betrieben werden können. Zusätzlich zur Konservierung bietet das IBE auch einen simultanen Zugriff mehrerer Nutzer (Kirstein et al., 2016, S. 2), wodurch die Flexibilität der Experimente erhöht werden soll.
Im weiteren Verlauf wird das GammaLab genauer betrachtet, da dies das Experiment ist, dass im Rahmen dieser Arbeit in ein IBE umgewandelt werden soll.

3.2 GammaLab

Das GammaLab besteht aus zwei Komponenten. Zum einen ist das der reale Aufbau des Experiments im Labor, zum anderen das Interface, das der Nutzer im seinem Browser nutzt um das Experiment fernsteuern zu können.
In Abbildung 3.1 ist ein Teil des GammaLab im Kontrollbereich des IRS abgebildet. Im folgenden sollen die einzelnen Komponenten beschrieben werden, aus denen dieses besteht. Mit der (1) ist der Probenwechsler gekennzeichnet. Dieser fährt horizontal auf einer Metallschiene, sodass er sich mit seinem Greifarm über dem Detektor (3) und den Proben (2) platzieren kann. Für die Positionsbestimmung ist der Probenwechsler mit einem Farbsensor ausgestattet. Der Greifarm kann sich nur in vertikaler Richtung bewegen und besitzt am Ende einen

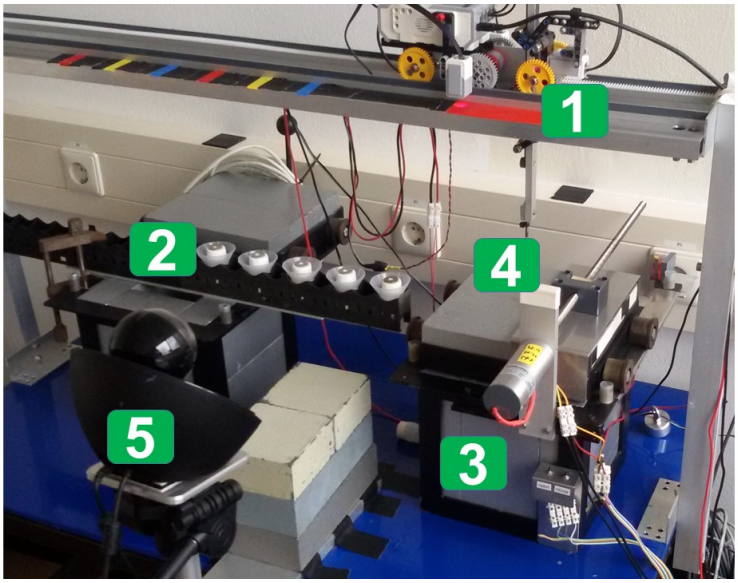


Abbildung 3.1: Aufbau des GammaLab im IRS

Elektromagneten, mit denen die sechs verschiedenen Proben angehoben und durch Abschaltung des Elektromagneten wieder abgesetzt werden können. Die Proben befinden sich in fest verschlossenen Plastikbehältern, auf dessen Deckel Unterlegscheiben geklebt wurden, damit der Greifarm diese anheben kann. Der Detektor verfügt über einen 360° Bleischild, wobei der Deckel (4) mit Hilfe eines Elektromotors auf- und zugefahren werden kann, um den Detektor mit einer Probe zu bestücken. Die Videoübertragung findet über eine Webcam (5) statt. Die weiteren Komponenten sind in der Abbildung 3.1 nicht zu erkennen. Hierzu zählen ein Stickstofftank zur Kühlung des Detektorkristalls, die Systeme zur Datenverarbeitung des Detektors sowie der Computer für den Datentransfer.
Die sechs Proben enthalten verschiedene radioaktive Stoffe, die im Folgen aufgeführt werden:

- **Probe 1** ist ein Kalibrierstandard, der 15,64 ml QCY-48-Lösung enthält.
- **Probe 2** enthält Boden aus der Nähe des verunglückten Daiichi Kernreaktors in Fukushima.
- **Probe 3** enthält Boden aus Tschernobyl.
- **Probe 4** enthält thoriumhaltigen Monazitsand.
- **Probe 5** enthält einen abgereicherten Uranpellet.
- **Probe 6** enthält eine Probe aus einem Ringversuch der IAEA..

Das Interface, durch dass das GammaLab aus der Ferne gesteuert werden kann, besteht im Wesentlichen aus zwei Oberflächen, zwischen denen hin und her gewechselt werden kann.
Die erste Oberfläche ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Auf diese gelangt der Benutzer nach der Anmeldung. Hier kann der Benutzer vor allem den Probenwechsler steuern. Zentral auf dem

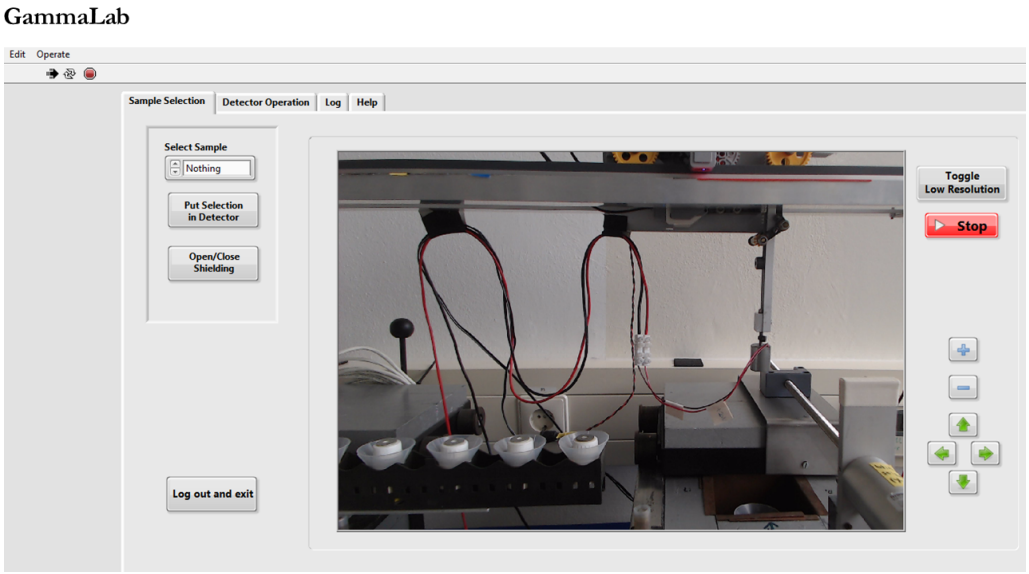


Abbildung 3.2: Benutzeroberfläche des GammaLab - Probenwechsel

Interface ist das Livebild der Webcam zu sehen. Auf der linken Seite der Benutzeroberfläche kann über ein Dropdown-Menü zwischen den Proben eins bis sechs gewählt werden. Nachdem eine Probe ausgewählt wurde, kann diese über den Button *Put Selection in Detector* in den Detektor gefahren werden. Befindet sich bereits eine Probe im Detektor, wird diese zuerst herausgefahren und im Anschluss die gewählte Probe in den Detektor gefahren. Durch drücken des Knopfes *Open/Close Shielding* wird der Detektordeckel auf- oder zugefahren, in Abhängigkeit von seiner aktuellen Position. Weiterhin kann sich über *Log out and exit* wieder aus dem Programm ausgeloggt werden. Auf der rechten Seite des Webcambilds kann die Auflösung des übertragenen Bildes reduziert werden, falls die Internetverbindung zu gering für die hohe Auflösung ist. Weiterhin kann die Webcam ein- und ausgeschaltet werden. Die Steuerung der Webcam über die Pfeil- und Zoomtasten wurde nicht programmiert.

Die zweite Oberfläche, in Abbildung 3.3 zu sehen, bedient den Detektor. Hier kann unter dem Punkt *Measurement Time [s]* die Messdauer eingestellt werden. Startet der Benutzer die Messung über *Start Measurement*, beginnt der Detektor die Aufzeichnung der Impulse. Im Spektrum werden diese stetig aktualisiert, sodass die Entstehung der Spektrums beobachtet werden kann. Auf der Abszisse werden dabei die 4096 Kanäle des Vielkanalanalysators abgebildet. Auf der Ordinate wird die Anzahl der Impulse dargestellt. Die Darstellung kann wie in der Abbildung linear erfolgen, über den Knopf *Toggle Logarithmic Scale* kann jedoch auch zu einer logarithmischen Ansicht gewechselt werden. Die Messung endet entweder nach der eingestellten Messdauer oder kann auch manuell über *Stop Measurement* beendet werden. Die aktuelle Messzeit wird unter *Current Lifetime [s]* angezeigt. Nachdem die Messung beendet ist, bzw. wurde, kann unter Eingabe einer Mailadresse das aufgezeichnete Spektrum über *Send Spectra* versendet werden. Dieses erhält der Benutzer als Textdatei im Anhang.

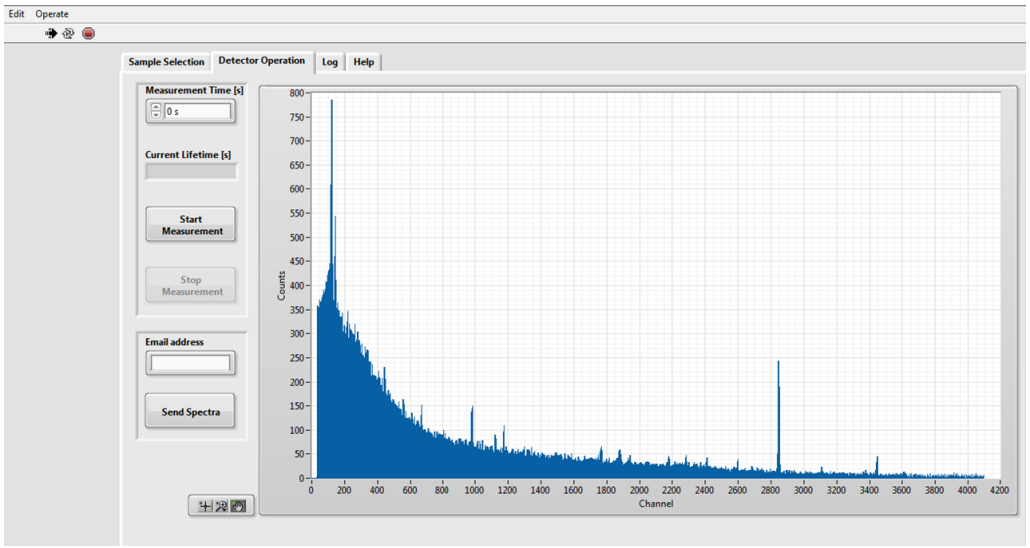


Abbildung 3.3: Benutzeroberfläche des GammaLab - Messung

Das RCL GammaLab kann für verschiedene Zwecke verwendet werden. Zum einen kann hiermit die Gammaspektrometrie veranschaulicht werden. Zum anderen können die Proben zur Identifikation von Radionukliden in einem Spektrum dienen. Weiterhin kann durch die Variation an Proben eine Bestimmung der Herkunft verlangt werden. Nicht zuletzt kann die Auswertung von Spektren zur Bestimmung von Aktivitäten oder charakteristischen Grenzen genutzt werden. Der folgende Abschnitt beschreibt daher die Methoden zur Auswertung von gammaspektrometrischen Messungen.

3.3 Gammaspektrometrie mit dem GammaLab

Das GammaLab verfügt über einen Germaniumdetektor (Icker, 2013, S. 17), der zu den Halbleiterdetektoren gehört. Halbleiterdetektoren bestehen aus einem Einkristall mit einer ladungsträgerarmen Zone, die durch das anlegen einer Hochspannung in Sperrrichtung entsteht (Büker, 1971, S. 38). Tritt ionisierende Strahlung, wie Gammaquanten, in den Detektorkristall ein, erzeugt diese Elektron-Defektelektron-Paare, deren Anzahl in Abhängigkeit zu der Energie der ionisierenden Strahlung steht (ebd.). Infolge der angelegten Betriebsspannung an den Detektorkristall werden die entstandenen Ladungsträgerpaare getrennt und erzeugen einen Ladungsimpuls, dessen Höhe wiederum proportional zur Energie der detektierten Strahlung ist (ebd.).
Um das Spektrum eines Halbleiterdetektors verstehen zu können, ist es notwendig, die Wechselwirkungen von Photonen mit Materie zu kennen. Hierzu existieren bereits Ausführungen, weswegen an dieser Stelle auf bestehende Arbeiten wie von Hentel (2017, S. 17-20) ver-

wiesen wird, die die Inhalte der Literatur wie von Knoll (2010, S. 47-51) zusammenfassend darstellen.
Die Spektren, die mit dem GammaLab aufgezeichnet werden, weisen zwei Besonderheiten auf. Zum einen lässt sich der Detektor nicht Energiekalibrieren, wodurch die Zuordnung von Kanälen zu Emissionsenergien für jedes Spektrum nachträglich erfolgen muss. Auf diesen Aspekt wird in 3.3.3 genauer eingegangen. Zum anderen werden die Spektren nur als Text-Datei ausgegeben. Hierdurch muss die Auswertung vollständig manuell erfolgen. Dies ist deutlich aufwendiger als die Arbeit mit einer Software wie GENIE2000, die bei der Auswertung von Spektren bereits die Nettozählrate bestimmt. Auf die manuelle Auswertung soll daher im folgenden Abschnitt eingegangen werden.

3.3.1 Auswertung nach DIN ISO 11929

Die DIN ISO 11929 ist eine deutsche Norm zur „Bestimmung der charakteristischen Grenzen [...] bei Messungen ionisierender Strahlung“ (Deutsches Institut für Normung, 2011, S. 1). Diese basiert unverändert auf der internationalen Norm ISO 11929 und liefert einen wissenschaftlichen Standard zur Beurteilung von Messungen ionisierender Strahlung (Peters, 2012, S. 19 f.).
Folgend wird die Auswertung von Messungen nach der DIN ISO 11929 zur Bestimmung der spezifischen Aktivität einer Probe sowie der Erkennungs- und Nachweisgrenze beschrieben[3].

Spezifische Aktivität

Der Messwert a_m der spezifischen Aktivität berechnet sich nach der DIN ISO 11929 (2011, S. 66 ff.) zu:

$$a_m = \frac{n_g - z_0}{tfm\epsilon p} = \frac{n_g - z_0}{t} \cdot \frac{1}{fm\epsilon p} = r_n \cdot w \tag{3.1}$$

$$\text{mit} \qquad w = \frac{1}{fm\epsilon p} \tag{3.2}$$

$$\text{und} \qquad u(w) = w \cdot u_{rel}(w). \tag{3.3}$$

Die relative Standardunsicherheit $u_{rel}(w)$ ergibt sich dabei wie folgt:

$$u_{rel}^2(w) = u_{rel}^2(f+)u_{rel}^2(m) + u_{rel}^2(\epsilon) + u_{rel}^2(p). \tag{3.4}$$

Dabei entspricht:

n_g der Anzahl an Bruttoimpulsen im Bereich B

[3] Die Berechnung entsprechen der DIN ISO 11929, dabei wurde sich aus Gründen der Übersichtlichkeit auch an den Berechnungen und Bezeichnungen von Peters (2012, S. 106 fff.) orientiert.

z_0	dem Schätzer des Nulleffekts
t	der Messzeit der Probe [s]
f	dem Korrektionsfaktor
m	der Probenmasse
ϵ	der Nachweiswahrscheinlichkeit
p	der Photonen-Emissionswahrscheinlichkeit des Radionuklids
r_n	der Nettozählrate
w	dem Kalibrierfaktor.

Der Bereich B, dem die Bruttoimpulse n_g entnommen werden, ergibt sich aus der Breite der Linie im Spektrum. Diese wird mithilfe der Halbwertsbreite h der Linie bestimmt. Bei ausgeprägten Linien berechnet sich die Breite t_g des Bereichs B zu:

$$t_g = 2,5h, \qquad \text{hier gilt: } f = 1. \tag{3.5}$$

Bei dominierendem Untergrund bestimmt sich die Breite t_g zu:

$$t_g = 1,2h, \qquad \text{hier gilt: } f = 0,84. \tag{3.6}$$

Der Korrektionsfaktor berücksichtigt in diesem Fall, dass der Bereich B nicht die gesamte Linienfläche abdeckt.
Der Schätzer des Nulleffekts z_0 ergibt sich aus den Impulszahlen n_1 und n_2 der Bereiche A$_1$ und A$_2$, die links und rechts im Spektrum an Bereich B anschließen. Diese Bereiche sollten möglichst groß gewählt werden, wobei der Verlauf des Untergrundes näherungsweise konstant , bzw. linear sein muss. Im Falle eines linearen Verlaufs müssen die Breiten t_1 und t_2 der Bereiche A$_1$ und A$_2$ gleich groß sein.

$$z_0 = c_0 n_0 \tag{3.7}$$

$$\text{mit} \qquad c_0 = \frac{t_g}{t_1 + t_2} = \frac{t_g}{t_0}$$

$$\text{und} \qquad n_0 = n_1 + n_2$$

$$\text{mit der Standardunsicherheit} \qquad u^2(z_0) = c_0^2 n_0 \tag{3.8}$$

Die Standardunsicherheit $u(a_m)$ des Messwerts a_m berechnet sich zu:

$$\begin{aligned} u^2(a_m) &= r_n^2 \cdot u^2(w) + u^2(r_n) \cdot w^2 \\ &= r_n^2 \cdot u^2(w) + w^2 \left(\frac{n_g + c_0^2 n_0}{t^2} \right), \end{aligned}$$

daraus ergibt sich:

$$u(a_m) = \sqrt{r_n^2 \cdot u^2(w) + w^2 \left(\frac{n_g c_0^2 n_0}{t^2} \right)}. \tag{3.9}$$

Charakteristische Grenzen

Die charakteristischen Grenzen dienen der Beantwortung folgender Fragen (Peters, 2012, S. 19 f.):

1. Leistet die Probe einen Beitrag zu den gemessenen Kernstrahlungsereignissen?
2. Wie groß ist der kleinste Beitrag der Probe, der mit dem angewendeten Messverfahren noch zuverlässig nachgewiesen werden kann?

Die Erkennungsgrenze beschreibt mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit α, dass ein physikalischer Effekt durch die Probe vorliegt, wenn der Messwert a_m oberhalb der Erkennungsgrenze a^* liegt. Somit beantwortet diese die erste Frage. Die Nachweisgrenze ist so festgelegt, dass eine falsche Entscheidung nur mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit β getroffen wird, wenn der Messwert a_m oberhalb der Nachweisgrenze $a^\#$ liegt. Die Nachweisgrenze dient folglich der Entscheidung, ob das angewendete Messverfahren zum messen der Probe geeignet ist und damit der Beantwortung der zweiten Frage.

Erkennungsgrenze

Die Erkennungsgrenze berechnet sich zu:

$$a_m^* = k_{1-\alpha} \cdot \sqrt{w^2 \cdot \left(\frac{z_0 + c_0^2 n_0}{t^2} \right)}. \tag{3.10}$$

Damit ein physikalischer Effekt der Probe vorliegt, muss $a_m > a_m^*$ sein.

Nachweisgrenze

Die Nachweisgrenze berechnet sich zu:

$$a_m^\# = a_m^* + k_{1-\beta} \tilde{u}(a_m^\#). \tag{3.11}$$

Gleichung 3.11 ist eine implizite Gleichung, da die rechte Seite selbst von $a_m^\#$ abhängt. Daher muss diese entweder nach $a_m^\#$ aufgelöst oder iterativ berechnet werden.
Wird jedoch $k = k_{1-\alpha} = k_{1-\beta}$ gesetzt, kann die Nachweisgrenze zu

$$a_m^\# = \frac{2 \cdot a_m^* + k^2 \frac{w}{t_g}}{1 - k^2 u_{rel}^2(w)} \tag{3.12}$$

berechnet werden.

Für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = \beta = 0,05 = 5\%$ erhält man für $k = 1,645$.

3.3.2 Messunsicherheiten

Die Unsicherheit einer Messung stellt die Lücke zur exakten Bestimmung eines Wertes dar (JCGM, 2008, S. 5). Selbst nach Berücksichtigung der Unsicherheit stellt die Messung lediglich eine Schätzung des wahren Wertes dar (ebd.). In der Folge zeigt sich jedoch durch die Größe des Intervalls, das durch die Messunsicherheit um den Messwert entsteht, wie genau ein Messwert bestimmt werden kann. Daher ist es von Bedeutung zu wissen, woraus die Unsicherheit resultiert. Das JCGM (2008) unterscheidet dabei Typ A und Typ B Unsicherheiten.
Weist ein Messwert eine **Typ A-Unsicherheit** auf, so kann diese durch eine statistische Analyse der Messung/-en berechnet werden (Scholz, 2014, S. 6). Typ A- Unsicherheiten liegt eine zufällige Streuung zugrunde, sodass die Messabweichungen nicht einseitig gerichtet sind. Für die Abschätzung werden daher stochastische Verfahren angewandt (ebd.). Bei gammaspektrometrischen Messungen wird nur eine Messung aufgenommen, weshalb die Bestimmung eines Mittelwertes und der Standardabweichung hier keine Möglichkeit bietet. Unter der Annahme, dass die Ereignisse der Messung i voneinander unabhängig sind und daher eine Poissonverteilung vorliegt, kann die Standardunsicherheit der Anzahl an Ereignissen x_i zu

$$u(x_i) = \sqrt{x_i} \tag{3.13}$$

bestimmt werden (Peters, 2012, S. 14). Die Standardunsicherheit $u(r_i)$ der Zählrate berechnet sich zu

$$u(r_i) = \sqrt{\frac{x_i}{t_i^2}} \qquad \text{(ebd.).} \tag{3.14}$$

Bei einem Ergebnis von $x_i = 0$ würde die Standardunsicherheit $u(x_i) = 0$ betragen. Dies ist nicht korrekt, da die folgende Messung nicht mit Sicherheit ebenfalls kein Ereignis feststellt. Daher empfiehlt sich in einem solchen Fall das Ersetzen aller x_i durch $x_i + 1$ (ebd.).
Typ B-Unsicherheiten lassen sich nicht stochastisch ermitteln. Hierzu gehören reproduzierbare Abweichungen, für deren Korrektur kein generelles Verfahren beschrieben wird (Scholz, 2014, S. 6). Daher werden für die Abschätzung dieser Unsicherheiten Informationen aus Quellen herangezogen. Diese können auf früheren Daten und Erfahrungen basieren (Peters, 2012, S. 15).
Zu den **Typ B-Unsicherheiten** zählen beispielsweise Anzeigefehler, Ablesefehler, systematische Fehler bedingt durch den Versuchsaufbau oder Fehler, die durch die digitale Anzeige

begrenzt sind (Scholz, 2014, S. 6 f.). Falls vom Hersteller keine weiteren Angaben zur Genauigkeit digitaler Messgeräte existieren, kann der Mindestfehler von $a = \pm 1\ dgt$[4] angenommen werden (ebd.). Insgesamt müssen systematische Fehler individuell bestimmt werden. Die nachfolgende Tabelle stellt dar, wie die Standardunsicherheiten für die Berechnungen der spezifischen Aktivität ermittelt werden und ggf. die Größe der Fehler.

Tabelle 3.2: Standardunsicherheit verschiedener Messgrößen

Symbol	Quelle	$\mathbf{u(x_i)}$	Einheit
n_i	DIN ISO 11929	$\sqrt{n_i}$	1
z_0	DIN ISO 11929	$c_0^2 n_0$	1
t	DIN ISO 11929	vernachlässigbar	s
f	DIN ISO 11929	vernachlässigbar	1
m	Herstellerangaben der Waage	mind. $\pm 1dgt$	kg
ϵ	Vahlbruch (2004, S. 53 f.) Tawussi (2012, S. 44)	$u(\epsilon_{E_\gamma<100keV}) = 10\%$ $u(\epsilon_{100keV<E_\gamma<150keV}) = 7\%$ $u(\epsilon_{150keV<E_\gamma}) = 5\%$	1
p	Schötzig und Schrader (1993)		1
r_n	DIN ISO 11929	$u(r_n) = \sqrt{\frac{n_g}{t^2}}$	s^{-1}

3.3.3 Kalibrierung

Das Spektrum, dass durch die Messung einer Probe auf dem GammaLab entsteht, stellt lediglich eine Anzahl an Impulsen verteilt auf verschiedene Kanäle, in diesem Fall 4096 an der Zahl, dar. Damit ein solches Spektrum in Bezug auf die spezifische Aktivität verschiedene Radionuklide, die sich anhand ihrer Emissionsenergien unterscheiden, analysiert werden kann, muss eine Kalibrierung des Detektors stattfinden (Gilmore, 2008, S. 143). Dabei sind an dieser Stelle zwei Kalibrierungen wesentlich (ebd.):

- **Die Energiekalibrierung** dient der Bildung eines Zusammenhangs zwischen der Emissionsenergie und den Kanälen des Detektors.
- **Die Efficiencykalibrierung** stellt einen Zusammenhang zwischen detektierten Impulsen und emittierten Photonen der Radionuklide her.

[4] dgt steht hier für digit, somit dem Digitalstellenfehler. Da die Rundung der letzten Stelle unbekannt ist, wird hier der maximal mögliche Digitalstellenfehler angenommen.

Folgend werden beide Kalibrierungen in Bezug auf das GammaLab beschrieben.

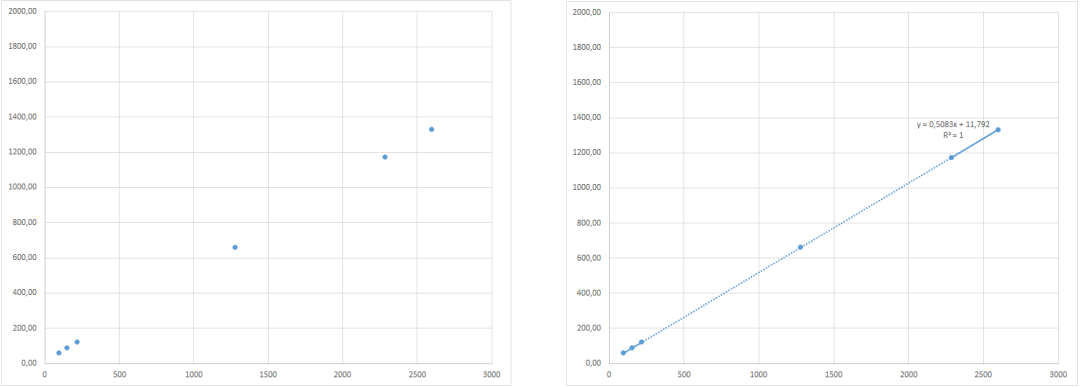
Energiekalibrierung

Die Energiekalibrierung dient der Zuordnung von Peaks im Kanalspektrum zu Emissionsenergien der Radionuklide der Probe (Gilmore, 2008, S. 144 f.). Hierfür wird vor der Messung der eigentlichen Proben eine Quelle gemessen, deren enthaltene Radionuklide inklusive ihrer Gammaenergien bekannt sind. Dabei kann ein einzelnes Radionuklid oder ein Multinuklidstandard gemessen werden, wichtig ist lediglich, dass die Energien zur Kalibrierung einen möglichst großen Bereich des Spektrum abdecken (ebd.). Anschließend können die Peaks den entsprechenden Emissionsenergien zugeordnet werden, wobei der Zusammenhang zwischen den Kanälen und Energien normalerweise linear erscheint, ohne das dies ein theoretisches Modell begründen würde (ebd.).
Die Energiekalibrierung des Germaniumdetektors, der im GammaLab verwendet wird, wurde mit der Multinuklidlösung QCY-48 durchgeführt. Aufgrund der Halbwertszeiten der Radionuklide und dem Alter des Standards konnte nur ein Teil der enthaltenen Radionuklide im Spektrum identifiziert werden. In der folgenden Tabelle sind die enthaltenen Radionuklide mitsamt ihrer Emissionsenergie sowie den Aktivitäten zum Zeitpunkt der Messung aufgelistet.

Tabelle 3.3: Multinuklidlösung QCY-48

Nuklid i	E_γ [kev]	a_i [Bq]
Am-241	59,54	428,9287922
Cd-109	88,03	1483,486795
Co-57	122,069	18,50673692
Ce-139	~~165,86~~	2,314380383
Hg-203	~~279,20~~	0,000712766
Sn-113	~~391,69~~	3,584062833
Sr-85	~~514,01~~	0,053318396
Cs-137	661,66	871,2081496
Yt-88	~~898,04~~	4,55444359
Co-60	1173,23	780,6058222
Co-60	1332,49	780,6058222
Yt-88	~~1836,06~~	4,55444359

In der Tabelle 3.3 sind die Emissionsenergien der Radionuklide, die aufgrund der geringen Aktivität nicht im Spektrum identifiziert werden konnten, durchgestrichen. Die Auswertung der Messung dieser Multinuklidlösung ermöglicht eine Zuordnung der nicht durchgestrichenen Gammaenergien zu einzelnen Kanälen des Detektors, wie in Abbildung 3.4 (a) dargestellt.



(a) Zuordnung der E_γ (Ordinate) zu den Kanälen (Abszisse)

(b) Lineare Interpolation der Werte

Abbildung 3.4: Energiekalibrierung des GammaLab-Detektors mit der Multinuklidlösung QCY-48

Die lineare Interpolation[5] der Werte, wie in Abbildung 3.4 (b) dargestellt, unterstreicht die lineare Abhängigkeit der Emissionsenergien Kanäle. Aufgrund des Wertes von $R^2 = 1$ wird auf eine alternative Interpolation durch ein Polynom zweiten Grades wie bei Tawussi (2012, S. 35) verzichtet.

Efficiencykalibrierung

Der Begriff *Efficiency* ist in der Literatur nicht eindeutig definiert (Gilmore, 2008, S. 150). Wenn in dieser Arbeit von Efficiency gesprochen wird, bezeichnet dies die **absolute full energy peak efficiency** (ebd.). Die Efficiency ϵ wird auch Nachweiswahrscheinlichkeit genannt und betrachtet das Verhältnis zwischen den von der Probe emittierten Photonen einer Energie und den detektierten Impulsen in dieser Energieregion des Spektrums. Daher berechnet sich die Efficiency wie folgt (ebd., S. 151):

$$\epsilon = \frac{a_{m_i}}{a_i \cdot p} \tag{3.15}$$

$$\text{mit} \qquad a_{m_i} = \frac{n_g - z_0}{t}. \tag{3.16}$$

Hierdurch lässt sich die Nachweiswahrscheinlichkeit für die Radionuklide einer Probe bestimmen, deren Aktivität bekannt ist. Da die Nachweiswahrscheinlichkeit von der jeweiligen Emissionsenergie abhängt (ebd., S. 150), kann diese nur für die Radionuklide der in diesem Fall Multinuklidlösung QCY-48 bestimmt werden. Liegen Efficiencies für Energien verteilt über das Spektrum vor, können diese Werte mit Hilfe der Jäckel-Westmeier-Funktion interpoliert wer-

[5] Die Fitfunktion zur Energiekalibrierung lautet $E_\gamma = 0,5083 \cdot x + 11,792$, wobei x für den Kanal steht.

den (Vahlbruch, 2004, S. 38). Die Interpolation der Efficiency für eine Messung der Multinuklidlösung QCY-48 ist in Abbildung 3.5 dargestellt.

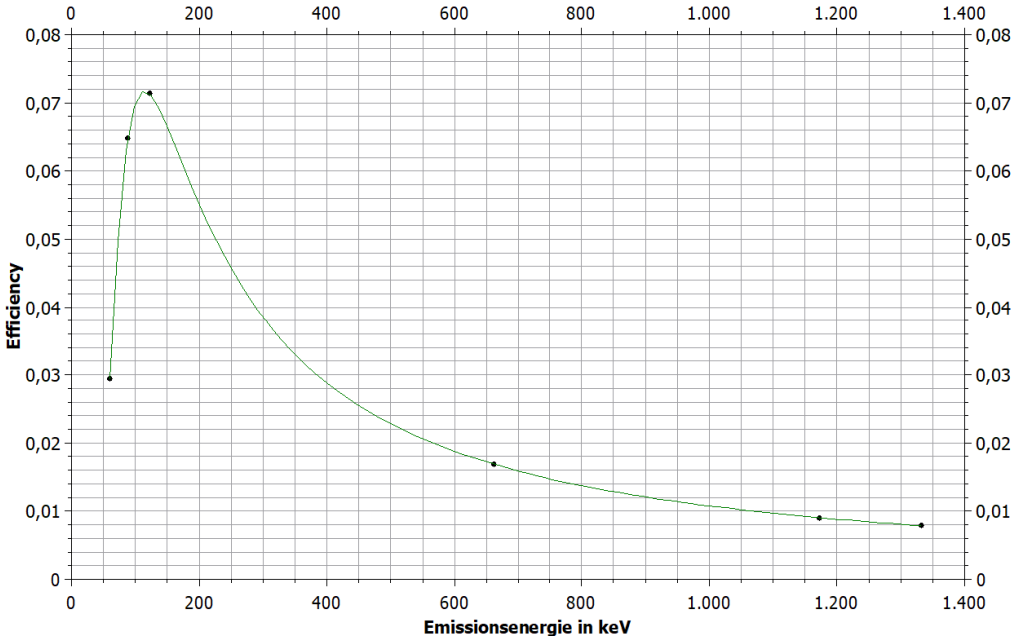


Abbildung 3.5: Interpolation der Efficiency mit der Jäckel-Westmeier-Funktion

Weiterhin wird die Nachweiswahrscheinlichkeit von der Geometrie der Probe und des Detektors beeinflusst. Da der Detektor unverändert bleibt muss bei der Messung von Proben lediglich beachtet werden, dass die Geometrie der zu messenden Probe mit der des Kalibrierstandards zur Efficiencyberechnung übereinstimmt.
Bisher wurde zum einen über digitale Experimente gesprochen, zum anderen über das RCL GammaLab sowie die Gammaspektrometrie und die Methoden zur Auswertung. Das folgende Kapitel thematisiert die praktische Erstellung von IBEs.

4 Erstellung des IBE

Die Erstellung interaktiver Bildschirmexperimente wird seit 1996 betrieben (Kirstein et al., 2016, S. 1) und hat sich seitdem fortwährend an die technologischen Entwicklungen angepasst. Dabei sind jedoch auch grundlegende Aspekte erhalten geblieben. Dieses Kapitel wird zuerst einen kurzen Überblick über die Erstellung von IBEs geben. Hierbei wird auch auf den aktuellen Stand der Technik in Form des von der FU Berlin entwickelten tet.folios eingegangen. Weiterhin wird ausführlich die Erstellung des IBEs zur Repräsentation des GammaLab beschrieben. Im Anschluss wird das erstellte IBE und die enthaltenen Funktionen mit dem GammaLab verglichen.

Kirstein et al. (2016, S. 2) betont, dass das IBE für die „Herstellung [...] umfassende medientechnologische wie informatische Kompetenzen [erfordert, F.H.]“. Erstere bezieht sich vor allem auf die Produktion des Materials, welches in der Postproduktion mit Hilfe der informatischen Kompetenzen zu dem IBE zusammengefügt wird. Da das IBE auf Fotostrecken basiert (ebd.), bezieht sich die medientechnische Kompetenz einerseits auf die Fotografie. Diese erfordert eine professionelle Beleuchtung und die Abschirmung von Tageslicht, da ansonsten unerwünschte Schwankungen der Lichtverhältnisse innerhalb der Fotostrecke auftreten (Neuhaus, 2010, S. 11 f.). Weiterhin ist die Positionierung der Kamera von Bedeutung, sodass alle Objekte dem Experiment entsprechend abgebildet werden (ebd.). Andererseits können auch Video- sowie Tonaufnahmen teil eines IBEs sein. Bei Videoaufnahmen spielt die Synchronität zur Weiterverarbeitung eine entscheidende Rolle (ebd., S. 13).

In der Postproduktion wird aus den Fotostrecken und gegebenenfalls dem Video- und Tonmaterial das Experiment digital rekonstruiert. Hierfür werden informatische Kenntnisse zur Bild- und Videoformatierung benötigt (ebd., S. 14). Zur visuellen Rekonstruktion des Experiments aus diesem Material wird Software verwendet. In den Anfängen des IBEs basierten diese auf Flash (Neuhaus et al., 2009, S. 3). Mittlerweile werden IBEs auf Basis von HTML 5, CSS und Javascript programmiert, da dies eine größere Flexibilität in der Nutzung ermöglicht (Kirstein et al., 2016, S. 3). IBEs sind hierdurch unabhängig vom Endgerät im Browser durchführbar. Durch die Software *tet.folio*, die im kommenden Abschnitt genauer beschrieben wird, besteht sogar die Möglichkeit, IBEs ohne jegliche Programmierkenntnisse zu erstellen (Haase, Kirstein & Nordmeier, 2016, S. 5). Allerdings muss sich der Schöpfer hier auf einfache Experimente beschränken. Für die Erstellung komplexer IBEs im tet.folio können zusätz-

lich komplexere Zusammenhänge mit Hilfe von Javascript definiert und implementiert werden (ebd., S. 6).
Grundsätzlich empfiehlt Neuhaus (2010, S. 7) eine ausführliche Planung **vor** der Produktion eines IBEs, da bereits geringe Änderungen der Anforderungen zu großem Aufwand bezogen auf das Material und die Programmierung führen können. Daher sollen folgende Punkte im Vorhinein geklärt werden (ebd.): *Versuchsaufbau, Bedienelemente, Anfangszustände, Verhalten des Experiments sowie Vergrößerung einzelner Details.* Da im Rahmen dieser Arbeit vor allem auf die Umsetzung des GammaLab eingegangen werden soll, wird die Erstellung von IBEs an dieser Stelle nicht ausführlicher beschrieben. Dieses Thema wird unter anderem in Voß (2019) und Neuhaus (2010) detaillierter dargestellt.
Folgend soll genauer auf die Plattform tet.folio eingegangen werden, wobei der Fokus auf den Funktionen dieser liegt, die mit der Erstellung von IBEs verknüpft sind.

4.1 tet.folio

Der Begriff tet.folio setzt sich aus dem Akronym *tet* - Technology Enhanced Textbook und dem Wortbestandteil *folio* des Begriffs Portfolio zusammen (Neuhaus, 2010, S. 1). Die Idee des tet.folios ist die Schaffung eines webbasierten Lehrbuchs, das stets durch Lehrende aber auch Lernende erweitert werden kann und dabei die Möglichkeiten der heutigen Technologien einbindet (ebd.). Durch die Nutzung von tet.folio über den Browser ist die Plattform endgerätunabhängig verwendbar.
Im tet.folio kann sich jeder anmelden und eigene digitale Bücher erstellen und durch beliebig viele Seiten erweitern. Dabei können Inhalte für alle Nutzer, Gruppen, Einzelne oder gar nicht freigegeben werden. Diese können Lese- und auch Schreibrechte erhalten.
Das tet.folio umfasst eine Vielzahl an Funktionen zum Erstellen und Bearbeiten von interaktiven multimedialen Inhalten (ebd., S. 2). Die Funktionen werden über sogenannte Werkzeuge ermöglicht, die in Abbildung A.1 dargestellt sind. Weiterhin können Inhalte wie Text-, Audio- und Videodateien per "drag & drop" zugefügt werden. Ein grundlegendes Werkzeug stellt hierbei die tet.box dar. Diese ermöglicht das Einfügen von Texten sowie die Gruppierung von Inhalten jeglicher Art. Dabei können diese Inhalte ebenfalls formatiert werden. Die Erstellung und Bearbeitung von Seiten im tet.folio basiert dabei auf HTML 5 und CSS 3 (ebd.). Weiterhin können Interaktionen zwischen den Elementen auf Basis von Javascript implementiert werden. Für die Erstellung von IBEs sind diese Funktionen relevant, zusätzlich bietet das Werkzeug ibe.maker verschiedene Möglichkeiten hierzu. Eine genauere Beschreibung der weiteren Werkzeuge ist in der Arbeit von Voß (2019) zu finden.
Folgend soll genauer auf das Werkzeug ibe.maker eingegangen werden, da das GammaLab entweder hiermit oder den bereits beschriebenen Werkzeugen als IBE umgesetzt wird.

4.1.1 ibe.maker

Der ibe.maker ermöglicht die Erstellung von einfachen IBE ohne Kenntnisse im Programmieren. Gleichzeitig können komplexe IBEs durch einen auf Javascript basierendem Code ergänzt werden (Neuhaus, 2010, S. 5 f.). Die Optionen, die ohne Javascript möglich sind, werden folgend dargestellt.

Wird auf einer leeren Seite des tet.folios der ibe.maker ausgewählt, öffnet sich eine blanke Seite mit einer neuen Werkzeugleiste zur Rechten, wie in Abbildung 4.1 dargestellt. Das erste Werkzeug *Beenden* dient zum einen zur Rückkehr aus dem ibe.maker in das tet.folio, zum anderen wird hierdurch das IBE gespeichert. Unter dem Werkzeug *Bilder* kann sowohl das Hintergrundbild hochgeladen werden als auch die zugehörigen Bildsequenzen der Bildzonen. Beziehen sich Bildzonen nur auf einen Teilausschnitt des Hintergrundbildes, erkennt tet.folio dies und schneidet aus dem Upload das entsprechende Segment aus. Wird die Option *IBE testen* gewählt, simuliert der ibe.maker das Beenden selbigen, um das IBE auf seine Funktionen zu testen, ohne dass dieser dafür verlassen werden muss.

Das Werkzeug *Bild Zone* fügt eine solche ein. Hierbei kann sowohl die Größe dieser manuell angepasst werden als auch die Bezeichnung und Anzahl der Bilder, die diese enthalten soll. Zudem kann das Startbild eingestellt werden. Die Bezeichung ist vor allem für die Einbindung in Javascript relevant.

Eine *Switch Zone* erstellt einen Schalter, der über einen beliebigen Bereich des IBEs gelegt werden kann. Dabei kann die Zahl der verschiedenen Zustände des Schalters variiert werden. Weiterhin kann auch der Schalter mit einem Namen versehen werden, um diesen in Javascript einzubinden. Außerdem kann der Schalter mit Bildzonen verknüpft werden, um eine Interaktion ohne Code zu ermöglichen.

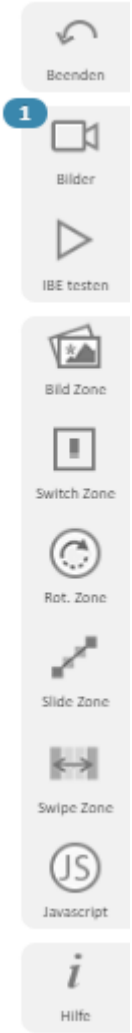


Abbildung 4.1: Werkzeuge des ibe.maker

Javascript ermöglicht das Schreiben eines Codes direkt innerhalb des ibe.maker. Hierdurch können komplexere Abfragen der Zustände der Schalter und Handlungsanweisungen für verschiedene Szenarien definiert werden. Dabei können gezielt Bilder der Bildzonen aufgerufen werden. Einschränkungen hat der ibe.maker in Bezug auf die Einbettung von Videos. Diese

können nicht im Rahmen von Bildzonen in das IBE integriert werden.
Die weiteren Werkzeuge des ibe.maker *Rot. Zone, Slide Zone* und *Swipe Zone* sind für die Digitaliserung des GammaLab nicht von Bedeutung und werden daher an dieser Stelle nicht näher beschrieben.
Wie die exakte Nutzung der verschiedenen Werkzeuge des ibe.maker funktioniert, ergibt sich im folgenden Abschnitt, da hier die Erstellung eines IBEs anhand des GammaLab gezeigt wird.

4.2 Vom GammaLab zum IBE

Im Rahmen dieser Arbeit soll das RCL GammaLab in Form eines IBEs digitalisiert werden. Dabei erfolgte die Umsetzung zuerst im ibe.maker, im Anschluss wurde das GammaLab zusätzlich ohne diesen als IBE entwickelt. Daher werden folgend beide Varianten zur Erstellung des IBEs vorgestellt und anschließend miteinander verglichen. Dabei wird vor allem der Arbeitsaufwand und Grad an Komplexität der beiden Möglichkeiten diskutiert.

4.2.1 Entwicklung mit ibe.maker

Das GammaLab inklusive der Funktionen wurde bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben. Für die Entwicklung eines IBEs auf Basis des GammaLab musste zuerst ein Layout gewählt und gegebenenfalls erstellt werden. Hierfür bietet sich als offensichtlichste Variante das Interface des GammaLab an. Dieses lässt sich allerdings nicht eins zu eins auf das IBE übertragen, weil unter anderem kein Dropdownmenü über den ibe.maker umgesetzt werden kann. Die Werkzeuge und das Javascript beschränken den ibe.maker in seinen Funktionen. Für die Implementierung eines Dropdownmenüs müssten zusätzlich HTML- und CSS-Elemente manuell in diesen integriert werden können. Außerdem enthält das Interface Elemente, wie die Pfeiltasten (siehe 3.2), die keine Funktion erfüllen. Auch der Wechsel zwischen den Oberflächen des GammaLab, sprich der Oberfläche zum Wechseln der Proben und der zum Einstellen der Messung, lässt sich nach Kenntnisstand dieser Arbeit über den ibe.maker nicht umsetzen. Daher wurde entschieden, ein eigenes Layout zu erstellen.
Abgesehen vom Design des IBEs muss dieses folgende Funktionen enthalten, um eine gammaspektrometrische Messung durchzuführen:

- Der Probenwechsler muss bedient werden, sodass die Proben in den Detektor und wieder heraus gefahren werden können.

- Das Shielding des Detektors muss auf und zugefahren werden können.
- Die Messzeit muss eingestellt werden können.
- Die Messung muss gestartet werden können.
- Der Nutzer muss ein Spektrum in Abhängigkeit der Parameter *Probe, Dauer der Messung und Zustand des Shieldings*[1] erhalten.

Weiterhin sollte die Bedienung des Probenwechslers wie im RCL visualisiert werden. Daher muss es eine Bildfläche geben, auf dem dessen Operationen dargestellt werden.
Die Umsetzung dieser Funktionen im ibe.maker ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Dabei wird bewusst der Bearbeitungsmodus gewählt, damit die genutzten Werkzeuge in Form von *Hotzones* abgebildet werden.

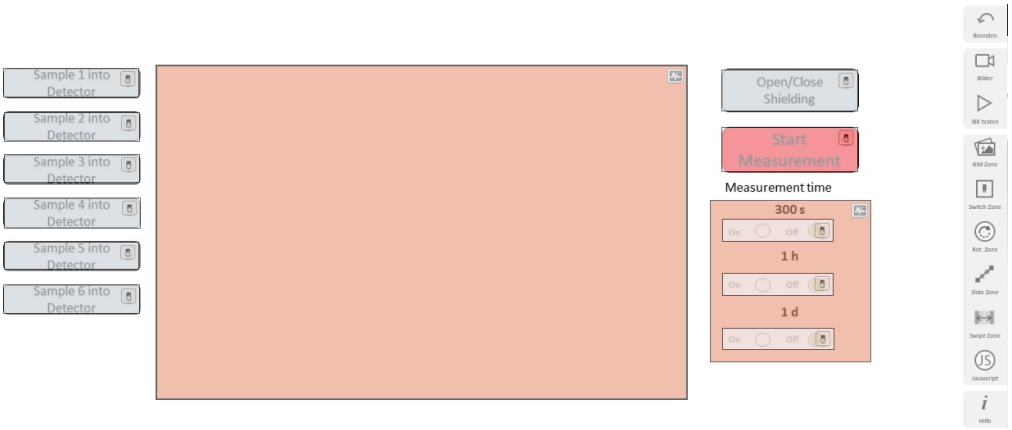


Abbildung 4.2: Das IBE im Bearbeitungsmodus des ibe.maker

Der Hintergrund des IBEs wurde mit PowerPoint 2016 erstellt und kann in Abbildung A.2 betrachtet werden. Dieser enthält sechs Tasten für die jeweiligen Proben des GammaLab, eine zum Öffnen und Schließen des Shieldings, eine zum starten der Messung und verschiedene Zeitvorwahlen. Eine variable Zeit wie im RCL lässt sich im ibe.maker nicht umsetzen. Dies ist nicht nur dem Programm geschuldet, sondern vor allem auch der Praxis. Da das IBE auf reale Messwerte und nicht auf simulierte Spektren zugreifen soll, müssten Spektren für jede Zeitauswahl gemessen werden, was aufgrund des Aufwands nicht möglich ist. Gleichzeitig können keine Live-Daten aus dem GammaLab aufgezeichnet werden, was eine alternative Lösung für Spektren jeder Zeitvorwahl gewesen wären. Die möglichen Messzeiten sind zum Zeitpunkt der Entwicklung des IBEs beliebig gewesen, da es vorrangig um die technische Umsetzung ging.
In Abbildung 4.2 sind elf Switch Zonen zu erkennen (grau) und zwei Bildflächen. Folgend sollen die Einstellungen dieser Zonen beschrieben werden.

[1] auf/zu

Die Switch Zonen auf der linken Seite, die zur Steuerung des Probenwechslers dienen, wurden auf zwei Zustände begrenzt, quasi "an" und "aus". Dies geschieht über die Anzahl an Fotoschritten. Hierüber soll später im Javascript der Zustand abgefragt werden können. Weiterhin erhält jede Switch Zone eine eigene Bezeichnung. Die Einstellung der Switch Zone für *Probe 1* ist in Abbildung A.3 dargestellt. Die anderen Switch Zonen für die Proben, das Shielding, die Messzeit und den Beginn der Messung wurden bis auf die Bezeichnung identisch eingestellt.
Die zentrale Bild Zone (rot) dient zur Darstellung des GammaLab wie über die Webcam im RCL. Daher muss diese zum einen ein Startbild (1) enthalten, das das Experiment im Grundzustand darstellt. Weiterhin müssen Sequenzen für jede Probenfahrt zum Detektor und zurück (12) dargestellt werden können. Außerdem muss das Shielding ohne Probe und mit jeweils jeder Probe auf- und zugefahren (14) werden können. Damit ergeben sich 27 Videos für die Bildfläche. Allerdings können im ibe.maker nur Fotos und keine Videos hochgeladen werden. Daher wurden die einzelnen Videosequenzen[2] zu GIF-Dateien formatiert und im Anschluss hochgeladen. Die Einstellungen der Bild Zone sind in Abbildung A.4 dargestellt.
Die Bild Zone unterhalb der **Measurement time** (ebenfalls rot) dient dazu, dass die ausgewählte Messzeit dargestellt wird. Hierfür wurde das Layout in vier Varianten erstellt. Einmal mit allen Messzeiten auf *off* und jeweils mit einer Messzeit auf *on*. Da das Hintergrundbild bereits die Option mit allen Messzeiten auf *off* beinhaltet, enthält die Bild Zone lediglich drei Fotoschritte, wie in Abbildung A.5 dargestellt.
Nachdem die Grundlagen für das IBE durch die Zusammenstellung des Datenmaterials und die Erstellung der notwendigen Hotzones geschaffen wurden, müssen die Interaktionen der einzelnen Elemente durch die Einbindung von Javascript festgelegt werden. Folgend sollen lediglich die notwendigen Befehle und die Grundstruktur des Codes beschrieben werden. Der gesamte Code befindet sich im Anhang unter A.3.
Da der Code auf bestimmte Elemente des ibe.maker zugreifen soll, ist es entscheidend, den Zugriff darauf zu kennen. Für Anweisungen und Befehle sind bei der Entwicklung des IBEs folgende Ausdrücke von Bedeutung gewesen:

$('#ID').css ermöglicht die Objektselektion im ibe.maker. Hierdurch können alle Hotzones anhand ihrer ID aufgerufen werden.
IDindex greift auf den Status der Switch Zonen zu. Hierdurch kann sowohl der Zustand abgefragt werden (===) oder auch zugewiesen (=) werden.
$('#ID').css('opacity', 1); variiert die Deckkraft der Bild Zone. Dabei wird diese in Prozent angegeben und hat daher Werte zwischen Null und Eins.

```
$('#ID').on('click', function() {
if (Bedingung) {Befehl1;}
else {Befehl2;}
```

[2] A.1

}); beschreibt, dass bei Klicken auf die Switch Zone mit der ID die Bedingung erfüllt ist, beispielsweise, ob der Zustand von ID auf null steht (IDindex===0), sprich der Schalter auf "aus " steht. Falls dies der Fall ist, wird Befehl1 ausgeführt. Weist der Schalter einen beliebigen anderen Zustand auf, wird Befehl2 ausgeführt.
$('#ID').IBEmc('currentframe','Zahl'); wechselt das Bild der Bild Zone ID zu der entsprechenden Zahl. Dabei richtet sich die Zahl nach der Reihenfolge der Uploads im ibe.maker.
$('#ID').on('click', function() {
switch (Bedingung/Variable) {
case Zustand1: {Befehl1; break;}
case Zustand2: {Befehl2; break;}
}}); ermöglicht umfangreichere Abfragen von Zuständen durch Klicken auf den Schalter ID ohne eine verschachtelte Funktion wie bei einer if-else-Schleife. Hierbei kann in switch eine Bedingung stehen (Beispiel: true) oder eine Variable (Beispiel: IDindex). Entspricht case von Zustand1 der Bedingung oder der Zustand des Objekts ID dem Zustand1 wird der Befehl1 ausgeführt und die Schleife danach beendet[3]. Hat das Objekt ID Zustand2 wird Befehl2 ausgeführt und die Schleife anschließend beendet. Weist kein case den Zustand der Variable auf oder wird erfüllt die Bedingung endet die Schleife ohne Auswirkungen.
window.open('URL') öffnet die angegebene Webadresse.

Der Code für das IBE besteht aus fünf Teilen. Diese sind jeweils durch Kommentare gekennzeichnet. Der erste Teil des Codes legt die Anfangsbedingungen fest. Im zweiten Teil wird die Zeiteinstellung definiert. Hierbei wurde darauf geachtet, dass immer nur ein Schalter den Zustand "an" (1) haben kann, sodass beim Einschalten die beiden anderen in den Zustand "aus" (0) versetzt werden. Im dritten Teil werden die sechs Schalter zur Steuerung des Probenwechslers definiert. Hierbei wird zum einen das Shielding abgefragt, ob es geschlossen ist. Bei geschlossenem Shielding wird der Versuch mit einem Hinweis abgebrochen, da auch im echten RCL das GammaLab kaputt gehen würde, falls der Nutzer eine Probe in den geschlossenen Detektor fahren möchte, weil der Probenwechsler keine Informationen über den Zustand des Shieldings verfügt. Zum anderen wird überprüft, ob sich bereits eine Probe im Detektor befindet. Befindet sich die Probe im Detektor, wird diese aus dem Detektor gefahren. Für das Hineinfahren der gewünschten Probe muss der Schalter erneut bedient werden. Befindet sich keine Probe im Detektor, wird die Auswahl hineingefahren. Jede Kombination aus den Zuständen der Proben und des Shieldings ist mit einem Befehl verknüpft, der in Abhängigkeit des Gesamtzustands das entsprechende GIF der Bild Zone abspielt. Im vierten Teil des Codes wird der Schalter zum Öffnen und Schließen des Shieldings in das IBE implementiert. Dabei werden im Wesentlichen zwei Fragen an das IBE gestellt. Zum einen, ob sich eine

[3] Dies geschieht durch den Befehl break.

Probe im Detektor befindet und wenn ja, welche Probe. Zum anderen, welchen Zustand das Shielding selbst zum Zeitpunkt des Klickens aufweist, um zu unterscheiden, ob geöffnet oder geschlossen werden muss. Abhängig hiervon und der Probe im Detektor wird das passende GIF zum Abspielen aufgerufen. Der fünfte und damit letzte Teil des Javascripts definiert alle Funktionen für den Schalter, der die Messung startet. Dabei wird zuerst abgefragt, ob eine Messzeit ausgewählt wurde. Falls dies nicht der Fall ist, erscheint ein Hinweis, dass der Nutzer dies bitte nachholen soll. Ansonsten wird bei drücken des Schalters überprüft, ob und welche Probe sich im Detektor befindet, das Shielding offen oder geschlossen ist und welche Messzeit eingestellt wurde. In Abhängigkeit dieser Parameter wird der Nutzer auf eine neue Seite im tet.folio weitergeleitet, auf der sich das entsprechende Spektrum in Form einer Excel-Datei befindet.
Das Javascript schließt die Erstellung des IBEs im ibe.maker ab, sodass dieses funktionstüchtig verwendet werden kann. Im nächsten Abschnitt soll die Programmierung des IBEs ohne den ibe.maker beschrieben werden. Diese überschneidet sich teilweise mit der bereits beschriebenen Entwicklung im ibe.maker, weist aber auch wesentliche Unterschiede auf.

4.2.2 Entwicklung ohne ibe.maker

Bei der Entwicklung des IBEs ohne das Werkzeug ibe.maker mussten einige Ratschläge vom Urheber des tet.folio Jan Haase eingeholt werden. Falls auf der Plattform Fragen oder Probleme auftreten, ist es möglich, über die Hilfefunktion Kontakt mit diesem aufzunehmen.
Die Gestaltung des Layouts gestaltete sich an dieser Stelle anders, da hier kein Hintergrundbild für das IBE notwendig ist. Daher wurden die Tasten mit Hilfe jeweils einer tet.box[4] erstellt. Die Gestaltung der tet.boxen ist dabei sehr flexibel, für die Tasten der Probensteuerung wurden in den Optionen *Objekt, Text, Extra* Einstellungen vorgenommen, wie in Abbildung A.7 (a)-(c) dargestellt wird. Unter der Option Objekt wurden für den Style *tet.button . tetbutton* und *Object text orientation . box_text_middle_center* gewählt. Erstere bestimmt das Design, was unter anderem zu einer Reaktion führt, wenn mit der Maus über die Taste gefahren wird. Letztere zentriert den Inhalt der tet.box, in diesem Fall Text, vertikal und horizontal. Der Titel der tet.box ist für die Programmierung des Javascripts von Bedeutung, daher wurde für eine einfache Zuordnung der Tasten eine Nummerierung von sample_1-6 vorgenommen. Die Tasten für das Shielding und das Starten der Messung wurden nach derselben Vorgehensweise erstellt.
Für die Bildfläche, auf der die Videos der Webcam abgespielt werden sollen, wurde ebenfalls eine tet.box erstellt. Hierfür wurde unter der Option Objekt der Punkt Diashow ausgewählt (siehe A.7 (d)). In der Diashow Einstellung wurden die Optionen *Positionen anpassen* sowie

[4] Voß (2019, S. 35 f.) erklärt die Verwendung von tet.boxen.

Klick-Steuerung deaktivieren gewählt. Letztere verhindert, dass durch das Klicken auf die Fläche dieser tet.box zwischen den Videos gewechselt wird. Außerdem wurde der Titel *screen* gewählt, um diesen im Javascript verwenden zu können. Anschließend wurden die Videos per Drag & Drop auf die Seite im tet.folio geladen. Im Layoutmodus, der durch Doppelklick auf die Seite oder die Werkzeuge auf der rechten Seite der Ansicht zu erreichen ist, können die Videos eingefügt und bearbeitet werden. Um die Videos der Diashow hinzuzufügen, muss im Layoutmodus, zu sehen in Abbildung A.6, die Option *schachteln* gewählt werden. Nachdem schachteln gewählt wurde, können die Videos per Drag & Drop direkt in die tet.box der Diashow gezogen werden. Dabei sollte die Reihenfolge beachtet werden, um beim Schreiben des Codes auf die entsprechenden Videos zugreifen zu können. Wählt man jetzt die Bearbeitung der Diashow aus, kann im Fenster oben rechts zwischen dem Kind-[5] und dem Elternobjekt (Diashow) gewechselt werden. Unter dem Kind wurde für die Videos die Styles *player . control_hide* und *ibe.box . vertical-middle* ausgewählt, damit die Videos ohne Menü dargestellt werden. Weiterhin soll das Seitenverhältnis erhalten bleiben. Zuletzt muss jedes Video unter der Option Extra mit einem *label* (siehe A.7 (c)) versehen werden. Dieses label ist entscheidend für die Weiterverarbeitung mit Javascript.

Das letzte visuelle Element des IBEs ist die Einstellung der Messzeit. Hierfür wurde eine tet.box angelegt, in die ein HTML-Code zur Erstellung von radio buttons eingefügt wurde. Zuerst wurde jedoch unter der Option Objekt die tet.box mit dem Titel *messzeit* versehen. Zudem wurde der Style an das übrige IBE angepasst[6]. In der Option Text wurde unter *Source* der Code[7] für die radio buttons eingegeben (siehe A.3). Damit die drei Zustände der radio buttons abgefragt werden können, muss zusätzlich ein Quiz-Tool eingefügt werden. Dies ermöglicht die Abfrage im Javascript, welche Messzeit ausgewählt wurde. Hierfür wird erneut eine tet.box erstellt, diesmal mit dem Style *dynvar . codeBox*, wodurch im tet.folio markiert wird, dass es sich hierbei um eine Quelldatei handelt und diese nicht außerhalb des Layoutmodus dargestellt werden soll. Unter der Option Extra kann unter Source-Edit der Code für die radio button-Abfrage eingefügt werden, welche unter A.3 dargestellt ist[8]. Anschließend sind alle visuellen Elemente bereit, um mit Javascript zu einem funktionsfähigen IBE gestaltet zu werden.

Der Code für dieses IBE gleicht in der Grundstruktur dem bereits verwendeten Code für den ibe.maker, dennoch sind einige Vereinfachungen und neue Befehle notwendig gewesen, weshalb der Code folgend kurz beschrieben werden soll. Der gesamte Code befindet sich im Anhang unter A.3. Da die Tasten in diesem IBE über keine Zustände verfügen, wurden zwei Variablen definiert, um durch diese Zustandsänderungen bei Drücken der verschiedenen Tasten einzufügen. Diese sind zum einen *sample* für die Proben und *shielding*, die beide den An-

[5] Videos, insgesamt 26 zwischen denen per Pfeiltaste hin und her gewechselt werden kann.

[6] *Box background . box_lightgrey; Object form rounded or circle . box_rounded*

[7] Der Code wurde aus Elementen der Seite `https://wiki.selfhtml.org/wiki/HTML/Formulare/input/Radio-Buttons_und_Checkboxen` erstellt und mit Hilfe von Jan Haase angepasst.

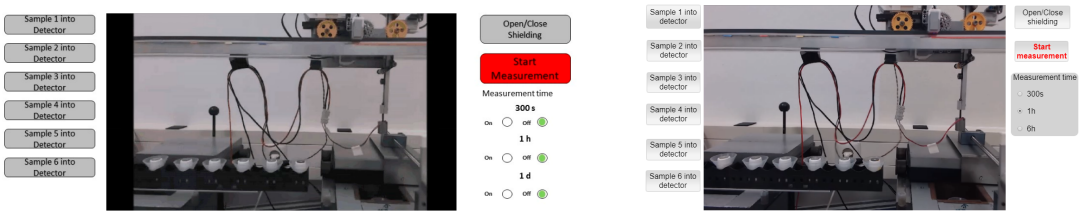
[8] Das Quiz-Tool wurde ohne Änderungen von Jan Haase übernommen.

fangszustand "0" zugewiesen bekommen, da sich keine Probe im Detektor befindet und das Shielding geöffnet ist. Für den Probenwechsler wurden die sechs Tasten so definiert, dass bei Klicken mit der Maus auf die Taste zuerst abgefragt wird, ob der Layoutmodus gerade aktiviert ist. Falls dies der Fall ist wird die Funktion abgebrochen. Ohne diesen Schritt würden die Tasten während der Bearbeitung im Layoutmodus stetig reagieren und das IBE bereits hier ausführen. Im zweiten Schritt wird wie im ersten IBE nach dem Zustand des Shieldings gefragt. Ist dieses geschlossen, wird die Seite mit einem Hinweis neu geladen. Können diese beiden Fälle ausgeschlossen werden, beginnt die eigentliche Funktion. Hier wird in Abhängigkeit der Variable sample die entsprechende Funktion ausgeführt, die zum einen das gewünschte Video der Diashow auswählt (dia_show ("screen",Zahl);) und dieses abspielt (tetplay("label");[9]). Weiterhin wird die Variable verändert, wird beispielsweise Probe 1 in den Detektor gefahren, wird die Variable auf "1" gesetzt. Befindet sich bereits eine andere Probe im Detektor, so wird zuerst diese aus dem Detektor gefahren und im Anschluss die gewählte Probe in diesen gefahren. Hierfür wird zuerst das Video des Herausfahrens abgespielt. Danach wird über eine Zeitverzögerung(setTimeout(function () {...},Verzögerungszeit);), in der die Länge des ersten Videos eingetragen wird, das Hineinfahren abgespielt.
Die Funktion der Taste zum Bedienen des Shieldings ist sehr ähnlich aufgebaut, dabei weniger komplex. Hier wird lediglich in Abhängigkeit davon, ob das Shielding zum Zeitpunkt des Klickens offen oder geschlossen ist und welche Probe sich im Detektor befindet das entsprechende Video abgespielt.
Die Taste zum Starten der Messung leitet wieder über die Abfrage der drei Variablen Probe, Shielding und Messzeit auf die entsprechende Seite weiter (window.open("URL");), auf der die Messergebnisse in Form einer Excel-Datei zu finden sind.

Nachdem beide IBEs fertiggestellt wurden[10], sollen diese miteinander verglichen werden. Dabei sollen Vor- und Nachteile beider IBEs dargestellt werden und abschließend in einer Tabelle dargestellt werden, welches IBE im jeweiligen Argument mehr überzeugt.
Zuerst soll in diesem Zusammenhang die Erstellung beider IBEs miteinander verglichen werden. Dabei erwies sich diese ohne den ibe.maker als deutlich komplexer, da speziell die Programmierung der radio buttons und deren Abfrage weitergehende Kenntnisse in HTML und Javascript voraussetzt. Die beiden Codes unterscheiden sich dagegen inhaltlich nur gering, wobei der Code im ibe.maker deutlich länger[11] und umständlicher ist. Für eine Person ohne Vorkenntnisse im Programmieren bietet sich daher eher die Nutzung des ibe.maker an. Bestehen dagegen Kompetenzen in HTML und Javascript können durch die freiere Gestaltung deutlich mehr Funktionen in das IBE implementiert werden als im ibe.maker. Der Aufwand für die Gestaltung des Layouts und die Hinterlegung der Daten ist etwa ausgeglichen, da zwar

[9] wobei das label des Videos genannt wird, welches vorher durch die Zahl im ersten Befehl ausgewählt wird.
[10] Die beiden IBEs können unter `https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/945732` und `https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947091` aufgerufen werden.
[11] Im Vergleich weist der Code ohne ibe.maker nur 12.769 Zeichen statt 28.093 auf.

das Layout über tet.boxen aufwendiger war als über ein Hintergrundbild, dagegen die Erstellung der GIFs für den ibe.maker mehr Zeit beansprucht hat als die Erstellung der Diashow. Insgesamt spricht aus der Perspektive einer Person ohne informatische Vorkenntnisse etwas mehr für die Nutzung des ibe.maker.
Bei der Nutzung der IBEs muss dagegen festgehalten werden, dass das zuerst erstellte IBE aufgrund des längeren Codes und der großen GIF-Dateien eine deutliche längere Ladezeit in Anspruch nimmt. Besonders in Anbetracht einer schwächeren Internetverbindung wäre das als Zweites erstellte IBE von Vorteil, welche gerade in Schulen häufig vorzufinden ist[12]. Außerdem funktioniert dieses deutlich stabiler, da durch die Verwendung von GIFs im ersten IBE immer wieder Komplikationen aufgetreten sind, wie beispielsweise ein Ablauf in Endlosschleife trotz gegenteiliger Formatierung. Zudem kann hier nicht in einem Schritt eine Probe aus dem Detektor gefahren werden und eine neue hinein.
Der optische Vergleich der beiden IBEs ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Hier ist zu erkennen,



(a) ibe.maker (b) ohne ibe.maker

Abbildung 4.3: Vergleich der Oberfläche beider IBEs

dass der Gesamteindruck in (b) etwas überzeugender und professioneller aussieht als in (a). Vor allem die Reaktion der Tasten, wenn die Maus sich auf diesen befindet, sorgt für einen angenehmen Eindruck. Auch die Bildqualität ist in den Videos besser als in den GIFs.
Zuletzt soll an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass ein IBE, welches im ibe.maker erstellt werden kann, nicht unabhängig dupliziert werden kann. Bei der Erstellung einer Kopie verändert sich diese immer mit dem Ursprungs-IBE. Hierdurch muss, wenn zwei IBEs mit nur geringen Unterschieden geschaffen werden sollen, diese vollkommen unabhängig voneinander erstellt werden. Für das zweite IBE trifft dies nicht zu, es kann beliebig kopiert werden und die Kopien unabhängig voneinander verändert werden.
In Tabelle 4.1 wird dargestellt, welche Argumente die beiden IBEs jeweils für sich entscheiden können. Hier wird deutlich, dass das IBE ohne ibe.maker bis auf den Erstellungsaufwand in allen Argumenten überzeugender ist. Da im Rahmen dieser Arbeit bereits beide IBEs erstellt wurden, wird sich für die Verwendung dieses IBEs entschieden und im Folgenden ausschließlich weiter betrachtet. Allgemein kann festgehalten werden, dass sich bei der Erstellung komplexer IBEs der Mehraufwand aufgrund der restlichen Argumente durchaus auszahlen kann.

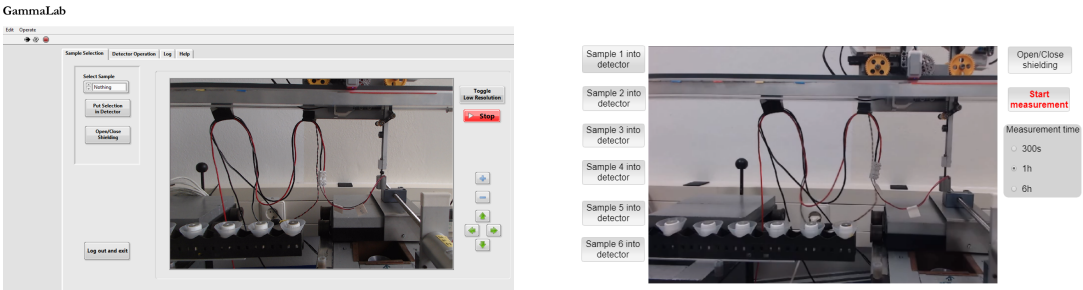
[12] https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/themen/aktuelle-meldungen/2017/september/digitalisierung-an-schulen-der-geist-ist-willig-das-wlan-ist-schwach/

Tabelle 4.1: Vergleich der IBEs

Argument	IBE mit ibe.maker	IBE ohne ibe.maker
Erstellungsaufwand	x	
Flexibilität		x
Komplexität Code		x
Funktionalität		x
Erscheinungsbild		x
Kopierbarkeit		x

4.3 Vergleich des IBEs und GammaLab

Die Erstellung des interaktiven Bildschirmexperiments zur Repräsentation des GammaLabs ist abgeschlossen. Daher sollen jetzt das IBE und das RCL zum GammaLab miteinander verglichen werden, wobei vor der Betrachtung der Funktionen zuerst das Layout des IBEs dem Interface des RCL in Abbildung 4.4 gegenübergestellt wird.



(a) Interfave RCL

(b) Layout IBE

Abbildung 4.4: Vergleich der Oberfläche RCL und IBEs

Die Bildfläche der Webcam ist entgegen der Abbildung im RCL genauso groß wie im IBE. Insgesamt ist die Ansicht beider digitalen Experimente ähnlich, wobei die unterschiedliche Auswahl der Proben durch das mangelnde Dropdownmenü im IBE auffällt. Weiterhin wurde das IBE auf eine Oberfläche reduziert, sodass die Tasten für die Zeitauswahl und den Start der Messung zusätzlich erscheinen.
Der Vergleich der Funktionen macht offensichtlich, dass sich die Entwicklung des IBEs auf den Umfang des GammaLabs ausgewirkt hat. Die Funktionen, die erhalten geblieben sind, umfassen das Wechseln der Proben, das Öffnen und Schließen des Shieldings, die Betrachtung des Probenwechslers sowie das manuelle Starten einer Messung. Dagegen kann zum

einen nicht die Entstehung des Spektrums betrachtet werden. Zum anderen gibt es keine beliebige Zeitauswahl mehr. Diese ist auf drei Dauern begrenzt. Weiterhin kann die Auflösung der Videos nicht eingestellt werden und die Steuerungstasten der Webcam fehlen.
Zudem gibt es Veränderungen bei der Nutzung. Im IBE können mehrere Nutzer simultan das GammaLab nutzen, da das reale Experiment nicht aktiv genutzt wird. Außerdem kann nach dem Start einer Messung direkt auf das Spektrum zugegriffen werden, ohne dass die Messzeit abgewartet werden muss. Die Spektren beziehen sich dabei allerdings immer auf dieselbe Messung zum Zeitpunkt dieser Arbeit aufgenommen und werden nicht bei jeder Nutzung neu aufgezeichnet.
Die nachfolgende Tabelle 4.2 stellt die Gemeinsamkeiten und Unterschiede des GammaLab und IBEs dar.

Tabelle 4.2: Vergleich des GammaLab und IBEs

Funktion	**GammaLab (RCL)**	**IBE**
Probenwechsel	**x**	**x**
Entstehung des Spektrums	**x**	
Aktuelles Spektrum	**x**	
Flexible Dauer der Messung	**x**	
Wartezeit	**x**	
Bedienung des Shieldings	**x**	**x**
Messung der Proben	**x**	**x**
Videobild des Probenwechslers	**x**	**x**
Simultane Nutzung		**x**

Die Gegenüberstellung des GammaLab und IBEs findet an dieser Stelle bewusst ohne Wertung statt, da dies Teil der Diskussion im Kapitel 6 ist.
Das folgende Kapitel soll nach der Entwicklung des IBEs Inhalte für verschiedene Zielgruppen darstellen, die mit Hilfe dieses behandelt werden können. Dabei wird speziell auf die Lehre in den Institutionen Schule und Universität eingegangen.

5 Didaktische Möglichkeiten der Gammaspektrometrie für verschiedene Niveaus

Bisher wurde zum einen die Gammaspektrometrie im Rahmen des RoboLabs beschrieben, zum anderen wurde dieses in Form eines IBEs in eine neue Art digitaler Experimente umgewandelt.
Folgend sollen anhand des Kerncurriculums sowie des Modulkatalogs der LUH, bzw. des IRS Inhalte herausgearbeitet werden, die im Rahmen des Physikunterricht und in der universitären Lehre durch die Verwendung des IBEs vermittelt werden können.

5.1 Oberstufe

Das Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.) (2017) unterteilt in der Oberstufe zum einen die erwarteten Kompetenzen in prozess- und inhaltsbezogene Kompetenzen, zum anderen findet bei letzteren eine Unterteilung in Einführungs- und Qualifikationsphase statt. Die Einbindung des IBEs zum GammaLab stellt dabei zahlreiche Möglichkeiten dar, diese Kompetenzen zu vermitteln. Daher sollen in diesem Abschnitt Möglichkeiten aufgezeigt werden, sowohl inhalts- als auch prozessbezogene Kompetenzen zu verknüpfen. Dabei besteht nicht der Anspruch alle Möglichkeiten aufzuzeigen, sondern die Vielseitigkeit dieses IBEs für den Einsatz im Physikunterricht darzustellen.
Die inhaltsbezogenen Kompetenzen für die Einführungsphase (EP) (ebd., S. 27) betreffen lediglich das Wahlmodul *Atom- und Kernphysik* und überschneiden sich mit denen der Qualifikationsphase (QP) (ebd., S. 41 f.), wobei hier zusätzliche Inhalte gefordert werden. Daher wird an dieser Stelle Bezug zu den Inhalten der Qualifikationsphase genommen. Dennoch lassen sich die beschriebenen Möglichkeiten auch auf das Wahlmodul der Einführungsphase übertragen. Gerade hier könnte durch den freien Gestaltungsraum[1] besonders intensiv auf das Thema Gammaspektrometrie oder Radioanalytik eingegangen werden.

[1] Im zweiten Halbjahr der Einführungsphase können acht Doppelstunden zu einem Wahlmodul gestaltet werden, das lediglich Bezug zu den Inhalten der Sekundarstufe I oder der Qualifikationsphase aufweisen muss (ebd., S. 24)

Im Kerncurriculum (KC) wird gefordert, dass die SuS Zerfallsreihen anhand einer Nuklidkarte aufstellen (ebd., S. 41). Zu den Proben des IBEs zählt zum einem eine Probe, die thoriumhaltigen Monazitsand enthält, zum anderen eine Probe, die einen Uranpellet enthält. Beide Proben liefern Spektren, auf denen zahlreiche Nuklide der natürlichen Zerfallsreihen des Th-232 und U-238 nachweisbar sind. Bei der Thematisierung der Nuklidkarte können diese primordialen Radionuklide diskutiert werden, Hypothesen über die Zerfallsprodukte und somit -reihe aufgestellt und praktisch mit Hilfe des IBEs überprüft werden. Im Rahmen der Diskussion der Zerfallsreihe werden dabei gleichzeitig die verschiedenen Zerfallsarten besprochen und deren Auswirkungen auf die Nukleonen der Radionuklide diskutiert.
Weiterhin kann im Zusammenhang einer gammaspektrometrischen Messung die Entstehung der diskreten Gammastrahlung als Folge der Quantisierung der Gesamtenergie von Nukleonen im eindimensionalen Potentialtopf (ebd., S. 42) thematisiert werden. Die in der Theorie gewonnenen Erkenntnisse können dann in einer die Realität abbildenden Anwendung betrachtet werden.
Grundsätzlich zählt zu den Inhalten der Kernphysik in der QP das Erläutern des grundlegenden Funktionsprinzips „eines Halbleiterdetektors für die Energiemessung von Kernstrahlung“ (ebd.). Mit Bezug auf das IBE kann hier speziell auf die Wechselwirkung von Photonen mit Materie eingegangen werden, wodurch ein Themenübergriff zu den Inhalten *Quantenobjekte* und *Atomhülle* stattfinden kann (ebd., S. 38 f..).
Von einer quantitativen Analyse der Spektren sollte in der Oberstufe abgesehen werden, da dies weit von den vorgesehenen Inhalten für das Fach Physik abweicht. Allerdings können spezifische Aktivitäten einzelner im Spektrum identifizierbarer Radionuklide gegeben werden, die zur Berechnung der Aktivität vergangener und zukünftiger Zeitpunkte genutzt werden können. Dies könnte besonders im Zusammenhang mit den Proben aus Tschernobyl und Fukushima eine Möglichkeit zur Bewertung von Sachverhalten geben. Dies ist Teil der prozessbezogenen Kompetenzen.
Weitere prozessbezogene Kompetenzen, die durch das IBE weiter ausgebildet werden können, sind das *physikalische Argumentieren, Planen, Experimentieren, Auswerten, Mathematisieren* und *Kommunizieren* (ebd., S. 7) Das IBE bietet wie bereits besprochen Ansätze zum Planen von Experimenten, gleichzeitig können die SuS die Experimente eigenständig durchführen. Da eine quantitative Analyse der Spektren die Kompetenzen der SuS übersteigt, beschränkt sich das Auswerten einerseits auf die qualitative Auswertung von Spektren. Andererseits können die Spektren, die die SuS nur in Form von Excel-Dateien erhalten, auch graphisch für die Auswertung dargestellt werden. Die Berechnung der Aktivität zu verschiedenen Zeitpunkten ist zudem ein Beispiel für die Mathematisierung. Durch die Vielfalt an Proben bieten sich gleichzeitig diverse methodische Möglichkeiten, um die Kommunikation über die Ergebnisse anzuregen.
Insgesamt eröffnet das IBE somit zahlreiche Optionen, inhalts- und prozessbezogene Kompetenzen zu vermitteln. Die bereits beschriebenen werden in die Entwicklung von Versuchs-

anleitungen einfließen, die in Kapitel 6 genauer beschrieben werden.

5.2 Bachelorkandidaten

Für die Betrachtung möglicher Inhalte im Rahmen der universitären Lehre wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich auf den Modulkatalog der LUH eingegangen. Es handelt sich auch in den folgenden Ausführungen um Vorschläge, die keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Daher wird ausschließlich auf den Studiengang Physik eingegangen, wobei auch andere Studiengänge wie die des Lehramts oder der Chemie Möglichkeiten zur Einbettung bieten könnten.
Innerhalb des Bachelorstudiums begegnet den Studierenden die Kernphysik zuerst im Rahmen der Experimentalphysik (Faculty of Mathematics and Physics, 2017, S. 19) und kann zusätzlich durch das Modul *Moderne Aspekte der Physik* behandelt werden (ebd., S. 131). Eine Veranstaltung der Experimentalphysik ist das Grundpraktikum III, welches einen Versuch zur Gammaspektroskopie beinhaltet[2]. Dieser Versuch beschränkt sich inhaltlich auf die Identifikation von Radionukliden innerhalb der aufgenommenen Spektren, die Entstehung der Spektren aufgrund der Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie, die Energiekalibrierung und Absorptionseffekte[3]. Die Analyse von Umweltproben findet nicht statt, da keine ausreichende Abschirmung vom Untergrund möglich ist. Weiterhin findet keine quantitative Auswertung der Spektren statt. Das IBE könnte im Rahmen des Grundpraktikums zwei Aufgaben erfüllen. Zum einen könnte dieses zur Vor- und Nachbereitung des bereits bestehenden Versuchs genutzt werden. Zum anderen könnte der Versuch um Inhalte ergänzt werden, die mit dem aktuellen Aufbau nicht behandelt werden können. So können anthropogene Radionuklide wie Cs-137 in Umweltproben aus Fukushima oder Tschernobyl identifiziert und zusätzlich quantitativ ausgewertet werden, wobei zur Begrenzung des Aufwands die Energie- und Efficiencykalibrierung vorgegeben werden können.
Als Alternative zum eher phänomenologisch orientierten Experiment könnte das IBE hier einen forschungsnäheren Zugang bieten, in dem im ersten Schritt die Energiekalibrierung des Detektors mit Hilfe eines Kalibrierstandards stattfindet, um auf dieser Basis Radionuklide verschiedener Proben zu identifizieren. Abschließend könnte die quantitative Auswertung anhand einzelner Nuklide stattfinden. Somit könnte der Versuch D12 von Gammaspektroskopie in Gammaspektrometrie umbenannt werden.
Im Rahmen des Moduls Moderne Aspekte der Physik können Studierende die Veranstaltung *Kernphysikalische und kernchemische Grundlagen des Strahlenschutzes und der Radioöko-*

[2] D12, `https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/1477.html`
[3] `https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/fileadmin/praktische-physik/AP/Versuche/D12.pdf`

logie besuchen. Inhalte dieser Veranstaltung sind unter anderem der Gamma-Zerfall und das Verhalten von Radionukliden in der Umwelt. Die Gammaspektrometrie kann hier als praktische Anwendung der Theorie, wie beispielsweise die diskreten Energien von Gammastrahlung, dargestellt werden. Weiterhin können die Studierenden säkuläre Gleichgewichte, die im Rahmen der Vorlesung thematisiert werden, praktisch bestimmt werden. Somit können die Inhalte des Grundpraktikumsversuchs um die der Vorlesung vertieft werden.
Für Studierende, die eine Abschlussarbeit in der Radioökologie anstreben, die die Gammaspektrometrie beinhaltet, sind dagegen tiefer gehende Kenntnisse notwendig, die dem Masterniveau entsprechen. Diese werden im kommenden Abschnitt beschrieben.

5.3 Masterkandidaten

Im Rahmen des Masterstudiums der Physik haben Studierende die Möglichkeit, im Modul Moderne Aspekte der Physik vertiefende Vorlesungen zur Radioökologie zu besuchen. Hier wird im Modulkatalog die Vorlesung *(Nukleare Radioanalytische Techniken* aufgeführt (Faculty of Mathematics and Physics, 2017, S. 135), die die Gammaspektrometrie beinhaltet und dabei auch die Auswertung nach DIN ISO 11929 thematisiert. Allerdings existiert diese Vorlesung nicht mehr, dafür eine inhaltlich ähnliche Vorlesung, die die *Chemie und physikalische Analyse von Radionukliden* behandelt.
Für gammaspektrometrische Messungen auf Masterniveau muss daher zusätzlich zu den Inhalten der Bachelorversuche vor allem die Auswertung von gammaspektrometrischen Messungen nach der DIN ISO 11929 thematisiert werden. Diese beinhaltet, wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben, neben der Bestimmung der spezifischen Aktivität von Radionukliden auch die Bestimmung der Erkennungs- und Nachweisgrenzen. Die Studierenden können durch die Nutzung des IBEs zum einen die charakteristischen Grenzen praktisch berechnen. Zum anderen kann im Zusammenhang der praktischen Messung auch die Bedeutung für die Ergebnisse und das Messverfahren diskutiert werden. Hierdurch erwerben die Studierenden Kompetenzen zur Beurteilung einer Messung.
Weiterhin können die Studierenden die Ermittlung der Efficiency für die Emissionsenergien der Radionuklide des Kalibrierstandards bestimmen. Hierfür müssen lediglich die notwendigen Daten des Standards zur Verfügung gestellt werden. Dabei kann gleichzeitig diskutiert werden, unter Anbetracht der Geometrie oder Absorptionseffekten, für welche Art von Probe die ermittelten Efficiencies geeignet sind und für welche nicht.

Nachdem die Inhalte der Gammaspektrometrie für verschiedene Niveaus eingegrenzt wurden, soll im folgenden Abschnitt begründet werden, weshalb teilweise Inhalte an dieser Stelle keine Berücksichtigung gefunden haben.

5.4 Exkludierte Inhalte

In den vorherigen Ausführungen 5.1-5.3 wurde bereits darauf hingewiesen, dass es sich bei den Inhalten lediglich um Anregungen handelt, was möglich sein könnte. Im Folgenden soll dagegen begründet erläutert werden, wieso einzelne Bereiche der Gammaspektrometrie bewusst ausgeschlossen wurden oder von der Behandlung dieser unter der Nutzung des IBEs abgeraten wird.
Ein Aspekt, der bisher nicht angesprochen wurde, ist die Überschneidung von zwei benachbarten Peaks. Sind die Peakflächen nicht voneinander zu trennen, muss dies bei der Berechnung der Aktivität berücksichtigt werden. Hierfür wird zusätzlich die Aktivität des Störnuklids sowie der Kalibrierfaktor benötigt. Da die gammaspektrometrische Auswertung der Spektren im IBE ohne zusätzliche Software erfolgt, wird aufgrund des Aufwands von der Berechnung der Aktivitäten solcher Peaks abgesehen. Dieser Aspekt findet lediglich Anwendung in Abschlussarbeiten und nicht im regulären Studium (Faculty of Mathematics and Physics, 2017), weshalb hier empfohlen wird, im Rahmen einer solchen diese Thematik unter Verwendung der am IRS üblichen Software GENIE2000 zu behandeln.
Gleiches gilt für die Berücksichtigung von Summationskorrekturen bei der Berechnung der spezifischen Aktivität eines Radionuklids. Diese korrigieren den Anteil an Impulsen eines Peaks im Spektrum, der durch die gleichzeitige Detektion zweier Gammaquanten im Detektorkristall entsteht, die in Summe die Energie dieses Peaks aufweisen (Tawussi, 2012, S. 42).
Weiterhin wurde für die Studierenden lediglich die Bestimmung der Efficiency für einzelne Radionuklide aufgezeigt. Die bei der Untersuchung von Proben, deren Radionuklide Emissionslinien über das gesamte Spektrum verteilt aufweisen, übliche Interpolation der energiespezifischen Efficiencies wurde dabei vernachlässigt. Dies steht im Zusammenhang mit dem verfügbaren Kalibrierstandard. Der genutzte QCY-48-Standard enthält aufgrund des Alters nicht mehr von allen Radionukliden ausreichend, um diese im Detektor nachzuweisen. So sind von den zwölf Linien im Spektrum lediglich sechs identifizierbar, wodurch die Interpolation an Genauigkeit verliert und zusätzlich erschwert wird. Daher wird hiervon abgesehen, obwohl diese einen wichtigen Bestandteil der Gammaspektrometrie darstellt. Aus diesem Grund wird eine nachträgliche Implementierung eines neuen Kalibrierstandards, sobald dieser zur Verfügung steht, angeraten.
Zuletzt soll eine Empfehlung bezüglich des Umfangs der Auswertung ausgesprochen werden. Der bereits beschriebene hohe Aufwand durch die Auswertung der Spektren ohne Software sollte bei der Anzahl der zu bestimmenden Aktivitäten berücksichtigt werden. Das IBE sollte in diesem Zusammenhang als Werkzeug zur Vermittlung verstanden werden, sodass unter anderem die DIN ISO 11929 praktisch erprobt werden kann. Dabei sollte die quantitative Auswertung beispielhaft stattfinden, eine Auswertung von vielen Radionukliden stellt dagegen eine monotone Aufgabe ohne Bezug zur realen Praxis im Labor, wo mit unterstützender Soft-

ware gearbeitet wird, dar.

Insgesamt wurden in dieser Arbeit einerseits theoretische Überlegungen zu digitalen Experimenten angestellt, andererseits wurde die praktische Umsetzung eines Experiments zum IBE mitsamt der möglichen Anwendung beschrieben. Das folgende Kapitel soll die daraus resultierenden Ergebnisse darstellen und im Gesamtkontext dieser Arbeit diskutieren.

6 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen zuerst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend dargestellt werden, bevor diese unter Anbetracht der Leitfragen diskutiert werden.
Die Erstellung eines IBEs auf Basis des GammaLab wurde im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt. Dabei weist das IBE allerdings Unterschiede zu diesem RCL auf, die in Tabelle 4.2 dargestellt sind. Grundlegende Funktionen, wie die Steuerung des Probenwechslers und die resultierende Auswahl und Messung von Proben mit verschiedenen Messzeiten wurden dabei erhalten. Die Entstehung der Spektren wird dagegen im IBE nicht dargestellt. Auch das Interface des Versuchs unterliegt optischen Veränderungen. Insgesamt konnte das Experiment GammaLab somit mit Einschränkungen digitalisiert werden.
Zusätzlich zu dem IBE wurden Versuchsanleitungen[1] für dieses entwickelt, die eine schnelle Anwendung in der Lehre ermöglichen sollen und beispielhaft darstellen, welche Möglichkeiten zur Einbindung des IBEs in diese bestehen. Die Lernziele der Anleitungen basieren auf den Ausführungen in Kapitel 5. Die speziellen fachlichen Inhalte zur Gammaspektrometrie wurden bereits in Abschnitt 3.3 beschrieben. Diese werden für die Versuchsanleitungen als übersichtliche Darstellung des notwendigen Wissens zur Auswertung von gammaspektrometrischen Messungen verwendet. Die Gestaltung der Anleitungen wurde auf eine schüler-, bzw. studierenden-zentrierte Durchführung des IBEs ausgerichtet, damit die Faktoren der intrinsischen Motivation begünstigt werden können. Hierzu zählt erstens die soziale Eingebundenheit, die durch die Verbundenheit mit anderen erreicht werden kann (Gebhard et al., 2017, S. 129 f.). Zweitens das Kompetenzerleben, welches durch das eigene, effektive Handeln erfahren werden kann (ebd.). Drittens die Autonomie, die durch die Möglichkeit, eigene Entscheidungen zu treffen, gefördert wird (ebd.). Um letztere Faktoren zu fördern, orientieren sich die Versuchsanleitungen an den Aufgaben mit gestuften Lernhilfen, da diese selbstständiges Lernen sowie eigene Entscheidungen über den Lernweg ermöglichen (Wodzinski & Stäudel, 2011, S. 2 f.). Da das IBE den Aufbau des Experiments bereits vorgibt, somit wenig Gestaltungsraum für die Nutzer eröffnet, soll dagegen die Auswertung kognitiv anspruchsvoll erfolgen, was durch die eigenständige Erarbeitung des Lösungsweg erfolgen soll (ebd.). In allen drei Anleitungen wird dem Nutzer eine Aufgabe gestellt, die im Zusammenhang mit den Messungen aus dem IBE stehen sowie das nötige Material, diese zielgerichtet auszuwerten.

[1] Die Versuchanleitungen befinden sich im Anhang A.2 und beinhalten zusätzlich Musterlösungen.

Falls der Nutzer Hilfe benötigt, kann dieser eigenständig durch Schritt-für-Schritt-Lösungen den Umfang an Unterstützung bestimmen und zum Ziel gelangen. Insgesamt stehen folglich ein digitales Experiment mit Versuchsanleitungen für unterschiedliche Nutzergruppen zur Verfügung.

In Bezug auf die Leitfragen sollen diese Ergebnisse der Arbeit in drei Kategorien diskutiert werden. Zuerst, inwieweit die Digitalisierung eines komplexen Experiments zu einem IBE möglich ist. Daraufhin, mit welchem Aufwand diese verbunden ist. Abschließend, welche Möglichkeiten aus dem resultierendem IBE eröffnet werden.
Die Frage, ob komplexe Experimente in Form eines IBEs repräsentiert werden können, lässt sich im Rahmen dieser Arbeit nur eingeschränkt beantworten. Ein Grund hierfür ist, dass das GammaLab nicht exakt in ein IBE umgewandelt werden konnte. Dies bezieht sich zum einen auf die optische Darstellung des Experiments. Das GammaLab stellt hierbei allerdings spezielle Anforderungen, da es nicht ausschließlich aus Fotoserien eines realen Experiments besteht, sondern bereits eine Art digitales Experiment darstellt. Hierdurch wird die Herausforderungen gestellt, zusätzlich zu den realen Abbildern des Experiments ein Interface zu "kopieren". Dies ist nur mit Einschränkungen gelungen. Zum anderen konnten nicht alle Funktionen des GammaLab in das IBE implementiert werden[2]. An dieser Stelle kann allerdings nicht vollständig geklärt werden, ob sich dieser Sachverhalt bei umfangreichen informatischen Kenntnissen des Erstellers ändern lässt. Eine exakte Umsetzung des Experiments mit geringen informatischen Kenntnissen hat sich als nicht möglich herausgestellt. Ein weiterer Grund ergibt sich daraus, dass in dieser Arbeit lediglich ein Experiment betrachtet wurde. Daher kann keine allgemeine Aussage über die Entwicklung von IBEs zu komplexen Experimenten getroffen werden. Allerdings kann festgestellt werden, dass die Verknüpfung einer Vielzahl an Variablen, die Einbettung von Videos zusätzlich zu Fotos und das Einfügen von HTML-Elementen zur Gestaltung eines IBEs genutzt werden können. Zusammenfassend kann daher festgehalten werden, dass das IBE das GammaLab nicht identisch widerspiegelt, die grundlegenden Funktionen, sprich die Handhabung und Messung von Proben, implementiert werden konnten. Die im Zuge dieses IBEs verwendeten Funktionen deuten zudem darauf hin, dass auch andere komplexere Experimente als IBE gestaltet werden könnten, wobei die Möglichkeiten stark von den informatischen Kenntnissen des Erstellers abhängen würden.
Im Zusammenhang des Aufwands werden nur die Aspekte diskutiert, die sich von der Erstellung eines einfachen IBEs unterscheiden. Auf Aufwände wie die Kosten für die Fotoausrüstung wird daher an dieser Stelle nicht eingegangen, da auch die Erstellung einfacher IBEs diese erfordert. Allgemein hängt der Aufwand stark davon ab, auf welcher Basis dieses entwickelt wird. Die Nutzung der Plattform tet.folio reduziert den Arbeitsaufwand erheblich, unabhängig von der Anwendung des ibe.maker. Dabei hängt die Benutzungsmöglichkeit des IBEs auf tet.folio von der FU Berlin ab, da die Plattform auf deren Servern existiert. Für ein

[2] siehe 4.2.

unabhängiges IBE müsste die Programmierung von Grund auf stattfinden, wodurch der Arbeitsaufwand erheblich gesteigert werden würde, da im tet.folio die meisten HTML- und CSS-Elemente unkompliziert durch Werkzeuge zugefügt werden können, wodurch sich gleichzeitig die Notwendigkeit informatischer Kenntnisse reduziert. Der zeitliche Aufwand zur Entwicklung eines IBEs gliedert sich in drei Phasen. Erstens der Erfassung des Experiments inklusive aller Funktionen und den daraus resultierenden notwendigen Aufnahmen[3]. Zweitens der Produktion dieser Aufnahmen. Im Fall des GammaLab bestehen diese aus Videos, die zusätzlich konvertiert werden mussten, sowie den Spektren jeder später im IBE möglichen Messung. Die dritte Phase umfasst die digitale Produktion des IBEs anhand dieser Aufnahmen. Im Zusammenhang des in dieser Arbeit entwickelten IBEs erwies sich die Aufnahme der Spektren als besonders zeitintensiv, da die Messungen eine gewisse Zeit benötigen. Allgemein sind die zweite und dritte Phase am aufwendigsten. Letztere erfordert aufgrund der Programmierung mehrere Tage bis Wochen, je nachdem wie komplex das IBE ist und welche Vorerfahrungen der Ersteller aufweist. Die Aufnahmen dagegen können von Experiment zu Experiment im Aufwand stark variieren. Insgesamt wird der Zeitaufwand in Folge der aus diesem IBE resultierenden Erkenntnisse für IBEs mit mehreren Variablen und umfangreichen Aufnahmen auf mehrere Wochen bis Monate geschätzt, wobei sich die Vorkenntnisse des Entwicklers stark auf die Dauer auswirken können.

Die Möglichkeiten, die sich durch die Erstellung eines solchen IBEs bieten, sollen am Beispiel des GammaLab im Folgenden diskutiert werden. Ein großer Mehrwert durch die Entwicklung des IBEs aus dem RCL GammaLab ist die Möglichkeit, die Gammaspektrometrie mit mehreren Nutzern simultan durchführen zu können. Hierdurch kann das GammaLab vom Demonstrationsexperiment zum Schüler-, bzw. Studentenexperiment umgewandelt werden. Das IBE weist als digitales Experiment jedoch nicht nur Vorteile gegenüber dem RCL auf, sondern auch den anderen Arten digitaler Experimente[4]. So verwendet das IBE im Gegensatz zu Simulationen und virtuellen Laboren reale Abbilder und Messwerte, greift somit nicht auf virtuelle oder simulierte zurück, wodurch ein stärkerer Bezug zur Realität geschaffen wird. Im Vergleich zu interaktiven Videos kann außerdem eine direkte Manipulation der Geräte im Labor stattfinden. Daher scheint ein IBE eine besonders gelungene Art digitaler Experimente darzustellen. Auch in Bezug auf das GammaLab hat das IBE gegenüber dem RCL den Vorteil, dass ersteres keine Kosten und anderen Aufwand im Betrieb erfordert. Daher kann ein IBE auch über die Dauer eines Projekts hinaus, hier im Falle des Projekt MEET-CINCH, genutzt werden. Das IBE verbraucht ausschließlich Ressourcen in der Entwicklung.

Einen Vorteil, den das IBE mit anderen digitalen Experimenten gemein hat, stellt zudem die Verfügbarkeit von Experimenten in Institutionen wie Schule und Universität dar, die aufgrund des Aufwands, aber auch der Gefahren, in diesen nicht durchgeführt werden können (M. Ber-

[3] (Voß, 2019) beschreibt in seiner Arbeit präzise die Erstellung des Storyboard, um genau diese Inhalte strukturiert abzubilden.

[4] Vergleich in 4.1

ger, 2018, S. 23). Obwohl Neuhaus et al. (2009, S. 1) empfehlen, IBEs als Ergänzung zum Realexperiment einzusetzen, kann für den Fall eines nicht realisierbaren Experiments, wie der Gammaspektrometrie, das IBE die Möglichkeit eines experimentellen Unterrichts eröffnen. Forschungsexperimente wie die Gammaspektrometrie können durch digitale Experimente wie das IBE Einzug in Schulen erhalten. Schecker, Wilhelm, Hopf und Duit (2018, S. 231) merken an, dass SuS ihr Vorwissen zur Radioaktivität vermehrt aus den Medien oder anderen Fächern als Physik generieren. Einen direkter Zugang zu Proben aus Tschernobyl und Fukushima sowie der Vergleich zu Proben wie Monazitsand kann neue Perspektiven aus fachlicher Sicht auf Themen eröffnen, die sonst eher medial diskutiert werden. Dies entspricht auch den Vorgaben des Kerncurriculums (Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.), 2017, S. 5), wonach die Bedeutung des Unterrichtsfaches Physik auch darin besteht, starke Anwendungsbezüge und eine hohe gesellschaftliche Relevanz zu besitzen.

Die Versuchsanleitungen zum IBE deuten an, welche Möglichkeiten für den experimentellen Unterricht oder auch in der universitären Lehre geschaffen werden können. Aus didaktischer Sicht können sowohl inhalts- auch auch prozessbezogene Kompetenzen gefördert werden. Die inhaltliche Auseinandersetzung mit der Gammaspektrometrie eröffnet die Anwendung der Theorie, wie beispielsweise der durch die Quantenmechanik erklärte Photoeffekt, in der Praxis. Die SuS können somit den praktischen Wert dieses Wissens eigenständig erfahren und nutzen. Die Auswertung von selbst aufgenommenen Spektren kann sich zudem positiv auf das Interesse der SuS auswirken. Aus methodischer Sicht ergeben sich durch die Dezentralisierung der Durchführung von einer auf mehrere Personen zahlreiche Möglichkeiten. So können im Physikunterricht verschiedene Gruppen jeweils nur eine Probe auswerten, um im Anschluss die Ergebnisse zusammenzutragen. In der Universität können die Studierenden nicht nur verschiedene Proben vergleichen, sondern auch die Effekte der Messzeit auf die Ergebnisse durch das Zusammentragen einzelner Auswertungen ermitteln. Die Versuchsanleitungen stellen dabei lediglich einen Denkanstoß dar, was möglich ist. Alle Möglichkeiten des IBEs abzubilden übersteigt dagegen den Rahmen dieser Arbeit. So können stetig neue Anleitungen mit anderen Lernzielen geschaffen werden. Ebenso kann das IBE bei Bedarf weiterentwickelt oder Proben ausgetauscht werden, um die Aktualität des Experiments zu wahren. Das IBE dieser Arbeit sowie die Versuchsanleitungen können daher als Grundstein gesehen werden, für ein Gebilde, dass erhebliches Potential zum Wachsen aufweist.

Insgesamt konnte durch die Entwicklung des IBEs zum einen angedeutet werden, inwieweit die Umsetzung komplexer Experimente durch IBEs möglich ist und welche Vorteile speziell durch die Wahl des IBEs als digitale Repräsentation bestehen. Zum anderen lassen die Versuchsanleitungen die didaktischen und methodischen Perspektiven des IBEs sowohl für die Schule als auch die Universität erahnen.

7 Ausblick

Die Digitalisierung des GammaLab in Form eines IBEs kann als größtenteils erfolgreich angesehen werden. Die Funktionen, die zur Gammaspektrometrie notwendig sind, konnte bei der Übertragung vom RCL zum IBE erhalten werden. Durch die Versuchsanleitungen konnten die Möglichkeiten für den Einsatz in der Lehre angedeutet werden.
In Bezug auf das erste Ziel dieser Masterarbeit kann formuliert werden, dass das entwickelte IBE eindeutige Hinweise darauf gibt, dass auch komplexe Experimente als IBE gestaltet werden können. Dies geschieht jedoch mit Einschränkungen, da von einem Experiment nicht auf alle möglichen Experimente geschlossen werden kann. Vielmehr wurde gezeigt, dass auch Interaktionen, die von mehreren Variablen abhängen, in ein IBE implementiert und durch die Nutzung von HTML und CSS sowie Javascript verschiedenste (optische) Elemente eingebunden werden können. Die Frage nach dem Aufwand kann nicht präzise beantwortet werden, da dieser zum einen vom Experiment, zum anderen vom Entwickler und vor allem dessen informatischen Vorkenntnissen abhängt.
Das zweite Ziel, die Möglichkeiten aufzuzeigen, die sich für die Lehre durch die Entwicklung eines IBEs eröffnen, ergab vielseitige Erkenntnisse. Das Potential von IBEs stellt sich vor allem in der Flexibilität dar. So können Experimente unabhängig vom finanziellen, technischen oder räumlichen Aufwand durchgeführt werden. Dabei ist die Nutzeranzahl sogar unabhängig von diesen Komponenten, es müssen lediglich ausreichend Endgeräte zur Verfügung stehen. Weiterhin ist auch das Gefahrenpotential des Experiments unbedeutend für die Nutzer, sodass Experimente für SuS möglich werden, die zuvor nicht umsetzbar waren, oder schwangere und stillende Studentinnen Zugang zu Experimenten erhalten, die zuvor eine Unterbrechung des Studiums erzwungen haben. Das IBE ermöglicht daher verschiedensten Personengruppen Zugang zu einem Forschungsexperiment, hierzu könnten auch Hobbyphysiker gehören oder Studierende an Universitäten aus der ganzen Welt, die nicht über die Ausstattung verfügen. Abgesehen von der Flexibilität ergeben sich auch aus didaktischer und methodischer Perspektive zahlreiche Möglichkeiten für die Lehre, die durch die Versuchsanleitungen und Ausführungen in Kapitel 5 angedeutet werden konnten.
Die Kombination aus dem IBE und den Versuchsanleitungen ermöglicht eine direkte Anwendung in der Lehre, dies gilt sowohl für die Institution Schule als auch Universität. Somit könnte auf Basis dieser Masterarbeit die Anwendung von IBEs in der Lehre weiter erforscht werden.

Gleichzeitig kann das IBE jederzeit um neue Versuchsanleitungen erweitert werden. Auch das IBE selbst kann flexibel an neue Anforderungen angepasst werden. So könnte für die Einbettung der Efficiencykalibrierung nachträglich ein neuer Kalibrierstandard in das bestehende IBE implementiert werden. Insgesamt bietet sich durch die Ergebnisse der Arbeit sowohl die weitere Betrachtung der technischen Möglichkeiten interaktiver Bildschirmexperimente an als auch die Forschung in Bezug auf die Anwendung des entwickelten IBEs in der Lehre.

Literaturverzeichnis

Altherr, S., Vetter, M., Eckert, B. & Jodl, H. (2005). Experimentieren aus der Ferne–Ferngesteuertes Labor im Internet (Remotely Controlled Laboratory–RCL). *Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*, *6* (54), 40–46.

Arnold, D., Debertin, K., Heckel, A., Kanisch, G., Wershofen, H. & Wilhelm, C. (2018, März). Grundlagen der Gammaspektrometrie. *Messanleitungen für die „Überwachung radioaktiver Stoffe in der Umwelt und externer Strahlung“*. Zugriff auf `https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/strlsch_messungen_gamma_grund.pdf`

Autorengruppe der DPG. (2016). *Physik in der Schule - Hauptteil*. Deutsche Physikalische Gesellschaft. Zugriff auf `https://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/broschueren/studien.html`

Berger, M. (2018). *Neue Medien im experimentellen Physikunterricht der Sekundarstufe I - Eine empirisch-explorative Studie zur Untersuchung der Auswirkungen von virtuell durchgeführten physikalischen Experimenten auf die Motivation der Lernenden im Sekundarstufenbereich I* (Dissertation, Pädagogische Hochschule Heidelberg). Zugriff auf `https://opus.ph-heidelberg.de/frontdoor/index/index/docId/313`

Berger, R., Girwidz, R., Heering, P., Höttecke, D. & Hopf, M. (2011). *Physikdidaktik kompakt*. Aulis Verlag.

Berger, V. (2006). Im Physikunterricht experimentieren. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physikdidaktik - Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II* (S. 149-182). Cornelsen Verlag Scriptor.

Büker, H. (1971). *Theorie und Praxis der Halbleiterdetektoren für Kernstrahlung*. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-80613-1

Deci, E. L. & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. New York: Plenum.

Deutsches Institut für Normung. (2011). *DIN ISO 11929 - Bestimmung der charakteristischen Grenzen (Erkennungsgrenze, Nachweisgrenze und Grenzen des Vertrauensbereichs) bei Messungen ionisierender Strahlung – Grundlagen und Anwendungen (ISO 11929:2010)*.

Duden. (o. J.). Zugriff auf https://www.duden.de/node/648101/revisions/1983314/view

Faculty of Mathematics and Physics. (2017). *Module catalog.* Zugriff auf https://www.maphy.uni-hannover.de/fileadmin/maphy/Studium/Studierende/Modulkataloge/Modulkatalog_Englisch/Module_MetPhys_engl_20180925.pdf

Gebhard, U., Höttecke, D. & Rehm, M. (2017). *Pädagogik der Naturwissenschaften*. Springer Fachmedien Wiesbaden. doi: 10.1007/978-3-531-19546-9

Gilmore, G. (2008). *Practical gamma-ray spectroscopy*. Wiley. Zugriff auf https://www.amazon.com/Practical-Gamma-ray-Spectroscopy-Gordon-Gilmore/dp/0470861967?SubscriptionId=AKIAIOBINVZYXZQZ2U3A&tag=chimbori05-20&linkCode=xm2&camp=2025&creative=165953&creativeASIN=0470861967

Haase, S., Kirstein, J. & Nordmeier, V. (2016). tet.folio: Neue Ansätze zur digitalen Unterstützung individualisierten Lernens. *Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*. Zugriff auf http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/737

Hasselhorn, M. & Gold, A. (2009). *Pädagogische Psychologie: erfolgreiches Lernen und Lehren*. Kohlhammer W.

Hentel, F. (2017). *Gamma-spektrometrische Untersuchungen von Wässern aus norddeutschen Trinkwassergewinnungsgebieten.* Leibniz Universität Hannover. Zugriff auf https://www.irs.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/bachente.pdf

Hillmayr, D., Reinhold, F., Ziernwald, L. & Reiss, K. (2017). *Digitale Medien im mathematisch-naturwissenschaftlichenUnterricht der Sekundarstufe*. Waxmann Verlag GmbH.

Holzwarth, P. (2010). Aktive Medienarbeit als Integrationschance. In G. Cleppien & U. Lerche (Hrsg.), *Soziale arbeit und medien* (S. 189–202). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. Zugriff auf https://doi.org/10.1007/978-3-531-92376-5_13 doi: 10.1007/978-3-531-92376-5_13

Hopf, M. (2007). *Problemorientierte Schulerexperimente (Studien Zum Physik- Und Chemielernen) (German Edition)*. Logos Verlag Berlin.

Hüther, M. & Theyssen, H. (2005). Vergleichende Untersuchung zur Lernwirksamkeit einer hypermedialen Lernumgebung und eines Praktikums an der Hochschule. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*.

Icker, M. (2013). *Realisierung internetgesteuerter Versuche zur Gammaspektrometrie im Rahmen einer EU FP7 Ausbildungsinitiative (CINCH II).* Duale Hochschule Baden-Württemberg Karlsruhe. Zugriff auf https://www.irs.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/bacicker_03.pdf

JCGM. (2008). *Guide to the expression of uncertainty in measurement (corrected and reprinted, 1995)*. BIPM: International Bureau of Weights and Measures, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIMI. Zugriff auf https://www.bipm.org/utils/common/documents/

jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf

Jeschke, S., Richter, T., Scheel, H., Seiler, R. & Thomsen, C. (2005). Das Experiment und die eLTR-Technologien: Magnetismus in Virtuellen Laboren und Remote-Experimenten. Zugriff auf https://www.researchgate.net/publication/277067691

Kircher, E., Girwidz, R. & Häußler, P. (Hrsg.). (2015). *Physikdidaktik*. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-41745-0

Kirstein, J., Fröhlich, A., Hoedt, S. & Nordmeier, V. (2010). Lernen mit Interaktiven Bildschirmexperimenten in virtuellen Räumen. *Didaktik der Physik-Hannover*. Zugriff auf http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/228/288

Kirstein, J., Haase, S., Mühlenbruch, T. & Nordmeier, V. (2016). 20 Jahre Interaktive Bildschirmexperimente – Von den Anfängen bis zu ELIXIER. *Didaktik der Physik*. Zugriff auf http://phydid.physik.fu-berlin.de/index.php/phydid-b/article/view/739/872

Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley and Sons Ltd. Zugriff auf https://www.ebook.de/de/product/12251381/glenn_f_knoll_radiation_detection_and_measurement.html

Lotz, M. & Lipowsky, F. (o. J.). Die Hattie-Studie und ihre Bedeutung für den Unterricht - Ein Blick auf ausgewählte Aspekte der Lehrer-Schüler-Interaktion. Zugriff auf http://www.frank-lipowsky.de/wp-content/uploads/Lotz-Lipowsky-2.pdf

MEET-CINCH. (2017-2018). *First Public Report* (Bericht). Zugriff auf https://www.cinch-project.eu/fileadmin/user_upload/MEET-CINCH_D4.4_First_Public_Report_2018.pdf

Neugebauer, C. (2006). *Lernen Mit Simulationen Und Der Einfluss Auf Das Problemlosen in Der Physik (Studien Zum Physik- Und Chemielernen) (German Edition)*. Logos Verlag Berlin.

Neuhaus, W. (2010). Handlungsmanual. *Didaktik der Physik - AG Nordmeier - FU Berlin*. Zugriff auf https://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/ip/downloads/Handlungsmanual-IPE-Final_Feb_2010.pdf

Neuhaus, W., Kirstein, J. & Nordmeier, V. (2009). Interaktive Praktikumsexperimente für eine familienfreundliche Hochschule. *Didaktik der Physik-Bochum*. Zugriff auf http://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/ip/downloads/DD_30_37_Neuhaus_et_al.pdf

Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.). (2015). Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge 5-10 - Naturwissenschaften. Hannover. Zugriff auf http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/nw_gym_si_kc_druck.pdf

Niedersächsisches Kultusministerium (Hrsg.). (2017). Kerncurriculum für das Gymnasium – gymnasiale Oberstufe die Gesamtschule – gymnasiale Oberstufe das Berufliche Gymnasium das Abendgymnasium das Kolleg - Physik. Hannover. Zugriff auf http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/ph_go_kc_druck_2017.pdf

Pester, A. & Auer, M. E. (2011). Online-Labore - Formen, Einsatz in der Lehre, Beispiele und Trends. *Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien*. Zugriff auf https://l3t.tugraz.at/index.php/LehrbuchEbner10/article/view/46

Peters, L. (2012). *Charakteristische Grenzen nach DIN ISO 11929*. Leibniz Universität Hannover. Zugriff auf https://www.irs.uni-hannover.de/uploads/tx_tkpublikationen/diplpete_03.pdf

Petko, D. (2014). *Einführung in die Mediendidaktik*. Beltz.

Reinhold, P. (1996). *Offenes Experimentieren und Physiklernen (IPN)*.

Schecker, H., Wilhelm, T., Hopf, M. & Duit, R. (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Springer-Verlag GmbH. Zugriff auf https://www.ebook.de/de/product/33144452/schuelervorstellungen_und_physikunterricht.html

Scherp, A., Appelrath, H.-J. & Boles, D.-I. D. (2001). *Vorgehensmodell und Entwicklungsmethodik für virtuelle Labore*. Oldenburg, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fachbereich Informatik. Zugriff auf http://www.ansgarscherp.net/publications/pdf/A01-Scherp-VorgehensmodellUndEntwicklungsmethodikFuerVirtuelleLabore.pdf

Schiepe-Tiska, A., Schöps, K., Rönnebeck, S., Köller, O. & Prenzel, M. (2012). Naturwissenschaftliche Kompetenz in PISA 2012: Ergebnisse und Herausforderungen. *Pisa*, 189–216. Zugriff auf https://www.researchgate.net/profile/Anja_Schiepe-Tiska/publication/259998319_Naturwissenschaftliche_Kompetenz_in_PISA_2012_Ergebnisse_und_Herausforderungen/links/5580701908ae607ddc32245e.pdf

Scholz, R. (2014). Analyse und Präsentation von Messdaten [Software-Handbuch]. Hannover. Zugriff auf https://www.praktikumphysik.uni-hannover.de/fileadmin/praktische-physik/AP/Material/Crash_Messunsicherheit.pdf

Schötzig, U. & Schrader, H. (1993). Halbwertszeiten und Photonen-Emissionswahrscheinlichkeiten von häufig verwendeten Radionukliden.

Sco-bel, W., Lindström, G. & Langkau, R. (2002). *Physik kompakt 1*. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-56015-6

Tawussi, F. (2012). *Gammaspektrometrische untersuchung von umweltproben*. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Tesch, M. (2005). *Das Experiment im Physikunterricht - Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie (Studien zum Physik- und Chemielernen) (German Edition)*. Logos Verlag Berlin.

Tesch, M. & Duit, R. (2004). Experimentieren im Physikunterricht - Ergebnisse einer Videostudie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenscaften* (10), 51-69. Zugriff auf ftp://ftp.rz.uni-kiel.de/pub/ipn/zfdn/2004/3.Tesch_Duit_051-070.pdf

Vahlbruch, J.-W. (2004). *Über den Transfer von natürlichen Radionukliden in terrestrischen Ökosystemen und die realistische Modellierung der natürlichen Strahlenexposition in Norddeutschland*. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Voß, M. (2019). *Konzeption und Entwicklung interaktiver Bildschirmexperimente* (Unveröffentlichte Diplomarbeit). Leibniz Universität Hannover.

Wodzinski, R. & Stäudel, L. (2011). *Aufgaben mit gestuften lernhilfen für den Physik-Unterricht*. Seelze: Friedrich Verlag.

A Anhang

A.1 Ergänzungen

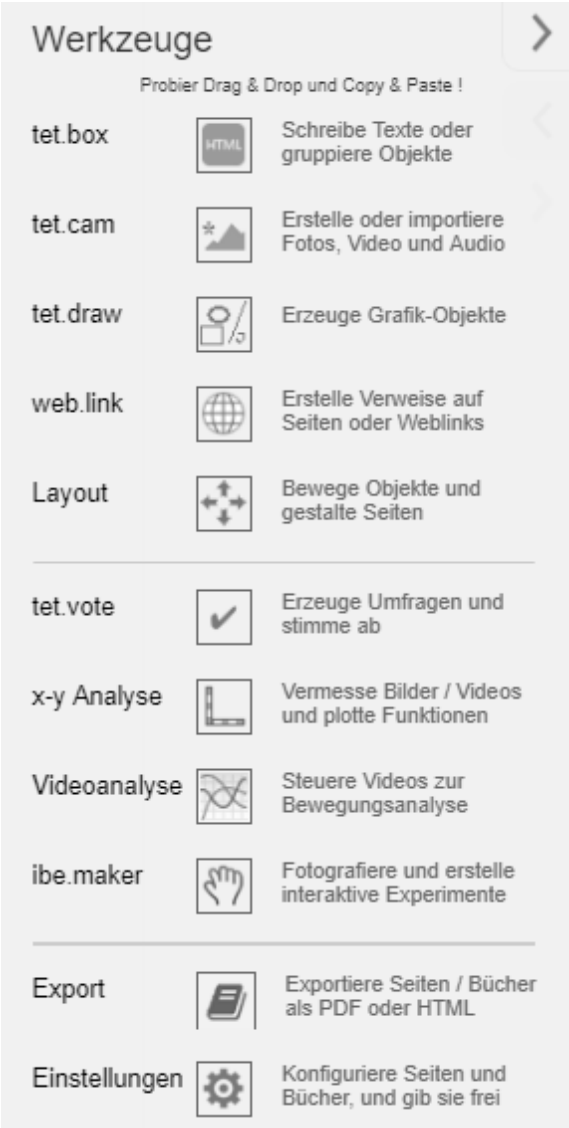


Abbildung A.1: Werkzeuge des tet.folios als Screenshoot der Plattform

Abbildung A.2: Das Layout des IBEs für den ibe.maker

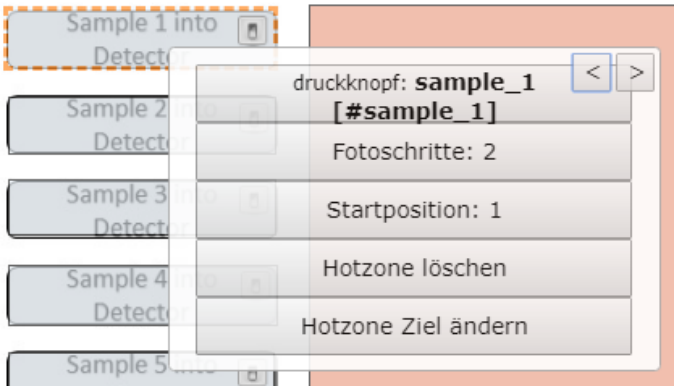


Abbildung A.3: Einstellung der Switch Zone für Probe 1

Abbildung A.4: Einstellung der Bildfläche für die Webcam-Aufnahmen

Videoaufnahmen

Für die Aufnahme der Videos wurden alle Konstellationen mit dem GammaLab im Internet Explorer durchgeführt und mit Hilfe der Software Captura als Videoausschnitt des Desktops aufgenommen. Dabei wurde für jede Probe ein Video für die Fahrt zum Detektor, das Schlie-

ßen des Shieldings, das Öffnen des Shieldings und die Fahrt vom Detektor weg, erstellt. Weiterhin wurden die Aufnahmen des Shieldings um welche ohne Probe ergänzt, damit Untergrundmessungen stattfinden können.

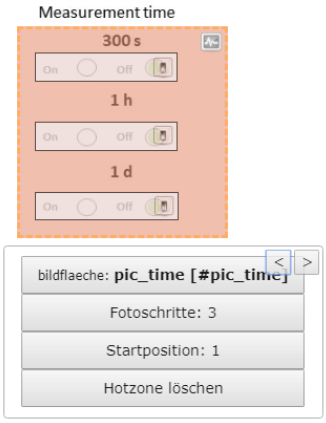


Abbildung A.5: Einstellung der Bildfläche für die Messzeit-Vorwahl

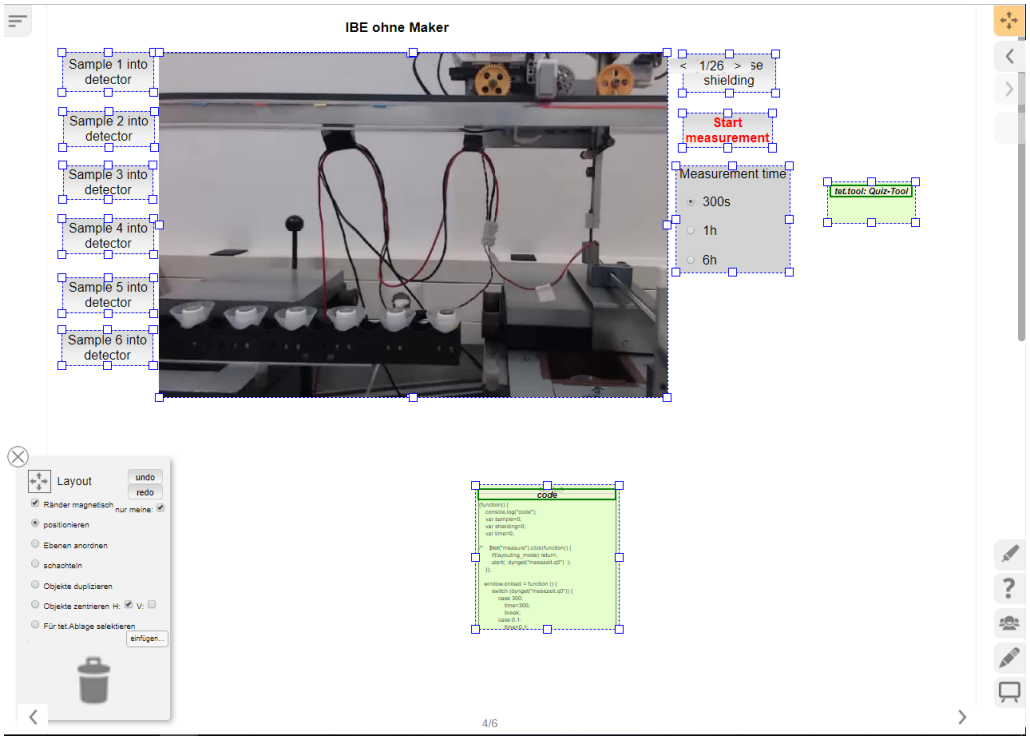
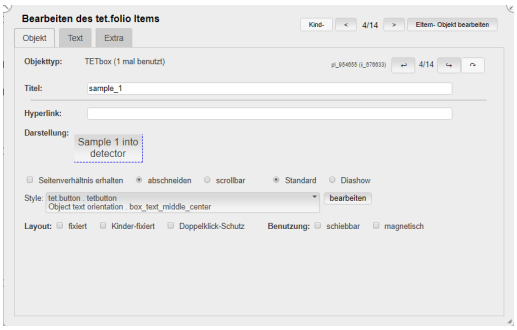
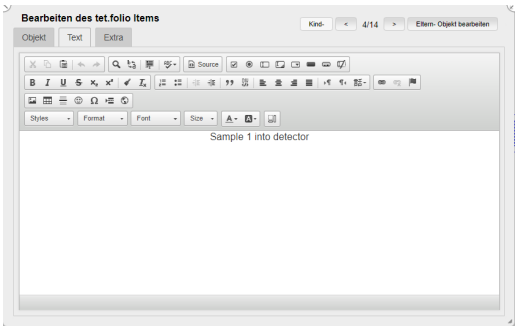


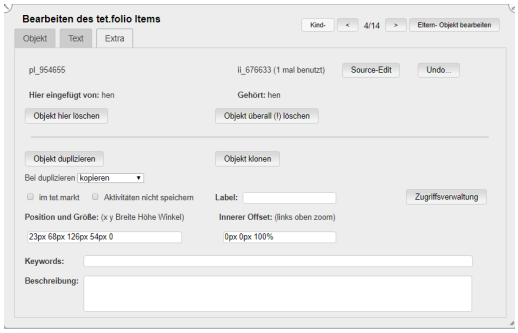
Abbildung A.6: Layoutmodus des IBEs ohne ibe.maker



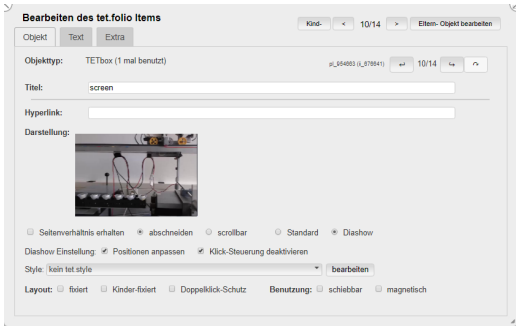
(a) Objekt



(b) Text



(c) Extra



(d) Diashow

Abbildung A.7: Einstellungsmöglichkeiten der tet.box

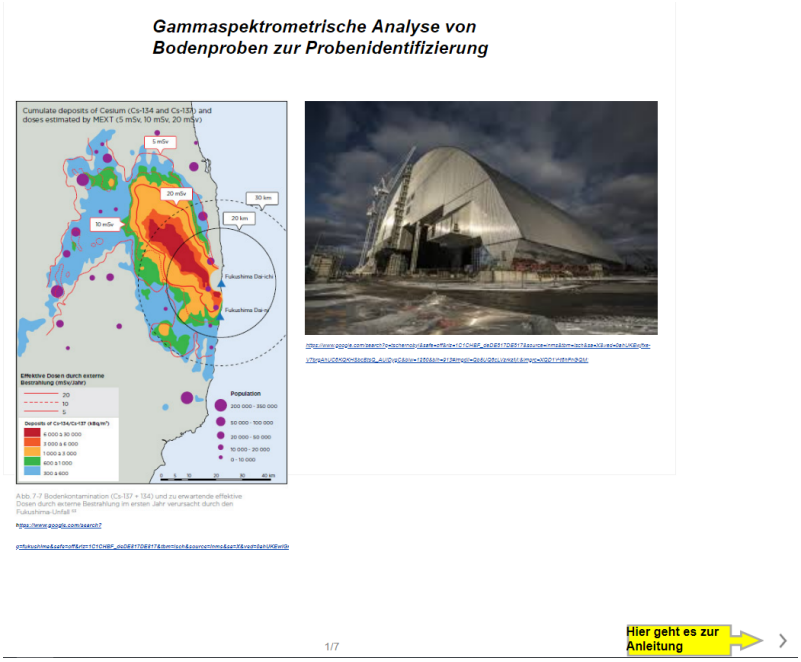
A.2 Versuchsanleitungen

Die Versuchsanleitungen zum IBE wurden ebenfalls im tet.folio erstellt, da ein digitales Endgerät für die Nutzung des IBEs bereits verwendet wird und somit die Anleitung besser mit dem Experiment verbunden werden kann. Daher wird im Folgenden die Oberfläche der Anleitungen dargestellt und eine Beschreibung des Experiments, sowie der Zugriff hierauf.

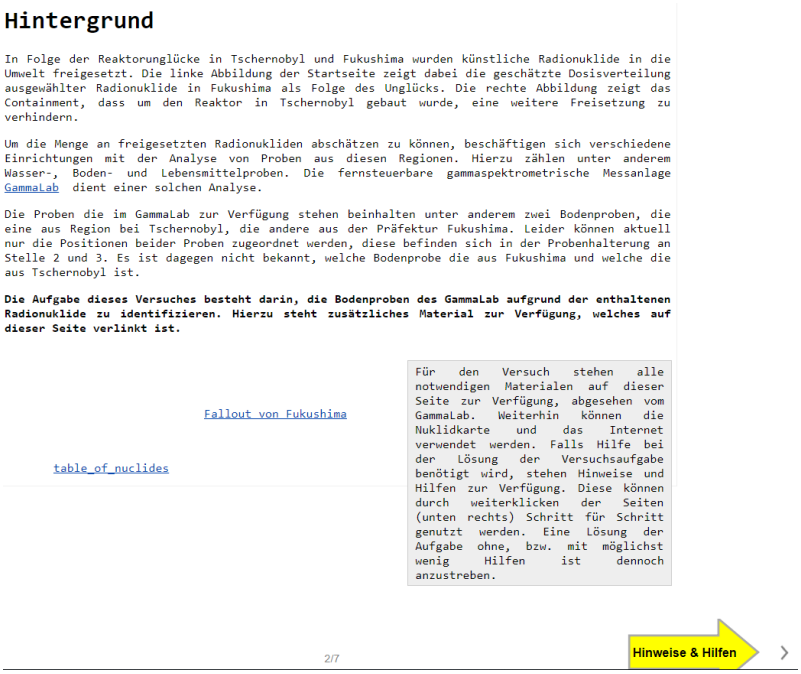
Oberstufenniveau

In der Anleitung für die Oberstufe geht es um die Identifizierung von Proben. Durch die Aufgabenstellung werden die SuS aufgefordert, sich eine eigene Lösungsstrategie anhand ihres Vorwissens und den gegebenen Materialien zu erarbeiten. Zur Differenzierung können Hilfen und Hinweise genutzt werden, die Schritt für Schritt zur Lösung der Aufgabe führen, sodass nicht direkt der gesamte kognitive Prozess vorweggenommen wird. Die Versuchsanleitung

der Oberstufe kann unter `https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/992973` aufgerufen werden. Die Abbildung A.8 stellt die Titelfolie (a) dar sowie die Aufgabenstellung inklusive des Materials (b).



(a) Titelseite

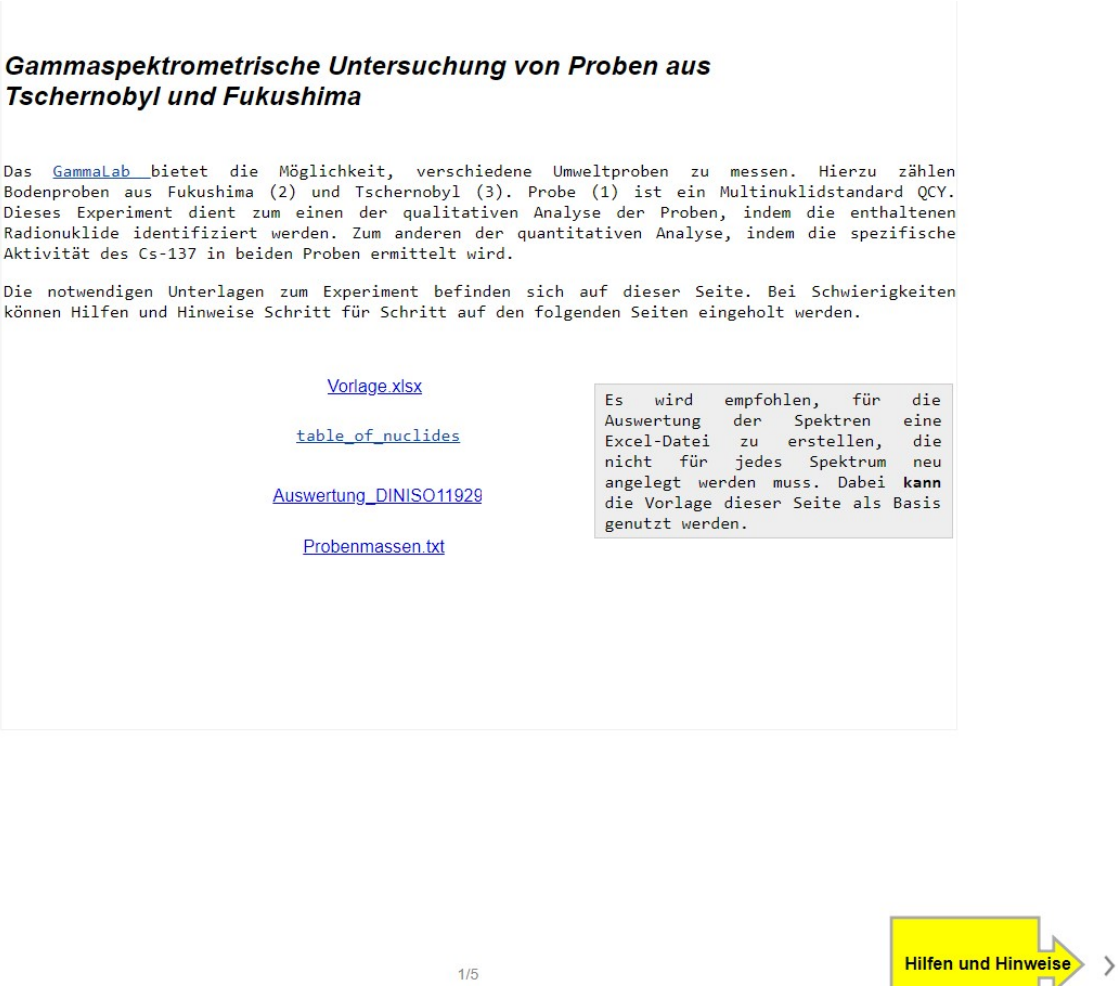


(b) Aufgabenstellung

Abbildung A.8: Versuchsanleitung für die Oberstufe

Bachelorniveau

Die Anleitung auf Bachelorniveau verlangt eine quantitative und qualitative Auseinandersetzung mit den Proben aus Fukushima und Tschernobyl. Zum einen sollen die in den Proben enthaltenen Radionuklide identifiziert werden. Zum anderen soll die spezifische Aktivität des Cs-137 in beiden Proben bestimmt werden. Die Versuchsanleitung kann unter `https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/993452` aufgerufen werden. Die Abbildung A.9 zeigt die Aufgabenstellung.



Gammaspektrometrische Untersuchung von Proben aus Tschernobyl und Fukushima

Das GammaLab bietet die Möglichkeit, verschiedene Umweltproben zu messen. Hierzu zählen Bodenproben aus Fukushima (2) und Tschernobyl (3). Probe (1) ist ein Multinuklidstandard QCY. Dieses Experiment dient zum einen der qualitativen Analyse der Proben, indem die enthaltenen Radionuklide identifiziert werden. Zum anderen der quantitativen Analyse, indem die spezifische Aktivität des Cs-137 in beiden Proben ermittelt wird.

Die notwendigen Unterlagen zum Experiment befinden sich auf dieser Seite. Bei Schwierigkeiten können Hilfen und Hinweise Schritt für Schritt auf den folgenden Seiten eingeholt werden.

Vorlage.xlsx

table_of_nuclides

Auswertung_DINISO11929

Probenmassen.txt

Es wird empfohlen, für die Auswertung der Spektren eine Excel-Datei zu erstellen, die nicht für jedes Spektrum neu angelegt werden muss. Dabei **kann** die Vorlage dieser Seite als Basis genutzt werden.

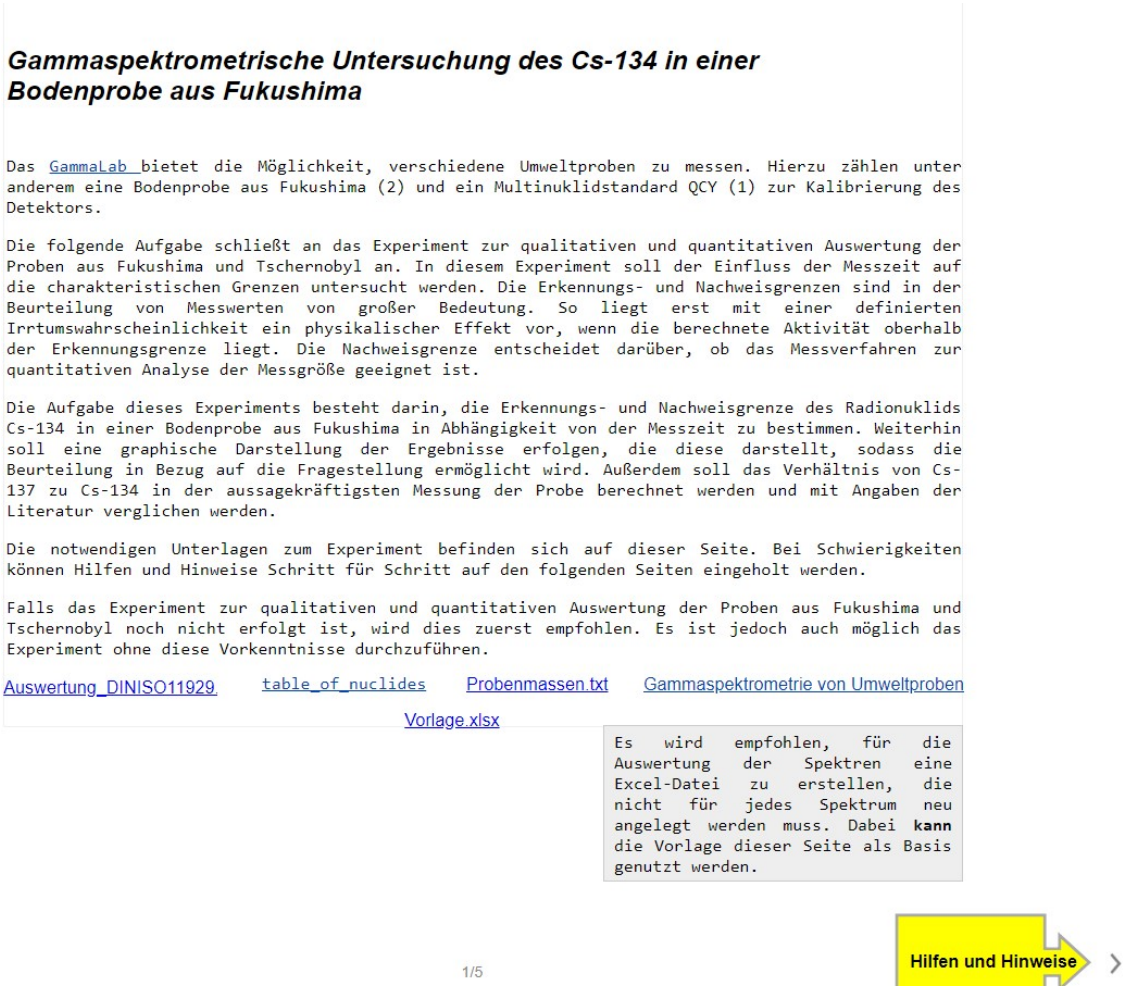
1/5

Hilfen und Hinweise

Abbildung A.9: Versuchsanleitung für das Bachelorniveau

Masterniveau

Die Anleitung auf Masterniveau setzt sich vor allem mit den charakteristischen Grenzen auseinander. Hierbei soll der Einfluss der Messzeit auf die Erkennungs- und Nachweisgrenze untersucht werden. Gleichzeitig müssen die Aufgaben des Bachelorniveaus erfüllt werden, da diese Aufgabe auf der Versuchsanleitung des Bachelorniveaus aufbaut. Zusätzlich kann im Rahmen des Masterversuchs eine Efficiencykalibrierung über die Jäckel-Westmeier-Funktion stattfinden.
Die Versuchsanleitung kann unter `https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/995348` aufgerufen werden. Die Abbildung A.10 zeigt die Aufgabenstellung.



Gammaspektrometrische Untersuchung des Cs-134 in einer Bodenprobe aus Fukushima

Das GammaLab bietet die Möglichkeit, verschiedene Umweltproben zu messen. Hierzu zählen unter anderem eine Bodenprobe aus Fukushima (2) und ein Multinuklidstandard QCY (1) zur Kalibrierung des Detektors.

Die folgende Aufgabe schließt an das Experiment zur qualitativen und quantitativen Auswertung der Proben aus Fukushima und Tschernobyl an. In diesem Experiment soll der Einfluss der Messzeit auf die charakteristischen Grenzen untersucht werden. Die Erkennungs- und Nachweisgrenzen sind in der Beurteilung von Messwerten von großer Bedeutung. So liegt erst mit einer definierten Irrtumswahrscheinlichkeit ein physikalischer Effekt vor, wenn die berechnete Aktivität oberhalb der Erkennungsgrenze liegt. Die Nachweisgrenze entscheidet darüber, ob das Messverfahren zur quantitativen Analyse der Messgröße geeignet ist.

Die Aufgabe dieses Experiments besteht darin, die Erkennungs- und Nachweisgrenze des Radionuklids Cs-134 in einer Bodenprobe aus Fukushima in Abhängigkeit von der Messzeit zu bestimmen. Weiterhin soll eine graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgen, die diese darstellt, sodass die Beurteilung in Bezug auf die Fragestellung ermöglicht wird. Außerdem soll das Verhältnis von Cs-137 zu Cs-134 in der aussagekräftigsten Messung der Probe berechnet werden und mit Angaben der Literatur verglichen werden.

Die notwendigen Unterlagen zum Experiment befinden sich auf dieser Seite. Bei Schwierigkeiten können Hilfen und Hinweise Schritt für Schritt auf den folgenden Seiten eingeholt werden.

Falls das Experiment zur qualitativen und quantitativen Auswertung der Proben aus Fukushima und Tschernobyl noch nicht erfolgt ist, wird dies zuerst empfohlen. Es ist jedoch auch möglich das Experiment ohne diese Vorkenntnisse durchzuführen.

Auswertung_DINISO11929 table_of_nuclides Probenmassen.txt Gammaspektrometrie von Umweltproben Vorlage.xlsx

Es wird empfohlen, für die Auswertung der Spektren eine Excel-Datei zu erstellen, die nicht für jedes Spektrum neu angelegt werden muss. Dabei **kann** die Vorlage dieser Seite als Basis genutzt werden.

1/5

Hilfen und Hinweise

Abbildung A.10: Versuchsanleitung für das Masterniveau

A.3 Codes

Folgend sind die Codes beider IBE-Version dargestellt.

Javascript-Code für den ibe.maker

```
// Anfangseinstellungen
//jshint maxerr: 1000
$('#screen').css('opacity', 1);
$('#pic_time').css('opacity', 0);
$(time_3sindex=0);
$(time_1hindex=0);
$(time_1dindex=0);
$(sample_1index=0);
$(sample_2index=0);
$(sample_3index=0);
$(sample_4index=0);
$(sample_5index=0);
$(sample_6index=0);
$(measureindex=0);
$(shieldingindex=0);

//--------------------

//Messparameter

$('#time_3s').on('click', function() {
    if (time_3sindex===0) {
        $('#pic_time').css('opacity', 0);
    }
    else {
        $("#pic_time").css('opacity', 1);
        $('#pic_time').IBEmc('currentFrame', '1' );
        $(time_1dindex=0);
        $(time_1hindex=0);
    }
});
```

```
$('#time_1h').on('click', function() {
    if (time_1hindex===0) {
        $('#pic_time').css('opacity', 0);
    }
    else {
        $("#pic_time").css('opacity', 1);
        $('#pic_time').IBEmc('currentFrame', '2' );
        $(time_3sindex=0);
        $(time_1dindex=0);
    }
});
$('#time_1d').on('click', function() {
    if (time_1dindex===0) {
        $('#pic_time').css('opacity', 0);
    }
    else {
        $("#pic_time").css('opacity', 1);
        $('#pic_time').IBEmc('currentFrame', '3' );
        $(time_3sindex=0);
        $(time_1hindex=0);
    }
});

// Probenwechsler

$('#sample_1').on('click', function() {
        switch (true) {
        case shieldingindex===1:
                alert("The␣robot␣crashed␣because␣you␣forgot␣to
                   ␣open␣the␣shielding.␣Restart␣the␣experiment
                   ␣and␣remember:␣Shielding␣needs␣to␣be␣opened
                   ␣before␣you␣change␣the␣sample!");
                location.reload();
                break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '9' );
                $(sample_1index=0);
```

```
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '13' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '17' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '21' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
```

```
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '25' );
                $(sample_1index=0);
                $(sample_2index=0);
                $(sample_3index=0);
                $(sample_4index=0);
                $(sample_5index=0);
                $(sample_6index=0);
                break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '2' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '5' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
}});

$('#sample_2').on('click', function() {
        switch (true) {
        case shieldingindex===1:
                alert("The robot crashed because you forgot to
                   open the shielding. Restart the experiment
                   and remember: Shielding needs to be opened
                   before you change the sample!");
                location.reload();
                break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '5' );
                $(sample_1index=0);
```

```
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '13' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '17' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '21' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
```

```
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '25' );
                $(sample_1index=0);
                $(sample_2index=0);
                $(sample_3index=0);
                $(sample_4index=0);
                $(sample_5index=0);
                $(sample_6index=0);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '6' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '9' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
}});

$('#sample_3').on('click', function() {
        switch (true) {
        case shieldingindex===1:
                alert("The robot crashed because you forgot to
                   open the shielding. Restart the experiment
                   and remember: Shielding needs to be opened
                   before you change the sample!");
                location.reload();
                break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '5' );
                $(sample_1index=0);
```

```
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '9' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '17' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '21' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
```

```
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '25' );
                $(sample_1index=0);
                $(sample_2index=0);
                $(sample_3index=0);
                $(sample_4index=0);
                $(sample_5index=0);
                $(sample_6index=0);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '10' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '13' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
}});

$('#sample_4').on('click', function() {
        switch (true) {
        case shieldingindex===1:
                alert("The robot crashed because you forgot to
                   open the shielding. Restart the experiment
                   and remember: Shielding needs to be opened
                   before you change the sample!");
                location.reload();
                break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '5' );
                $(sample_1index=0);
```

```
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '9' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '13' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '21' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
```

```
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '25' );
                $(sample_1index=0);
                $(sample_2index=0);
                $(sample_3index=0);
                $(sample_4index=0);
                $(sample_5index=0);
                $(sample_6index=0);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '14' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '17' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
}});

$('#sample_5').on('click', function() {
        switch (true) {
        case shieldingindex===1:
                alert("The robot crashed because you forgot to
                   open the shielding. Restart the experiment
                   and remember: Shielding needs to be opened
                   before you change the sample!");
                location.reload();
                break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '5' );
                $(sample_1index=0);
```

```
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '9' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '13' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '17' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
```

```
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '25' );
                $(sample_1index=0);
                $(sample_2index=0);
                $(sample_3index=0);
                $(sample_4index=0);
                $(sample_5index=0);
                $(sample_6index=0);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '18' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '21' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
}});


$('#sample_6').on('click', function() {
        switch (true) {
        case shieldingindex===1:
                alert("The robot crashed because you forgot to
                   open the shielding. Restart the experiment
                   and remember: Shielding needs to be opened
                   before you change the sample!");
                location.reload();
                break;
        case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '5' );
```

```
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '9' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===1 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '13' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
            break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===1 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
            $('#screen').IBEmc('currentFrame', '17' );
            $(sample_1index=0);
            $(sample_2index=0);
            $(sample_3index=0);
            $(sample_4index=0);
            $(sample_5index=0);
            $(sample_6index=0);
```

```
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===1 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '21' );
                $(sample_1index=0);
                $(sample_2index=0);
                $(sample_3index=0);
                $(sample_4index=0);
                $(sample_5index=0);
                $(sample_6index=0);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===1:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '22' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
        case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
           sample_3index===0 && sample_4index===0 &&
           sample_5index===0 && sample_6index===0:
                $('#screen').IBEmc('currentFrame', '25' );
                $('#screen').css('opacity', 1);
                break;
}});

//Shielding

$('#shielding').on('click', function() {
    if (shieldingindex===1 && sample_1index===0 &&
       sample_2index===0 && sample_3index===0 && sample_4index
       ===0 && sample_5index===0 && sample_6index===0)
    { $('#screen').IBEmc('currentFrame', '27' );
    }
    else {
        if (shieldingindex===0 && sample_1index===0 &&
           sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
           sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
           sample_6index===0)
```

```
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '26' );
}
else {
if (shieldingindex===1 && sample_1index===1 &&
   sample_2index===0 && sample_3index===0 && sample_4index
   ===0 && sample_5index===0 && sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '3' );
}
else {
    if (shieldingindex===1 && sample_1index===0 &&
       sample_2index===1 && sample_3index===0 &&
       sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
       sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '7' );
}
else {
    if (shieldingindex===1 && sample_1index===0 &&
       sample_2index===0 && sample_3index===1 &&
       sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
       sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '11' );
}
else {
    if (shieldingindex===1 && sample_1index===0 &&
       sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
       sample_4index===1 && sample_5index===0 &&
       sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '15' );
}
else {
    if (shieldingindex===1 && sample_1index===0 &&
       sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
       sample_4index===0 && sample_5index===1 &&
       sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '19' );
}
else {
    if (shieldingindex===1 && sample_1index===0 &&
       sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
```

```
        sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
        sample_6index===1)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '23' );
}
else {
    if (shieldingindex===0 && sample_1index===1 &&
        sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
        sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
        sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '4' );
}
else {
    if (shieldingindex===0 && sample_1index===0 &&
        sample_2index===1 && sample_3index===0 &&
        sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
        sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '8' );
}
else {
    if (shieldingindex===0 && sample_1index===0 &&
        sample_2index===0 && sample_3index===1 &&
        sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
        sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '12' );
}
else {
    if (shieldingindex===0 && sample_1index===0 &&
        sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
        sample_4index===1 && sample_5index===0 &&
        sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '16' );
}
else {
    if (shieldingindex===0 && sample_1index===0 &&
        sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
        sample_4index===0 && sample_5index===1 &&
        sample_6index===0)
{ $('#screen').IBEmc('currentFrame', '20' );
}
```

```
    else {
        if (shieldingindex===0 && sample_1index===0 &&
           sample_2index===0 && sample_3index===0 &&
           sample_4index===0 && sample_5index===0 &&
           sample_6index===1)
    { $('#screen').IBEmc('currentFrame', '24' );
    }
    else { $('#screen').IBEmc('currentFrame', '1' ); $(
       shieldingindex=0);}
    }}}}}}}}}}}}}
});

//Messung starten

$('#measure').on('click', function() {
    switch (true) {
    case time_3sindex===0 && time_1hindex===0 && time_1dindex
       ===0:
        alert("You␣need␣to␣choose␣a␣measurement␣time!");
            $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
       ===0 && time_1dindex===0:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947711'
           );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
       ===0 && time_1dindex===0:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947717'
           );
        $(measureindex=0);
        break;
```

```
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===1 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947718'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===1 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947719'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===1 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947720'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===1 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947721'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
```

```
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===1 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947722'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===1 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947724'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===1 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===1 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947725'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===1 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===1 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947727'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===1 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===1 && time_1dindex===0:
```

```
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947728'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===1 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===1 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947729'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947730'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947731'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===1 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947732'
       );
    $(measureindex=0);
```

```
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===1 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===0 && time_1dindex===1:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947733'
           );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===1 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===0 && time_1dindex===1:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947734'
           );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===1 && shieldingindex===1 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===0 && time_1dindex===1:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947735'
           );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
       ===0 && time_1dindex===0:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947737'
           );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
```

```
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947738'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===1 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947739'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===1 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947740'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===1 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===0:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947741'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===1 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===0:
```

```
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947742'
            );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===1 && time_1dindex===0:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947743'
            );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===1 && time_1dindex===0:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947744'
            );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===1 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===1 && time_1dindex===0:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947745'
            );
        $(measureindex=0);
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===1 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===1 && time_1dindex===0:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947746'
            );
        $(measureindex=0);
```

```
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===1 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===1 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947747'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===1 && shieldingindex===0 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===1 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947748'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===1 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947749'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===1 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947750'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===1 && sample_4index===0 && sample_5index
```

```
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===1:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947751'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===1 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===1:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947752'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===1 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===1:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947753'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===1 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===1:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947754'
        );
     $(measureindex=0);
     break;
  case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
    sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
    ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
    measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
    ===0 && time_1dindex===0:
```

```
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947756'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===1 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947757'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===1 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947758'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===1 && time_1dindex===0:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947759'
       );
    $(measureindex=0);
    break;
case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
   sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
   ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===0 &&
   measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
   ===0 && time_1dindex===1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947761'
       );
    $(measureindex=0);
```

```
        break;
    case sample_1index===0 && sample_2index===0 &&
       sample_3index===0 && sample_4index===0 && sample_5index
       ===0 && sample_6index===0 && shieldingindex===1 &&
       measureindex===1 && time_3sindex===0 && time_1hindex
       ===0 && time_1dindex===1:
        setTimeout(function () {window.open('https://tetfolio.
           fu-berlin.de/tet/947760');}, 5000);
        $(measureindex=0);
        break;
}});
```

Javascript-Code ohne ibe.maker

```
<script>
(function() {
    console.log("{Titel}");
    var sample=0;
    var shielding=0;

    $tet("sample_1").click(function() {
        if(layouting_mode) return;
        if(shielding===1){
            alert("The robot crashed because you forgot to
               open the shielding. Restart the experiment and
               remember: Shielding needs to be opened before
               you change the sample!");
                location.reload();};
        switch (sample){
        case 0:
            dia_show    ("screen", 0);
            tetplay("einseins");
            sample=1;
            break;
        case 1:
            dia_show    ("screen", 3);
            tetplay("einsvier");
            sample=0;
            break;
```

```
case 2:
    dia_show    ("screen", 7);
    tetplay("zweivier");
    setTimeout(function () {
    dia_show    ("screen", 0);
    tetplay("einseins");
    sample=1;
    }, 17000);
    break;
case 3:
    dia_show    ("screen", 11);
    tetplay("dreivier");
    setTimeout(function () {
    dia_show    ("screen", 0);
    tetplay("einseins");
    sample=1;
    }, 18000);
    break;
case 4:
    dia_show    ("screen", 15);
    tetplay("viervier");
    setTimeout(function () {
    dia_show    ("screen", 0);
    tetplay("einseins");
    sample=1;
    }, 19000);
    break;
case 5:
    dia_show    ("screen", 7);
    tetplay("f\"unfvier");
    setTimeout(function () {
    dia_show    ("screen", 0);
    tetplay("einseins");
    sample=1;
    }, 19000);
    break;
case 6:
    dia_show    ("screen", 7);
    tetplay("sechsvier");
```

```
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 0);
            tetplay("einseins");
            sample=1;
            }, 25000);
            break;}
    });

    $tet("sample_2").click(function() {
        if(layouting_mode) return;
        if(shielding===1){
            alert("The robot crashed because you forgot to
               open the shielding. Restart the experiment and
               remember: Shielding needs to be opened before
               you change the sample!");
                location.reload();};
        switch (sample){
        case 0:
            dia_show    ("screen", 4);
            tetplay("zweieins");
            sample=2;
            break;
        case 1:
            dia_show    ("screen", 3);
            tetplay("einsvier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 4);
            tetplay("zweieins");
            sample=2;
            }, 16000);
            break;
        case 2:
            dia_show    ("screen", 7);
            tetplay("zweivier");
            sample=0;
            break;
        case 3:
            dia_show    ("screen", 11);
            tetplay("dreivier");
```

```
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 4);
            tetplay("zweieins");
            sample=2;
            }, 18000);
            break;
        case 4:
            dia_show    ("screen", 15);
            tetplay("viervier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 4);
            tetplay("zweieins");
            sample=2;
            }, 19000);
            break;
        case 5:
            dia_show    ("screen", 19);
            tetplay("f\"unfvier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 4);
            tetplay("zweieins");
            sample=2;
            }, 19000);
            break;
        case 6:
            dia_show    ("screen", 23);
            tetplay("sechsvier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 4);
            tetplay("zweieins");
            sample=2;
            }, 25000);
            break;
        }
    });

    $tet("sample_3").click(function() {
        if(layouting_mode) return;
        if(shielding===1){
```

```
        alert("The robot crashed because you forgot to
           open the shielding. Restart the experiment and
           remember: Shielding needs to be opened before
           you change the sample!");
            location.reload();};
    switch (sample){
    case 0:
        dia_show    ("screen", 8);
        tetplay("dreieins");
        sample=3;
        break;
    case 1:
        dia_show    ("screen", 3);
        tetplay("einsvier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 8);
        tetplay("dreieins");
        sample=3;
        }, 16000);
        break;
    case 2:
        dia_show    ("screen", 7);
        tetplay("zweivier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 8);
        tetplay("dreieins");
        sample=3;
        }, 17000);
        break;
    case 3:
        dia_show    ("screen", 11);
        tetplay("dreivier");
        sample=0;
        break;
    case 4:
        dia_show    ("screen", 15);
        tetplay("viervier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 8);
```

```
        tetplay("dreieins");
        sample=3;
        }, 19000);
        break;
    case 5:
        dia_show    ("screen", 19);
        tetplay("f\"unfvier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 8);
        tetplay("dreieins");
        sample=3;
        }, 19000);
        break;
    case 6:
        dia_show    ("screen", 23);
        tetplay("sechsvier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 8);
        tetplay("dreieins");
        sample=3;
        }, 25000);
        break;
    }
});

$tet("sample_4").click(function() {
    if(layouting_mode) return;
    if(shielding===1){
        alert("The robot crashed because you forgot to
           open the shielding. Restart the experiment and
           remember: Shielding needs to be opened before
           you change the sample!");
            location.reload();};
    switch (sample){
    case 0:
        dia_show    ("screen", 12);
        tetplay("viereins");
        sample=4;
        break;
```

```
        case 1:
            dia_show    ("screen", 3);
            tetplay("einsvier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 12);
            tetplay("viereins");
            sample=4;
            }, 16000);
            break;
        case 2:
            dia_show    ("screen", 7);
            tetplay("zweivier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 12);
            tetplay("viereins");
            sample=4;
            }, 17000);
            break;
        case 3:
            dia_show    ("screen", 11);
            tetplay("dreivier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 12);
            tetplay("viereins");
            sample=4;
            }, 18000);
            break;
        case 4:
            dia_show    ("screen", 15);
            tetplay("viervier");
            sample=0;
            break;
        case 5:
            dia_show    ("screen", 19);
            tetplay("f\"unfvier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 12);
            tetplay("viereins");
            sample=4;
```

```
        }, 19000);
        break;
    case 6:
        dia_show    ("screen", 23);
        tetplay("sechsvier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 12);
        tetplay("viereins");
        sample=4;
        }, 25000);
        break;
    }
});

$tet("sample_5").click(function() {
    if(layouting_mode) return;
    if(shielding===1){
        alert("The robot crashed because you forgot to
           open the shielding. Restart the experiment and
           remember: Shielding needs to be opened before
           you change the sample!");
            location.reload();};
    switch (sample){
    case 0:
        dia_show    ("screen", 16);
        tetplay("f\"unfeins");
        sample=5;
        break;
    case 1:
        dia_show    ("screen", 3);
        tetplay("einsvier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 16);
        tetplay("f\"unfeins");
        sample=5;
        }, 16000);
        break;
    case 2:
        dia_show    ("screen", 7);
```

```
            tetplay("zweivier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 16);
            tetplay("f\"unfeins");
            sample=5;
            }, 17000);
            break;
        case 3:
            dia_show    ("screen", 11);
            tetplay("dreivier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 16);
            tetplay("f\"unfeins");
            sample=5;
            }, 18000);
            break;
        case 4:
            dia_show    ("screen", 15);
            tetplay("viervier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 16);
            tetplay("f\"unfeins");
            sample=5;
            }, 19000);
            break;
        case 5:
            dia_show    ("screen", 19);
            tetplay("f\"unfvier");
            sample=0;
            break;
        case 6:
            dia_show    ("screen", 23);
            tetplay("sechsvier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 16);
            tetplay("f\"unfeins");
            sample=5;
            }, 25000);
            break;
```

```
    }
});

$tet("sample_6").click(function() {
    if(layouting_mode) return;
    if(shielding===1){
        alert("The robot crashed because you forgot to
           open the shielding. Restart the experiment and
           remember: Shielding needs to be opened before
           you change the sample!");
            location.reload();};
    switch (sample){
    case 0:
        dia_show    ("screen", 20);
        tetplay("sechseins");
        sample=6;
        break;
    case 1:
        dia_show    ("screen", 3);
        tetplay("einsvier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 20);
        tetplay("sechseins");
        sample=6;
        }, 16000);
        break;
    case 2:
        dia_show    ("screen", 7);
        tetplay("zweivier");
        setTimeout(function () {
        dia_show    ("screen", 20);
        tetplay("sechseins");
        sample=6;
        }, 17000);
        break;
    case 3:
        dia_show    ("screen", 11);
        tetplay("dreivier");
        setTimeout(function () {
```

```
            dia_show    ("screen", 20);
            tetplay("sechseins");
            sample=6;
            }, 18000);
            break;
        case 4:
            dia_show    ("screen", 15);
            tetplay("viervier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 20);
            tetplay("sechseins");
            sample=6;
            }, 19000);
            break;
        case 5:
            dia_show    ("screen", 19);
            tetplay("f\"unfvier");
            setTimeout(function () {
            dia_show    ("screen", 20);
            tetplay("sechseins");
            sample=6;
            }, 19000);
            break;
        case 6:
            dia_show    ("screen", 23);
            tetplay("sechsvier");
            sample=0;
            break;
        }
    });


    $tet("shieldin").click(function() {
        if(layouting_mode) {return;}
        else{
        if(shielding===0){
            switch(sample){
                case 0:
                    dia_show    ("screen", 24);
```

```
            tetplay("zu");
            shielding=1;
            break;
        case 1:
            dia_show    ("screen", 1);
            tetplay("einszwei");
            shielding=1;
            break;
        case 2:
            dia_show    ("screen", 5);
            tetplay("zweizwei");
            shielding=1;
            break;
        case 3:
            dia_show    ("screen", 9);
            tetplay("dreizwei");
            shielding=1;
            break;
        case 4:
            dia_show    ("screen", 13);
            tetplay("vierzwei");
            shielding=1;
            break;
        case 5:
            dia_show    ("screen", 17);
            tetplay("f\"unfzwei");
            shielding=1;
            break;
        case 6:
            dia_show    ("screen", 21);
            tetplay("sechszwei");
            shielding=1;
            break;   }}
else{
   switch(sample){
        case 0:
            dia_show    ("screen", 25);
            tetplay("auf");
            shielding=0;
```

```
                    break;
                case 1:
                    dia_show    ("screen", 2);
                    tetplay("einsdrei");
                    shielding=0;
                    break;
                case 2:
                    dia_show    ("screen", 6);
                    tetplay("zweidrei");
                    shielding=0;
                    break;
                case 3:
                    dia_show    ("screen", 10);
                    tetplay("dreidrei");
                    shielding=0;
                    break;
                case 4:
                    dia_show    ("screen", 14);
                    tetplay("vierdrei");
                    shielding=0;
                    break;
                case 5:
                    dia_show    ("screen", 18);
                    tetplay("f\"unfdrei");
                    shielding=0;
                    break;
                case 6:
                    dia_show    ("screen", 22);
                    tetplay("sechsdrei");
                    shielding=0;
                    break;   }}};
            });

    $tet("measure").click(function() {
    switch (true) {
    case  sample===0 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
       ==300:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947757'
           );
```

```
    break;
case  sample===0 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==300:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947756'
       );
    break;
case  sample===0 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==0.1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947758'
       );
    break;
case  sample===0 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==0.1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947759'
       );
    break;
case  sample===0 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947760'
       );
    break;
case  sample===0 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947756'
       );
    break;
case  sample===1 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==300:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947711'
       );
    break;
case  sample===2 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==300:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947717'
       );
    break;
case  sample===3 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==300:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947718'
```

```
        );
      break;
    case  sample===4 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==300:
      window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947719'
        );
      break;
    case  sample===5 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==300:
      window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947720'
        );
      break;
    case  sample===6 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==300:
      window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947721'
        );
      break;
    case  sample===1 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==0.1:
      window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947722'
        );
      break;
    case  sample===2 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==0.1:
      window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947724'
        );
      break;
    case  sample===3 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==0.1:
      window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947725'
        );
      break;
    case  sample===4 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==0.1:
      window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947727'
        );
      break;
    case  sample===5 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
      ==0.1:
```

```
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947728'
       );
    break;
case  sample===6 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==0.1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947729'
       );
    break;
case  sample===1 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947730'
       );
    break;
case  sample===2 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947731'
       );
    break;
case  sample===3 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947732'
       );
    break;
case  sample===4 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947733'
       );
    break;
case  sample===5 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947734'
       );
    break;
case  sample===6 && shielding===1 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947735'
       );
    break;
case  sample===1 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
```

```
    ==300:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947737'
        );
     break;
  case  sample===2 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
    ==300:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947738'
        );
     break;
  case  sample===3 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
    ==300:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947739'
        );
     break;
  case  sample===4 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
    ==300:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947740'
        );
     break;
  case  sample===5 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
    ==300:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947741'
        );
     break;
  case  sample===6 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
    ==300:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947742'
        );
     break;
  case  sample===1 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
    ==0.1:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947743'
        );
     break;
  case  sample===2 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
    ==0.1:
     window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947744'
        );
     break;
```

```
case  sample===3 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==0.1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947745'
       );
    break;
case  sample===4 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==0.1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947746'
       );
    break;
case  sample===5 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==0.1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947747'
       );
    break;
case  sample===6 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==0.1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947748'
       );
    break;
case  sample===1 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947749'
       );
    break;
case  sample===2 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947750'
       );
    break;
case  sample===3 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947751'
       );
    break;
case  sample===4 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
   ==1:
    window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947752'
       );
```

```
        break;
    case  sample===5 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
       ==1:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947753'
           );
        break;
    case  sample===6 && shielding===0 && dynget("messzeit.q0")
       ==1:
        window.open('https://tetfolio.fu-berlin.de/tet/947754'
           );
        break;
}});

})();
</script>
```

HTML-Code für radio buttons

```
<p> Measurement time</p>

<p>  <label><input checked="checked" name="q0" type=
   "radio" value="300" /> 300s</label></p>

<p><label>  </label><label><input name="q0" type="
   radio" value="0.1" /> 1h</label></p>

<p><label>  </label><label><input name="q0" type="
   radio" value="1" /> 6h</label></p>
```

Quiz-Tool

```
        {jsimport "/static/tetfolio/tools/quizTool.js"}
        <script>{$tetitem}.on("tet:beforeinit", function() { tettool_quizTool.
        <style type="text/css">
        select.showRight, select.showWrong,
```

```
input.showRight, input.showWrong {
border-width: 2px;
border-style: solid;
}
input.showRight, input.showWrong {
margin: 4px; /* default tetfolio: 5px */
}

div p.showRight {
color: #00DC00;
}
div p.showWrong {
color: red;
}
div select.showRight {
border-color: #00DC00;
}
div select.showWrong {
border-color: red;
}
div input.showRight {  /*  [type=text] */
border-color: #00DC00;
}
div input.showWrong {
border-color: red;
}
div label.showRight {  /*  [type=text] */
color: #00DC00;
}
div label.showWrong {
color: red;
}
</style>
```

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich bei Prof. Dr. Gunnar Friege und Dr. Jan-Willem Vahlbruch bedanken, zum einen für die Möglichkeit, diese Masterarbeit zu schreiben, zum anderen für die beratenden Gespräche, die mir jederzeit ermöglicht wurden.
Weiterhin möchte ich mich bei Dr. Jürgen Kirstein bedanken, der mir einen Einblick in die Welt der interaktiven Bildschirmexperimente gegeben hat sowie bei Dr. Sebastian Haase, der mir bei Fragen zum tet.folio weitergeholfen hat.
Mein Dank gilt auch Paul Hanemann, der sich um die technischen Probleme des Gamma-Lab gekümmert hat, sodass ich meine notwendigen Messungen und Aufnahmen überhaupt durchführen konnte. Außerdem möchte ich allen Mitarbeitern des IRS danken, durch die mir die Zeit am Institut erneut angenehm in Erinnerung bleibt.
Außerdem möchte ich meiner Familie danken für die Förderung während meiner Ausbildung, die zum Gelingen meines Studiums einen großen Anteil beigetragen hat.

Abschließend möchte ich meiner Frau Antonia danken, durch die mir die permanente Unterstützung zu Teil wurde, die diese Arbeit erst ermöglicht hat. Ich danke ihr für das Korrekturlesen, aber vor allem für die Zeit und Energie, die mir durch ihr gegeben wurde.