

Universität Kassel  
FB10 Mathematik und Naturwissenschaften  
Institut für Physik  
Heinrich-Plett-Str. 40  
34132 Kassel

Huda Otto  
Felsberger Str. 16  
34323 Malsfeld

**U N I K A S S E L**  
**V E R S I T Ä T**



# **Wissenschaftliche Hausarbeit für das 1. Staatsexamen**

**Konzeption einer virtuellen Lernumgebung zum Praktikumsversuch  
"Elektronenstoß-angeregte Fluoreszenzspektroskopie von Gasen"**

Huda Otto (30 25 29 23 84)  
Physik & Mathematik (L3)

15. Juni 2016

Didaktik der Physik

1. Prüferin: Prof. Dr. Rita Wodzinski  
AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung
2. Prüfer: Prof. Dr. Arno Ehresmann





Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für das Lehramt an Gymnasien im Fach **Physik**, eingereicht bei der Hessischen Lehrkräfteakademie - Prüfungsstelle Kassel-.

**Thema:**

Entwicklung einer virtuellen Lernumgebung zum Praktikumsversuch "Elektronenstoß-angeregte Fluoreszenzspektroskopie von Gasen"

**Verfasserin:**

Huda Otto

Felsberger Str. 16

34323 Malsfeld

**Gutachter/in:**

Prof. Dr. Rita Wodzinski, Prof. Dr. Arno Ehresmann



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung – Projektidee</b>	<b>1</b>
<b>2. Theoretischer Hintergrund und Stand der Forschung</b>	<b>3</b>
2.1. Empirische Studie zur virtuellen Vorbereitung im Physikpraktikum . . . . .	3
2.2. Potentiale/Grenzen virtueller Lernumgebungen und ihrer Erforschung . . . .	4
2.2.1. Probleme empirischer Erhebungen zu Interaktivität und Lernerfolg .	5
2.2.2. Motivierende Wirkung virtueller Lernumgebungen . . . . .	6
2.3. Einsatz von virtuellen Simulationen im Lernprozess . . . . .	6
2.4. Erstellung virtueller Lernumgebungen . . . . .	8
2.4.1. Design von virtuellen Lernumgebungen . . . . .	9
2.4.2. Praxisbeispiel einer virtuellen Lernumgebung . . . . .	10
<b>3. Vorgehensweise zur Konzeption der virtuellen Lernumgebung</b>	<b>15</b>
3.1. Fragestellung und Lernumgebungsdesign . . . . .	15
3.2. Ausgangssituation und Problemanalyse . . . . .	16
3.3. Interviewleitfaden zur Studierendenbefragung . . . . .	18
3.4. Verlaufsplanung der virtuellen Lernumgebung anhand eines Drehbuchs . .	20
3.5. Pilottest und Nachbearbeitung . . . . .	21
<b>4. Ergebnisse der Maßnahmen zur Konzeption der virtuellen Lernumgebung</b>	<b>23</b>
4.1. Ergebnisse der leitfadengestützten Studierendenbefragung . . . . .	23
4.2. Vorstellung des Drehbuchs und der Testversion . . . . .	26
4.3. Ergebnisse des formativen Pilottests . . . . .	31
4.4. Optimierung der virtuellen Lernumgebung . . . . .	32
<b>5. Reflexion der Untersuchungsmethode</b>	<b>39</b>
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>41</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>43</b>
<b>A. Vorbereitungsunterlagen zum Praktikumsversuch</b>	<b>49</b>
<b>B. Interviewleitfaden</b>	<b>57</b>
<b>C. Transkript zum leitfadengestützten Interview</b>	<b>61</b>

<b>D. Transkript zum formativen Interview</b>	<b>79</b>
<b>E. Bachelorthesis</b>	<b>85</b>

# 1. Einleitung – Projektidee

Das 21. Jahrhundert wird nicht ohne Grund das Informationszeitalter genannt. Als eine dessen einflussreichen Errungenschaften des 20. Jahrhunderts ist der Computer aus der Arbeits- und Alltagswelt kaum, wenn nicht sogar gar nicht, zu entbehren. Auch in der Hochschuldidaktik wird dessen Einsatz diskutiert (z.B. Issing, 2002; Kammerl, 2000; Klimsa und Issing, 2011; Schulmeister, 2001).

Im Zuge didaktischer Auseinandersetzungen stellen sich hinsichtlich der Nutzung virtueller Lernumgebungen lernrelevante Fragen, wie:

- Welches Potenzial haben virtuelle Lernumgebungen Lernprozesse zu veranlassen? (vgl. Issing, 2002)
- Wie sollte ein virtuelles Lernarrangement aufgebaut sein, damit es sich positiv auf den Lernprozess auswirkt?

Die Beantwortung dieser Fragen auf dem heutigen Kenntnisstand bildet die Grundlage, auf denen in dieser Arbeit eine virtuelle Lernumgebung zur Fernfokuselektronenquelle mit angeschlossenem Fluoreszenzspektrometer entwickelt wird. Dieser Aufbau wird in der Arbeitsgruppe "Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung" an der Universität in Kassel zu Forschungs- sowie Lehrzwecken benutzt. Besonders ist hierbei, dass einige Messungen der Studierenden<sup>1</sup> nicht nur zu Lehrzwecken aufgenommen werden, sondern tatsächlich den Physikern der Arbeitsgruppe nutzen. Im Rahmen meiner Bachelorthesis (siehe Anhang E Bachelorthesis) habe ich diese Fernfokuselektronenquelle mit angrenzendem Fluoreszenzspektrometer genutzt um ein wellenlängen-aufgelöstes Emissionsspektrum von Luft zu erstellen. Darauf aufbauend ist ein Praktikumsversuch für Studierende der Physik und Nanostrukturwissenschaften entstanden, in dem das gleiche Spektrum aufgenommen wird.

Bei der Durchführung des Praktikumsversuchs werden mehrere Parameter – eine Heizstromstärke, Potentiale an Wehneltzylindern, eine Spulenstromstärke, ein Potential an einer Elektrode, die Position eines Reflexionsgitters und eine Potentialdifferenz an einem Ein-Photonen-Detektor – variiert. Das Labor sowie der reale Versuchsaufbau sind für die Studierenden im Allgemeinen neu. Sie sind daher angehalten die Bauteile der Apparatur zu identifizieren, wobei es zu Verwechslungen und Fehlern kommen kann. Außer-

---

<sup>1</sup>Um den Lesefluss zu begünstigen wird in dieser Arbeit auf die zusätzliche Formulierung anderer Geschlechterformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten, soweit nicht anders erschießbar, für jederlei Geschlecht.

dem bleiben Bauteile – ein Heizdraht, drei Wehneltzylinder, eine Spule, eine Anode, ein Reflexionsgitter und ein Faraday-Becher – vor den Augen der Studierenden verborgen. Darüber hinaus müssen die Studierenden Sicherheitshinweise zu ihrem eigenen Schutz, aber auch zum Schutz der Versuchsanordnung, beachten. In einer virtuellen Lernumgebung können sie ohne reale, einflussreiche Konsequenzen zu befürchten den Versuch simulieren (Schulmeister, 2002).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher eine virtuelle Lernumgebung entwickelt, anhand derer Studierende den Versuchsaufbau virtuell bedienen können, sodass sie bei der Konstruktion von Vorstellungen über das Innere der Apparatur unterstützt werden sowie vor der realen Durchführung mit den Funktionen relevanter Bauteile als auch mit der Wirkung von Variationen der Parameter vertraut werden. Das Hauptanliegen der vorliegenden Arbeit ist es aus didaktischer Sicht die den Konzeptionsprozess begleitenden Maßnahmen darzustellen und dabei Schwierigkeiten der Studierenden zu identifizieren sowie die Attraktivität der virtuellen Lernumgebung aus der Lernendenperspektive zu überprüfen.

## 2. Theoretischer Hintergrund und Stand der Forschung

Dieses Kapitel umfasst die vier Abschnitte. Zunächst wird in Abschnitt 2.1 Empirische Studie zur virtuellen Vorbereitung im Physikpraktikum eine empirische Studie zur Untersuchung vorgestellt, die einer ähnlichen Fragestellung nachgeht wie sie dieser Arbeit zugrunde liegt. Anschließend wird in 3.2 Ausgangssituation und Problemanalyse, auf den situativen Kontext (vgl. Strittmatter und Mauel, 1997) des Praktikumsversuch eingegangen. Dann folgt die Darstellung von 2.2 Potentiale/Grenzen virtueller Lernumgebungen und ihrer Erforschung. In 2.3 Einsatz von virtuellen Simulationen im Lernprozess wird der Simulationsbegriff in Zusammenhang mit dem Modellbegriff gebracht und es werden drei Methoden zum Einsatz von Simulationen nach Dick (2000) vorgestellt. Das Ende des Kapitels säumt der Abschnitt 2.4 Erstellung virtueller Lernumgebungen, währenddessen auf den Designprozess virtueller Lernumgebungen eingegangen wird.

### 2.1. Empirische Studie zur virtuellen Vorbereitung im Physikpraktikum

Im diesem Abschnitt sind die Zwischenergebnisse einer Studie des Projekts *„eLearning und eManagement in der Physikausbildung (eLaP)“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 295), das zum Ziel hat die *„Lernwirksamkeit des Physikpraktikums für Nebenfachstudierende“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 295) zu fördern, erläutert. Die Untersuchung sollte die Frage beantworten, ob *„[...] multimedial vermittelte Kenntnisse eines Versuchsaufbaus und virtuelle Handlungsmöglichkeiten die Auseinandersetzung mit dem Versuchsthema [fördern]“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 295).

Bei dem Untersuchungsformat handelt es sich um ein *„Interventions-/Vergleichsgruppen-Design“* (Fricke & Schecker, 2012, S.295) bei dem eine Gruppe (n=29) Papier-Skripte zur Vorbereitung und eine zweite Gruppe (n=29) Hypermedia-Skripte zur Vorbereitung erhielten (Fricke & Schecker, 2012). Dazu wurde je ein *„Hypermedia-Skript“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 295) zu den Versuchen *„Frauenhofersche Beugung und Interferenz“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 295), *„Dünne Linsen und Augenmodell“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 295) sowie *„Stirling-Motor“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 295) erstellt und auf die beschriebene Weise evaluiert. Diese bestehen aus den gleichen Informationen wie ein

Papier-Skript und zusätzlich zur freiwilligen Bearbeitung werden z.B. Simulationen und interaktive Bildschirmexperimente angeboten (Fricke & Schecker, 2012).

Interaktive Bildschirmexperimente<sup>1</sup> sind manipulierbare, virtuelle Animationen, die

[...] auf der Basis von Hunderten hochaufgelöster Photos erstellt wurden. Durch das photorealistische Aussehen erhalten die Experimente einen Anschein von Realität, der sogar Nebeneffekte, wie Fehler, falsche Ablenkungen und Lichtbrechung einschließt [...]. (Schulmeister, 2001, S. 351)

Im Vergleich mit interaktiven Bildschirmexperimenten bieten Simulationen die Möglichkeit in der Apparatur stattfindende Prozesse darzustellen, was bei dem EIFS-Versuch vorteilhaft sein kann, da äußerliche Veränderungen rar sind.

Die an die Vorbereitung anschließende, reale Versuchsdurchführung durch die Studierenden wurde videografiert und im Anschluss an diese Durchführung wurden halbstrukturierte Interviews mit den Probanden geführt (Fricke & Schecker, 2012).

Die Analyse der Interviews ergab einerseits, dass von den Studierenden die Auseinandersetzung mit den interaktiven Bildschirmexperimenten erst zu einer – für sie – befriedigenden Vorstellung über den Versuchsaufbau führte und andererseits wurde es von ihnen positiv empfunden, die Wirkung des Variierens von Parametern zu erfahren, was nach Fricke und Schecker (2012) zur Reduktion von Zeit- und Leistungsdruck führte. *„Es scheint aber für [...] [die] Nutzung [der interaktiven Lernangebote] ein externer Impuls nötig zu sein“* (Fricke & Schecker, 2012, S. 297).

Zusammenfassend kommt die Studie zu dem Ergebnis, dass interaktive Experimente in einer virtuellen Lernumgebung von Studierenden als besonders verständnisfördernd empfunden werden, aber erst eine externe Aufforderung die Studierenden veranlasst diese zu nutzen (Fricke & Schecker, 2012). Dass Studierenden interaktive Angebote als verständnisfördernd empfinden (Fricke & Schecker, 2012), deutet daraufhin, dass Interaktivität eine in didaktischer Hinsicht wichtige Eigenschaft virtueller Lernumgebungen ist (Fricke & Schecker, 2012).

## 2.2. Potentiale/Grenzen virtueller Lernumgebungen und ihrer Erforschung

In diesem Abschnitt werden generelle Probleme bei der Untersuchung von virtuellen Lernumgebungen thematisiert (siehe Abschnitt 2.2.1 Probleme empirischer Erhebungen zu Interaktivität und Lernerfolg) und im Anschluss daran wird auf die potentiell motivierende Wirkung virtueller Lernumgebungen eingegangen (siehe Abschnitt 2.2.2 Motivierende Wirkung virtueller Lernumgebungen).

---

<sup>1</sup>Beispiele Interaktiver Bildschirmexperimente sind z.B. online zugänglich auf der Website der Physik Didaktik Arbeitsgruppe der Freien Universität Berlin (Oberländer, 2015)



### 2.2.1. Probleme empirischer Erhebungen zu Interaktivität und Lernerfolg

Empirische Untersuchungen, welche belastbare Indizien zur These einer positiven Relation zwischen Interaktion und Lernerfolg liefern scheinen selten zu sein (Schulmeister, 2002). Als Gründe dafür nennt Schulmeister (2002) generelle Probleme bei der Erforschung von digitalen Medien. Ein generelles Problem empirischer Untersuchungen zum Computerlernen ist, dass Ergebnisse wegen der schnellen technischen Veränderung meist nicht länger als fünf Jahre gültig sind (Schulmeister, 2002). Weiterhin beklagt er, dass *„viele Studien unvergleichbare Methoden auf methodisch zum Teil unfaire Weise miteinander vergleichen“* (Schulmeister, 2002, S. 387). Als weitere Gründe für die uneinheitlichen Ergebnisse zählt er auf, dass Studien nicht mit repräsentativen Stichproben ausgestattet waren und der Lernerfolg von zu vielen Variablen abhängt, die bei den Untersuchungen unberücksichtigt blieben, was zur falschen Zuordnung von Parametern führte (Schulmeister, 2002).

Ein Beitrag, welcher der Frage nachgeht, *„ob und in welcher Weise digitale Medien Wissenserwerbsprozesse unterstützen können“* (Brünken & Seufert, 2011, S. 113), nimmt wie folgt Stellung:

Ausgehend von kognitionspsychologischen Modellen und basierend auf einer Reihe empirischer Forschungsarbeiten lässt sich die Frage teilweise positiv beantworten: Unter spezifischen Bedingungen können medial vermittelte Informationen den Wissenserwerb fördern. (Brünken & Seufert, 2011, S. 113)

Interaktivität kann also einen Lernerfolg induzieren, was mit der konstruktiven Auffassung vom Lernen, als einem aktiven, selbstgesteuerten, konstruktiven und situativen Prozess (Reinmann & Mandl, 2006), vereinbar ist.

Bezüglich der Diskussion der Bedeutung von konstruktiven und instruktiven Methoden in virtuellen Lernumgebungen, stellen Kerres, Ojstersek, und Stratmann (2011) allerdings in den Vordergrund, dass bei der Gestaltung virtueller Lerngelegenheiten sowohl konstruktive als auch instruktive Ansätze berücksichtigt werden sollten:

Die Aussagen und Erkenntnisse verschiedener [didaktischer] Ansätze bieten einen Fundus, der im didaktischen Design in seiner Gänze berücksichtigt werden sollte. Die grundsätzliche Präferenz für bestimmte lerntheoretische Modelle oder didaktische Methoden, wie z.B. einen konstruktivistischen Ansatz, wären demnach in Frage zu stellen. Da es nicht möglich erscheint, das eine richtige Modell zu benennen, empfiehlt es sich, verschiedene Optionen bei der Gestaltung von Lernangeboten zu prüfen. (Kerres u. a., 2011, S. 266)

Es sollte also keine ausschließliche Festlegung auf konstruktive Methoden beim virtuellen Lernen stattfinden Kerres u. a. (2011). Ein Vorteil instruktiver Methoden kann z.B. bei der Navigation und Benutzerführung Anwendung finden: Benutzer fühlen sich häufig verloren in virtuellen Umgebungen (Gay und Mazur, 1991; Haack, 1997), was zu extrinsischer kognitiver Belastung führen kann (Sweller, 2005).

Um von verschiedenen Methoden zu profitieren können Methodenwechsel vorgenom-

men werden, wie sie z.B. bei hybriden Lernarrangements durch den Einsatz von virtuellen Lernphasen als auch traditionellen Präsenzphasen mit sozialer Interaktion auftreten (Reinmann & Mandl, 2006). Die aus dieser Arbeit resultierende Lernumgebung bestehend aus dem Praktikumsversuch und der virtuellen Lernumgebung ermöglicht den Studierenden eine Abwechslung von einer virtuellen Lernphase und einer Präsenzphase im Labor, was Lernende nach der Erfahrung von Reinmann und Mandl (2006) begrüßen.

### 2.2.2. Motivierende Wirkung virtueller Lernumgebungen

Trotz der ernüchternden Probleme hinsichtlich empirischer Studien zur Erforschung computergestützter Lernumgebungen (Schulmeister, 2002), scheinen computergestützte Lernumgebungen besonders attraktiv für Lernende zu sein und das Potential einer spielerischen Beschäftigung in der Freizeit zu bergen (Schulmeister, 2002), so kann *„inzidentell und implizit gelernt [werden]“* (Schulmeister, 2002, S. 414). Ebenso nennt Haack (1997), neben Individualisierungsmöglichkeiten, die Motivation der Lernenden computerunterstützte Lernumgebungen zu nutzen als positiven Aspekt zum Einsatz dieser.

Ein empirisch fundierter Effekt virtueller Lernumgebungen ist, dass misserfolgsorientierte Lerner in virtuellen Lernumgebungen weniger Angst haben Fehler zu machen, da sie keine soziale Bloßstellung zu befürchten haben (Schulmeister, 2001).

[...] [Die] Anonymität und Sanktionsfreiheit bei der Interaktion mit Programmen spielt also eine ganz wesentliche Rolle für die Lernmotivation der Lernenden. (Schulmeister, 2001, S. 325)

Die Angst Fehler zu machen kann z.B. dadurch impliziert werden, dass Versuchsaapparaturen und Personen bei falscher Bedienung eines Versuchsapparates Schaden nehmen können, was gerade in einem echten Forschungslabor der Fall sein kann. Daher liegt die Überlegung nahe, dass eine virtuelle Lernumgebung Lernprozesse anstoßen kann, die in der Realität durch diese Angst verhindert werden (vgl. Schulmeister, 2001).

### 2.3. Einsatz von virtuellen Simulationen im Lernprozess

Ein reales Experiment kann als eine wissenschaftliche Forschungsmethode zur empirischen Erkenntnisgewinnung verstanden werden (Iske, 2003). Zur Erkenntnisgewinnung können zwar Simulationen auch beitragen (Berger, 2010), allerdings können sie empirische Experimente nicht ersetzen.

Ein entscheidender Unterschied liegt in den jeweiligen Objektdarstellungen zwischen denen eine Abbildung stattfindet (Iske, 2003). Im Gegensatz zum Experiment findet bei einer Simulation eine Übertragung aus dem *„originalen Gegenstandsbereich“* (Iske, 2003, S. 4) auf eine andere Objektmenge statt, was *„notwendigerweise eine Reduktion auf bestimmte Aspekte eines Objektes oder Prozesses [zur Folge hat] [...]“* (Kammerl, 2000, S. 18).

Aus der Kontrolle der Simulation kann daher nicht auf die Kontrolle des Experiments geschlossen werden (Kammerl, 2000), was in reflexiven Prozessen von den Lernenden behandelt werden kann (Iske, 2003). Ebenso kann die „[...] zugrundeliegende Simulationslogik zur kritischen Reflexion [der Lernenden] beitragen“ (Kammerl, 2000, S. 18). Die Verbindung von einem realen Versuch mit einer virtuellen Simulation kann lernförderlich sein, da die Vorteile zweier Medien – Simulation und Realexperiment – genutzt werden können (vgl. Kerres, 2000): Die Simulation sorgt für eine modellhafte Reduktion auf wesentliche Inhalte, was dem didaktischen Prinzip der Reduktion von Komplexität entsprechen kann (Iske, 2003), während im Experiment die Realität vollständiger abgebildet wird (Kammerl, 2000). Bei einer solchen Verbindung handelt es sich um ein sogenanntes hybrides Lernarrangement, was – entgegen einer Ersetzung von traditionellem Lernen durch virtuelle Lernumgebungen – eine Verbindung von traditionellem- und computerunterstütztem Lernen meint (Kerres, 2000).

Meder (1994) stellt den Simulationsbegriff vor, wie er in der Informatik definiert ist und entwickelt darauf aufbauend einen didaktischen Begriff (Iske, 2003): „In didaktischer Hinsicht, ist die Simulation die komplexe Einheit von veranschaulichendem Modell und lern-technologisch manipuliertem Experiment“ (Meder, 1994, S. 120). Schulmeister (2002) beschreibt Simulationen als „[...] dynamische Modelle von Apparaturen, Prozessen und Systemen.“ (Schulmeister, 2002, S. 375). Beide Autoren verwenden den Modellbegriff um den Simulationsbegriff zu beschreiben.

Ein Modell ist nach Leisen (2004) eine „objekthafte, bildhafte, symbolische oder begriffliche Darstellung eines realen Objektes oder Vorgangs“ (Leisen, 2004, S. 1). Eine Aussage über den Wahrheitsgehalt eines Modells kann nicht getroffen werden, vielmehr ist der Grad an Zweckmäßigkeit eine Eigenschaft jeden Modells (Leisen, 2004). Modelle werden entwickelt um Theorien aufzustellen, anzuwenden und weiter zu entwickeln (Leisen, 2004). Wie schon oben durch die Definitionen des Simulationsbegriffs angedeutet wurde, ermöglichen Modelle die Reduzierung der Wirklichkeit um bestimmte Aspekte zu betonen (vgl. Leisen, 2004).

Die Definitionen von Meder (1994) und Schulmeister (2002) betonen den charakteristischen dynamischen bzw. manipulierbaren Charakter von Simulationen. Aus didaktischer Sicht stellt sich die Frage: Wie kann diese Eigenschaft für didaktische Zwecke verwendet werden? Dick (2000) stellt dazu drei an dem modellierenden Charakter von Simulationen orientierte Methoden zur Nutzung von Simulationen vor: Die Modellkonstruktion, die Modellerforschung und den Realitätsersatz (siehe Abb. 2.1). Aus Abbildung 2.1 wird deutlich, dass die Modellkonstruktion sich von der -erforschung und dem Realitätsersatz unterscheidet, da sie von einem Realitätsausschnitt ausgeht (Dick, 2000). Die beiden anderen Methoden basieren auf einem vorgegebenen Modell und dem Beobachten des Modellverhaltens anhand einer Simulation (Dick, 2000). Die Modellerforschung und die -konstruktion gehen einen Schritt weiter als der Realitätsersatz, da sie die Erforschung der Modellstruktur von der Lernenden erfordert (Dick, 2000). Sie werden nämlich ange-

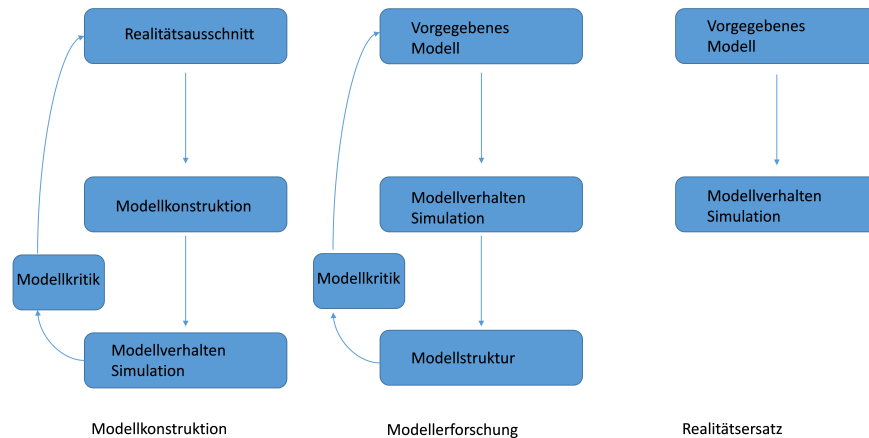


Abbildung 2.1.: Methoden zur Simulationsnutzung nach Dick (2000).

halten zu erforschen, wie das Modell hinter der Simulation aufgebaut ist um dieses dann zu kritisieren (Dick, 2000).

Die Modellerforschung und die -konstruktion unterscheiden sich dadurch, dass bei der Erforschung ein Modell vorgegeben wird, wo hingegen bei der Konstruktion ein eigenes Modell von den Lernenden entwickelt werden kann (Dick, 2000).

Beim Realitätsersatz besteht die Gefahr, dass die Simulation mit dem realen Experiment gleichgesetzt wird (Dick, 2000). Da es sich bei der hier entwickelten virtuellen Lernumgebung eingebettet in die Durchführung des Praktikumsversuchs um eine hybride Lernform handelt, ist es wenig bedenklich die Simulationen nach der Methode des Realitätsersatzes aufzubauen. Denn anhand der Gegenüberstellung von Simulation und realem Experiment kann zur kritischen Betrachtung des Modells angestoßen werden, womit die Gesamtheit eines solchen Lernarrangements methodisch der Modellerforschung zugeordnet werden kann. Mit der Kombination aus realer und virtueller Versuchsdurchführung soll realisiert werden, was Kerres (2000) beschreibt:

[...] es geht nicht um die Überlegenheit bestimmter Medien, sondern um deren Kombination. Es geht also letztlich darum, die Vorteile möglicher Varianten so zu verknüpfen, daß pädagogische Ziele ebenso wie Kriterien der Effizienz soweit wie möglich erreicht werden können. (Kerres, 2000, S. 24)

### 2.4. Erstellung virtueller Lernumgebungen

Verschiedene Beiträge (z.B. Mandl und Winkler, 2002; Strzebkowski, 1997) liefern einander überschneidende Anforderungen an ein modernes Lernprogramm:

Lernen soll in einem authentischen Kontext, wobei der Lerngegenstand in eine komplexe, realistische Situation eingebettet wird stattfinden (Mandl und Winkler, 2002; Strzebkowski, 1997). Weiter sollen „multiple Kontexte“ (Mandl & Winkler, 2002, S. 144), die eine

Konfrontation der Lernenden mit „*mehreren Perspektiven und Kontexten eines Sachverhaltes*“ (Strzebkowski, 1997, S. 271) erzeugen, verwendet werden.

Die Beiträge von Mandl und Winkler (2002) sowie Strzebkowski (1997) ergänzen einander durch die folgenden Aspekte: Virtuelle Lernumgebungen sollen

- den Erwerb sozialer Kompetenzen fördern (Mandl & Winkler, 2002),
- mit instruktiver Unterstützung versehen sein, was bedeutet, dass Lernende mit den notwendigen Ressourcen ausgestattet werden und bei Problemen die Möglichkeit haben Hilfe zu beanspruchen (Mandl & Winkler, 2002),
- vorwiegend eine „*explorative und assoziative Vorgehensweise bei der Erschließung neuer Informationen ermöglichen*“ (Strzebkowski, 1997, S. 271),
- aktives Lernen durch Handeln initiieren (Strzebkowski, 1997),
- „*die Möglichkeit zur Konstruktion eigener Inhalte und Medien-Welten*“ (Strzebkowski, 1997, S. 271) bieten sowie
- zur Selbstreflexion über die eigenen Lern- und Lösungsstrategien anstoßen (Strzebkowski, 1997).

Auch hier ist erkennbar, dass als „*[...] grundlegende didaktische Strategie [...] bewährte Arbeitsschritte aus der allgemeinen Didaktik zu empfehlen [sind]*“ (Issing, 1997, S. 205). Schlussfolgernd kann bei der Erstellung von virtuellen Lernumgebungen aus dem gesamten Repertoire didaktischer Methoden geschöpft werden (Kerres u. a., 2011).

### 2.4.1. Design von virtuellen Lernumgebungen

Die Erforschung virtueller Lernarrangements umfasst u.a. die Entwicklung von Instruktionsdesigns zur Erstellung von virtuellen Lernumgebungen, die Entwicklern als Hilfe und Richtlinie dienen sollen. Im Folgenden werden zwei Arbeiten von Issing (1997) bzw. T. Mayer (2001) vorgestellt, die einen Überblick über die Vielzahl an Instruktionsdesigns geben bzw. eine Synthese aus diesen entwickeln.

Issing (1997) schreibt dazu: „*Inzwischen gibt es Hunderte von Modellen des Designs von Instruktions-Systemen (ISD) bzw. des systematischen Instruktionsdesigns (ID) in der Literatur.*“ (Issing, 1997, S. 201) und extrahiert aus deren Vergleich die Hauptarbeitsschritte des Instruktionsdesigns – die Analyse, die Planung, die Entwicklung, den Einsatz der virtuellen Lernumgebung sowie deren Evaluation und Revision.

T. Mayer (2001) vergleicht und ergänzt Schemata des Entwicklungsprozesses aus allgemeinen, grundlegenden Richtlinien und dem systematischen Instruktionsdesign verschiedener Autoren<sup>2</sup> mit lerner-zentrierten Entwicklungsleitfäden<sup>3</sup> um einen möglichst

---

<sup>2</sup>Banathy (1973), Dick und Carey (1990) und Tennyson (1994) zitiert nach T. Mayer (2001)

<sup>3</sup>von Piskurich (1993), Gabele und Zürn (1993) sowie Issing (1997) zitiert nach T. Mayer (2001)

vollständigen Entwicklungsprozess darzustellen. Das so entstandene Entwicklungsdesign wurde in dieser Arbeit verwendet (siehe Abschnitt 3.1 Fragestellung und das Lernumgebungsdesign nach Mayer).

Des Weiteren gibt Issing (1997) einen kurzen Überblick über kritische Stimmen zum Instruktionsdesign, wobei der Hauptkritikpunkt lautet: Instruktionsdesigns verleiten zum linearen, starren und kaum dynamischen Vorgehen und sind zu stark am Instruktionsparadigma orientiert (Edmonds, Branch, & Mukherjee, 1994). Ebenfalls kritisiert Schulmeister (2002) die Design-Richtlinien und meint: *„Ich habe den Eindruck, daß man mit guten Beispielen mehr bewirken kann als mit allgemeinen Design-Guidelines“* (Schulmeister, 2002, S. 386).

In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine Synthese aus der Orientierung am Instruktionsdesign nach T. Mayer (2001) und der Orientierung an einem Praxisbeispiel versucht. Als Praxisbeispiel diente eine virtuelle Lernumgebung zur Bewegung von Elektronen im elektrischen und magnetischen Feld (Richtberg & Girwidz, 2013b), die von der Physikdidaktik-Arbeitsgruppe an der Ludwigs-Maximilians-Universität in München erstellt und evaluiert wurde (Richtberg & Girwidz, 2013b). Die in diesem Praxisbeispiel verwendeten Designelemente werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

### 2.4.2. Praxisbeispiel einer virtuellen Lernumgebung

Richtberg und Girwidz (2013b) entwickelten eine browserbasierte Lernumgebung zum Thema *„Elektronenkanone sowie Ablenkung von Elektronen in elektrischen und magnetischen Feldern“* (Richtberg & Girwidz, 2013b, S. 1) mit dem Ziel eine *„Funktionsgleichung zur mathematischen Beschreibung [der Elektronenablenkung im elektrischen Feld] zu entwickeln“* (Richtberg & Girwidz, 2013b, S. 1) und testeten diese in einer Vorstudie mit Studierenden (Richtberg & Girwidz, 2013b). Eine Übersicht über die Bildschirmgestaltung dieser virtuellen Lernumgebung ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Bei der Erstellung haben Richtberg und Girwidz (2013b) verschiedene Design-Prinzipien verwendet, von denen sie annehmen, dass diese den Lernprozess begünstigen. Dazu zählen:

- Das Segmentierungsprinzip (R. E. Mayer, 2005), nach dem Lernen durch das Aufteilen des Inhalts in mehrere Sektionen erleichtert wird. Dies wird durch die linke Navigationsleiste verwirklicht (Richtberg & Girwidz, 2013b, S. 2).
- Die Beschränkung der variierbaren Parameter auf die Beschleunigungs- und die Ablenkspannung (Fund, 2007; Richtberg und Girwidz, 2013b).
- Die numerische Angabe von un- und abhängigen Variablen (Fund, 2007; Richtberg und Girwidz, 2013b).
- Die Bereitstellung von optischem Feedback durch eine Drag-and-Drop-Zuordnungsaufgabe, die zur Reflexion und Selbstkontrolle anregt (Richtberg & Girwidz, 2013b).

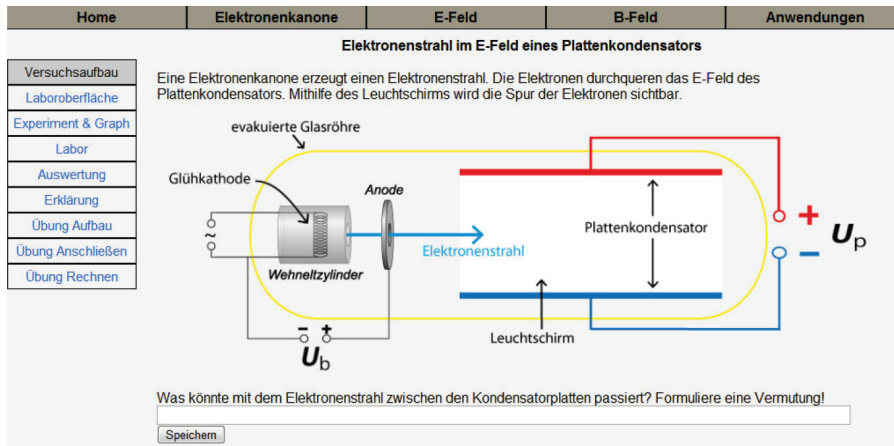


Abbildung 2.2.: Übersicht über die Bildschirmaufteilung und Bearbeitungsabschnitte der Lernumgebung von Richtberg und Girwidz (2013b).

- Der Einsatz multipler Repräsentationen, in Form der Darstellung nicht sichtbarer Vorgänge sowie von Abhängigkeiten innerhalb eines Systems (Park und Hopkins, 1992; Richtberg und Girwidz, 2013b).
- Dynamische Darstellungen ziehen Aufmerksamkeit auf sich und vermögen zu beschreiben, was sprachlich schwer in Worte zu fassen ist (Park und Hopkins, 1992; Richtberg und Girwidz, 2013b).

Multiple Repräsentationen können in Anlehnung an Ainsworth (1999) Lernende auffordern die unterschiedlichen Repräsentationen zu vergleichen und so deren Gemeinsamkeiten zu erkennen, was sich positiv auf die Verarbeitungstiefe auswirken kann (Richtberg & Girwidz, 2013b). Ebenfalls können multiple Repräsentationen die kognitive Flexibilität fördern (de Jong u. a., 1998). Diese Potentiale sind allerdings vor dem Hintergrund der kognitiven Voraussetzungen der Lernenden zu betrachten (Richtberg & Girwidz, 2013b). So können viele, verschiedene Darstellungen die kognitiven Kapazitäten überbeanspruchen (vgl. Sweller, 2005).

Um zu überprüfen, inwiefern der Einsatz der o.g. Design-Prinzipien in der virtuellen Lernumgebung ihren Zweck erfüllen, ist die Evaluation einer virtuellen Lernumgebung sinnvoll. Daher ist es positiv, dass die hier vorgestellte Lernumgebung evaluiert wurde. Die Vorstudie wurde von Richtberg und Girwidz (2013b) mit dem Ziel durchgeführt

[...] grundlegende Nutzungsbedingungen der Lernumgebung zu überprüfen und mögliche Bedien- und Verständnisschwierigkeiten zu identifizieren [...] [Dabei lag ein] Blickpunkt [...] auf der Frage nach der generellen Nutzungsakzeptanz des interaktiven Experiments in der Online-Umgebung. (Richtberg & Girwidz, 2013b, S. 5)

Getestet wurde die Lernumgebung von Studierenden, von denen keine persönlichen Daten erhoben wurden (Richtberg & Girwidz, 2013b).

Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass der in der virtuellen Lernumgebung

zu leistende Modellierungsprozess weiterer Instruktion und zusätzlichem Feedback bedürfen (Richtberg & Girwidz, 2013b). Richtberg und Girwidz (2013b) erhoffen sich durch eine Umplatzierung und Änderung von Hilfen auf der Grundlage ihrer Ergebnisse deren effektivere Nutzung, da die zur Verfügung gestandenen Hilfen kaum oder erst spät (bezogen auf den Modellierungsprozess) verwendet wurden.

Zum anderen hat sich das Drag-and-Drop-Verfahren (siehe Abb. 2.3) auffordernd auf die Probanden ausgewirkt (Richtberg & Girwidz, 2013b). Auch nach falscher Zuordnung wurde die Aufgabe weiter ausgeführt bis die richtige Lösung erzielt war (Richtberg & Girwidz, 2013b). Insgesamt war die Anzahl an Nutzeraktivitäten hoch, womit „[...] die erste Voraussetzung für den Lernerfolg gegeben [ist]“ (Richtberg & Girwidz, 2013b, S. 5).

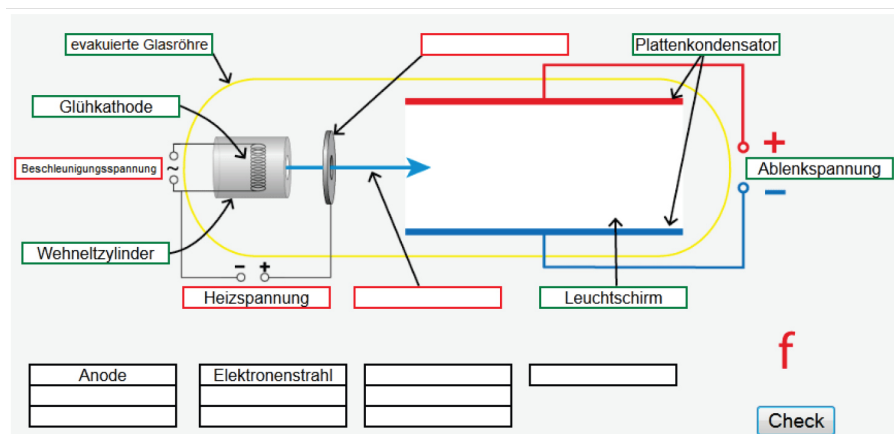


Abbildung 2.3.: Bildschirm bei der Überprüfung zum Versuchsaufbau. (Richtberg & Girwidz, 2013b)

Die optimierte Version der evaluierten Lernumgebung ist kostenlos zugänglich<sup>4</sup> (Richtberg & Girwidz, 2016). Die Startseite der dort zugänglichen Lernumgebung ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Im Vergleich mit Abbildung 2.2 wird deutlich, dass die Übersicht über die Bildschirmaufteilung weitestgehend beibehalten wurde. Außerdem wurde die Startseite durch eine beschriftete Fotografie ergänzt, die eine weitere Repräsentation darstellt. Die vorgestellte Lernumgebung ermöglicht es den Versuch virtuell nachzuempfinden (Richtberg & Girwidz, 2013b), was nach der Einteilung von Dick (2000) einer Modellkonstruktion (siehe Abschnitt 2.3 Einsatz von virtuellen Simulationen im Lernprozess) entspricht, da die Lernenden (in begrenzter Weise) die Möglichkeit haben eigene Ideen auszuprobieren.

Es ist denkbar, die Bearbeitung der Lernumgebung mit der Durchführung des realen Experiments zu einer hybriden Lernumgebung zu kombinieren um den Lernenden einerseits durch den Einsatz der virtuellen Lernumgebung die Möglichkeit der selbständigen, mathematischen Beschreibung der Elektronenablenkung im E-Feld zu ermöglichen und

<sup>4</sup>Zugriff 7. April 2016 unter <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/e-feld/hypothesen/Versuchsaufbau.php>, Richtberg und Girwidz (2016)



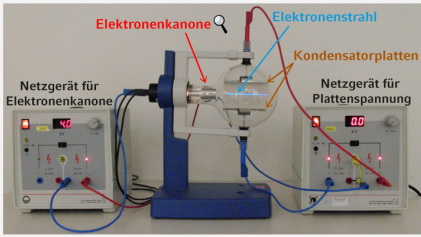
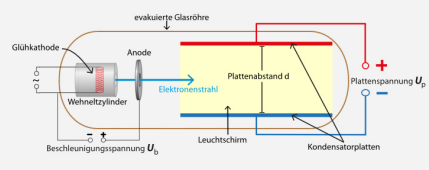
Hypothesen	Experiment	Kräfte-betrachtung	Bahn hinter Kondensator	Wurfanalogie	Übungen
<p>Versuchsaufbau</p> <p>Hypothesen I</p> <p>Das Experiment</p> <p>Hypothesen prüfen</p> <p>Hypothesen II</p> <p>Hypothesen prüfen</p> <p>Zusammenfassung</p>	<p><b>Wie bewegen sich Elektronen in einem E-Feld, das senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung steht?</b></p> <p>Hier wählt man folgenden Aufbau: Eine Elektronenkanone erzeugt einen Elektronenstrahl. Dieser tritt in das E-Feld des Plattenkondensators ein. Mithilfe eines Leuchtschirms wird dabei die Bahn der Elektronen sichtbar gemacht.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p style="text-align: right;"><a href="#">weiter</a></p>				

Abbildung 2.4.: Startseite mit beschrifteter Fotografie. Richtberg und Girwidz, 2016

andererseits nicht die Ansicht zu unterstützen, dass die Datenqualität aus dem Realexperiment mit derjenigen der Simulation identisch ist (vgl. Abschnitt 2.3 Einsatz von virtuellen Simulationen im Lernprozess).

Zusammenfassend ergibt sich für Fragen aus der Einleitung (siehe Abschnitt 1 Einleitung – Projektidee): Virtuelle Lernumgebungen können den Wissenserwerb unter spezifischen Bedingungen fördern (Brünken & Seufert, 2011), können durch eine spielerische Beschäftigung motivierend wirken und bei misserfolgsorientierten Lernern Versagensängste kompensieren (Schulmeister, 2001). Bei der Erstellung von virtuellen Lernumgebungen sollte aus dem Fundus didaktischer Methoden geschöpft werden und generelle Prinzipien aus der Mediendidaktik gelten auch für virtuelle Lernumgebungen (Issing, 1997; Kerres u. a., 2011).



### 3. Vorgehensweise zur Konzeption der virtuellen Lernumgebung

In diesem Kapitel wird zunächst die Fragestellung (siehe 3.1 Fragestellung und Lernumgebungsdesign), die in dieser Arbeit bearbeitet wurde dargestellt. In den darauffolgenden Abschnitten werden wichtige konzeptionelle Maßnahmen erklärt – die Beschreibung der 3.2 Ausgangssituation und Problemanalyse, die leitfadengestützte Studierendenbefragung 3.3 Interviewleitfaden zur Studierendenbefragung, die Erstellung eines Drehbuchs (3.4 Verlaufsplanung der virtuellen Lernumgebung anhand eines Drehbuchs) und ein Pilottest (3.5 Pilottest und Nachbearbeitung).

#### 3.1. Fragestellung und Lernumgebungsdesign

Ziel dieser Arbeit ist es eine virtuelle Lernumgebung zu erstellen, welche die Lernenden beim Verständnis des Versuchsaufbaus unterstützt. Es werden die folgenden Fragen so weit wie möglich geklärt:

- Inwiefern treten Schwierigkeiten beim Verständnis der Versuchsanordnung auf (vgl. Fricke und Schecker, 2012) und
- inwiefern stellt die Simulation aus Sicht der Studierenden eine Bereicherung für die Vorbereitung auf die Versuchsdurchführung dar (vgl. Fricke und Schecker, 2012)?

Dazu wurden die Entwicklungsschritte nach T. Mayer (2001) – „1. *Analyse des Bedarfs*, 2. *Planung des Lernsystems*, 3. *Produktion der Lernumwelt [und]* 4. *Organisatorische Vorarbeiten*“ (T. Mayer, 2001, S. 363) – durchgeführt, was in den nächsten Absätzen kurz dargestellt wird.

In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf den ersten drei Bereichen liegen. Dem 4. Abschnitt „*Organisatorische Vorarbeiten*“ (T. Mayer, 2001, S. 363) wurde keine Beachtung geschenkt, da dies den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde. Daher wird der Aufwand, den die Bereitstellung der virtuellen Lernumgebung für alle Studierenden erfordert, in dieser Arbeit daher nicht thematisiert.

Die „*Analyse des Bedarfs*“ (T. Mayer, 2001, S. 363) beinhaltet eine Problemanalyse, die in Abschnitt 3.2 Ausgangssituation und Problemanalyse vorgestellt ist. Anhand der Interpretation eines leitfadengestützten Interviews wurden in der 2. Phase „*Planung des*

Lernsystems“ (T. Mayer, 2001, S. 363) Lernziele definiert und ein Drehbuch zum Verlauf der virtuellen Lernumgebung erstellt. Dabei wurden sowohl Inhalte als auch Methoden ausgewählt und ausgearbeitet (vgl. T. Mayer, 2001). In Absprache mit einem Programmierer wurde anhand des Drehbuchs die Realisierbarkeit des Konzeptes bestätigt (vgl. T. Mayer, 2001).

In einem zweiten Interview wurde eine Testversion der virtuellen Lernumgebung mit Studierenden ( $n=2$ ) bevor diese zum Kolloquium antraten getestet, wozu sie nach der Versuchsdurchführung befragt wurden. Ziel dieses Interviews war es, die Meinung der Studierenden sowie Nutzungsschwierigkeiten über die virtuelle Lernumgebung zu erheben. Anhand der Interpretation von diesem Interview wurden Änderungen an der virtuellen Lernumgebung durchgeführt, wodurch eine Optimierung der Lernumgebung angestrebt wird.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Einteilung der Entwicklungsphasen, die T. Mayer (2001) nennt, zwar in dem Vorgehen bei dieser Arbeit wiederzufinden sind und bei der Entwicklung eine strukturelle Hilfe darstellten, allerdings ist es in mancher Hinsicht sinnvoll gewesen von der dort vorgegebenen Vorgehensweise abzuweichen (siehe Abschnitt 2.4.1 Design von virtuellen Lernumgebungen), was durch den Einbau vorzeitiger Studentenbefragungen geschehen ist.

## 3.2. Ausgangssituation und Problemanalyse

Die Arbeitsgruppe “Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung” an der Universität Kassel bietet im Pflichtpraktikum des Masterstudiums der Physik und der Nanostrukturwissenschaften einen Praktikumsversuch mit dem Namen “Elektronenstoßangeregte Fluoreszenzspektroskopie von Gasen” (Abk. EIFS) an.

Diese Lernumgebung – wie eine Konstellation äußerer Lernbedingungen genannt wird (Strittmatter & Mauel, 1997, S. 47) – ist so gestaltet, dass die Studierenden mindestens zwei Wochen Zeit haben um sich auf ein Kolloquium und die Versuchsdurchführung vorzubereiten. Die Vorbereitungsunterlagen (siehe Anhang A Vorbereitungsunterlagen zum Praktikumsversuch) dienen den Studierenden dazu einen Überblick über den Versuch zu erhalten. Das Studium der dort angegebenen Literatur wird den Studierenden empfohlen, wie intensiv sie dieses Angebot nutzen, ist ihnen daher selber überlassen.

An das Kolloquium anschließend findet eine Sicherheitsbelehrung statt, die besonders deshalb notwendig ist, da es sich um ein Labor handelt, das zu Forschungszwecken eingesetzt wird und den Studierenden im Allgemeinen nicht bekannt ist.

Ebenso wie der Sicherheitsbelehrung, kommt der Einführung am Versuchsapparat eine wichtige Rolle zu. Der Betreuer zeigt die verschiedenen Bauteile des Versuchsaufbaus an und erklärt deren Anwendung. Eine sich dabei ergebende Frage ist, inwieweit die Studierenden, die Fülle an beschriebenen Funktionen und Betriebsanweisungen aufnehmen

können bzw. inwiefern sie das von ihnen in der Vorbereitung erarbeitete Wissen mit diesen Informationen verknüpfen können, da das Arbeitsgedächtnis begrenzt ist:

It can probably process in the sense of combine, contrast, or manipulate no more than 2-4 elements. On these numbers, the capacity of working memory when dealing with new information is severely constrained. (Sweller, 2005, S. 22)

In Gesprächen mit dem Versuchsbetreuer ergaben sich diesbezüglich folgende drei Aspekte, die für die Ermittlung von Schwierigkeiten von Bedeutung sind.

(1) Durch die Simulation sollte die Verknüpfung zwischen realem Aufbau und Versuchsskizzen verbessert werden (vgl. Richtberg und Girwitz, 2013a), da der Versuchsbetreuer darauf hinwies, dass es Studierende gebe, die Bauteile verwechseln – wie z.B. den Glühdraht des Penning-Vakuummeters und den Heizdraht, der diejenigen Elektronen emittiert, die zur Fokussierung verwendet werden. Eine Frage, die sich daraus für diese Arbeit ergab, ist: Inwiefern treten diese – sowie weitere – Verwechslungen auf.

(2) Es bleiben einige Bauteile sowie, dem Versuch zu Grunde liegende, physikalische Vorgänge in der Versuchsanordnung verborgen, was von den Studierenden ein gutes Vorstellungsvermögen über das Innere des Aufbaus zur EIFS abverlangt. Die Studierenden verfügen, sogar nach der Durchführung des realen Experiments, hauptsächlich über eine durch theoretische Auseinandersetzung konstruierte „[imaginale] Vorstellungen“ (Weidenmann, 2011, S. 83) über den inneren Aufbau zur EIFS.

[Eine solche imaginäre] Repräsentation von Realitätsausschnitten liegt darin, dass verschiedene Veränderungszustände vor dem "inneren" Auge simuliert werden können. Wer z.B. zur Funktion ein adäquates mentales Modell aufgebaut hat, kann bei einer Störung mögliche Folgen eines Reparaturversuches mental antizipieren. (Weidenmann, 2011, S. 83)

Es soll daher überprüft werden, welche Vorstellungen die Studierenden über das Innere und die innen ablaufenden Prozesse haben um daraus zu schließen, in welcher Hinsicht dazu Hilfen benötigt werden.

(3) Es müssen bei der Durchführung des Versuchs viele Parameter variiert werden. Daher erscheint es sinnvoll den Studierenden die Möglichkeit zu geben, den Versuch zunächst virtuell zu erleben, sodass sie am realen Versuchsaufbau effektiver arbeiten können (vgl. Richtberg und Girwitz, 2013a). Daher ist es erstrebenswert herauszufinden, ob und welche Schwierigkeiten die Studierenden im Umgang mit der Anzahl an Parametern haben. Es kann eine Vereinfachung für die Studierenden und den Betreuer darstellen, wenn solche Schwierigkeiten bereits in der Vorbereitung beseitigt werden, sodass die Studierenden bei der Einführung am Versuchsapparat weniger extrinsischer kognitiver Belastung ausgesetzt sind und somit mehr Kapazitäten für lernbezogene kognitive Belastung zur Verfügung stehen (vgl. Sweller, 2005), da wie folgt gilt:

Extraneous, intrinsic and germane cognitive load are additive. [...] Reducing extraneous cognitive load frees working memory capacity in germane cognitive load. (Sweller, 2005, S. 27)

Die derzeitige Organisation des Praktikumsversuchs bietet den Studierenden Anlass zu einer selbstständigen, kooperativen Arbeitsweise und kann die Fähigkeit wichtige von unwichtigen Informationen zu unterscheiden z.B während der Literaturrecherche erfordern (vgl. Mandl und Winkler, 2002). Es werden somit Komponenten des eigenverantwortlichen und selbstgesteuerten Lernens aufgegriffen (Mandl & Winkler, 2002). Dementsprechend sind die Anforderungen an die Studierenden hoch und es handelt sich bei dem Praktikumsversuch um eine für die Studierenden anspruchsvolle Lernumgebung, die didaktische Prinzipien – wie die Einbindung des Lernprozesses in eine authentische Umgebung, selbstgesteuertes und eigenverantwortliches Lernen sowie die Auffassung vom Lernen als einen sozialen Prozess der Studierenden untereinander und mit dem Betreuer – aufgreift (vgl. Mandl und Winkler, 2002).

Wie oben bemerkt, treten dennoch Missverständnisse auf, die den Eindruck erwecken als könnten bereits in der Vorbereitung Impulse gesetzt werden um diese zu minimieren, sodass mehr kognitive Kapazitäten (Sweller, 2005) für die im Vorbereitungsskript genannten Lernziele, wie den Umgang mit Vakuumtechnologie- und die Funktionsweise von modernen Photonendetektoren zu erlernen, genutzt werden können.

Daher sollen den Studierenden anhand einer virtuellen Lernumgebung Informationen über die Funktionen und die Verwendung von Bauteilen zur Verfügung gestellt werden sowie ihnen die Möglichkeit geboten werden den Einfluss verschiedener Parameter interaktiv zu erproben.

### 3.3. Interviewleitfaden zur Studierendenbefragung

Anhand des leitfadengestützten Interviews wurden Schwierigkeiten der Master-Studierenden identifiziert. Da kaum Informationen darüber vorlagen, wurde eine Methode angewendet, die es den Studierenden ermöglichen sollte, möglichst frei ihre Vorstellungen zu äußern. Die Interviewmethode eignet sich nach Niebert und Gropengießer (2014) um „[...] *alltäglichen und wissenschaftlichen Wissen zu rekonstruieren* [...]“ (Niebert & Gropengießer, 2014, S. 122) und falls „[...] *eine große Offenheit gewährleistet sein soll – aber gleichzeitig auch die vom Interviewer eingebrachten Themen den Erhebungsprozess strukturieren*“ (Niebert & Gropengießer, 2014, S. 122). Daher wurden die Daten anhand eines leitfadengestützten Interviews mit zwei männlichen Studierenden (n=2) erhoben, deren Daten anonymisiert wurden und so die Bezeichnung SStudent 1 und SStudent 2 erhielten. Der Interviewleitfaden wurde unter Berücksichtigung der von Niebert und Gropengießer (2014) genannten Aspekte und Hilfen zur Leitfadenerstellung erstellt. Anhand des Interviews wurde der Eingangsfrage „*Inwiefern treten Schwierigkeiten beim Verständnis der Versuchsanordnung auf?*“ nachgegangen. Speziell handelt es sich dabei um die drei in der Problemanalyse (Abschnitt 3.2 Ausgangssituation und Problemanalyse) erarbeiteten Aspekte, die zur Ermittlung von Schwierigkeiten von Bedeutung sind.

Der Leitfaden (siehe Anhang B Interviewleitfaden) besteht daher aus drei Teilen, welche zur Bearbeitung der in Abschnitt 3.2 Ausgangssituation und Problemanalyse genannten Aspekte gestaltet wurden:

(1) Gestalt: Zu Beginn wird eine einfache, fachferne Frage gestellt um mit den Studierenden ins Gespräch zu kommen und eine freundliche Atmosphäre zu schaffen (Niebert & Gropengießer, 2014). Dann wird der Fokus auf den Arbeitsplatz gelegt und die Studierenden sollen den Aufbau der Apparatur beschreiben. Anschließend wird ihnen das Foto des EIFS-Aufbaus (siehe Anhang B Interviewleitfaden, Abb. B.1) gezeigt und sie werden aufgefordert, die von ihnen genannten Bauteile auf dem Foto zu lokalisieren.

(2) Sichtbarkeit: Es gibt diverse Schülervorstellungen über das Sehen von Gegenständen (vgl. Wiesner, 1986). Insbesondere bei der Sichtbarkeit von Elementarteilchen kann es sein, dass Studierende dabei Schwierigkeiten haben. An den Prozessen, die innerhalb der Apparatur stattfinden spielen Elektronen und Photonen eine entscheidende Rolle. Daher sind Vorstellungen, welche die Studierenden dazu haben von Bedeutung für das Verständnis des Versuchs und somit erhebungsrelevant.

(3) Parameter-Variation: Mit der Aufforderung „*Beschreibe den Ablauf, bis das Gerät betriebsbereit ist.*“ (Anhang B Interviewleitfaden) soll ermittelt werden, ob und inwiefern Schwierigkeiten mit der Parameteranzahl auftreten. Die Studierenden werden dabei angehalten ihre in (1) genannten Vorstellungen in eine Handlungsanweisung zu überführen. Dabei soll deutlich werden, ob sie über ein kognitives Skript zur Inbetriebnahme verfügen. Helfferich (2009) betont, dass Forschungsfragen operationalisiert und übersetzt werden müssen in Interviewfragen, damit die Fragestellung beantwortet werden kann, was im Leitfaden durch umgangssprachliche Formulierungen realisiert wurde.

Bei der Durchführung des Interviews wurde davon ausgegangen, dass die Studierenden aus ihrer Sicht die Wahrheit erzählen und nicht lügen (vgl. Niebert und Gropengießer, 2014). Um dies weitgehend sicher zu stellen, betonten Niebert und Gropengießer (2014) die Herstellung einer angenehmen Atmosphäre für die Befragten. Die Studierenden wurden daher

[...] mehrfach darauf hingewiesen, dass es in der Vorstellungsforschung nicht um Leistungsmessung geht, sondern dass alle Äußerungen zum Untersuchungsgegenstand gewünscht und wertvoll sind. (Niebert & Gropengießer, 2014, S.124)

Wird das Interview vor dem Kolloquium durchgeführt, kann die Anspannung der Studierenden so hoch sein, dass sie kaum Vorstellungen und Schwierigkeiten preisgeben. Um für die beiden Studierenden sicherzustellen, dass das Interview nicht in die Bewertung des Kolloquiums eingeht, wurde es nach dem Kolloquium in Abwesenheit des Betreuers durchgeführt. Es kann daher sein, dass Vorstellungen während des Kolloquiums verändert wurden und so durch das Interview nicht identifiziert werden konnten. An dieser Stelle musste zwischen der Offenheit der Befragten und Vorstellungsänderungen durch das Kolloquium abgewogen werden. Konzeptionelle Entwicklung bzw. Vorstellungsänderungen sind allerdings nicht leicht zu erzielen, da solche Vorstellungen relativ stabil sind

(Niedderer & Schecker, 1992). Wenn z.B. trotz ganzer Unterrichtseinheiten zur Quantenmechanik in der Oberstufe bei 60% der Schüler vorherige Vorstellungen erhalten bleiben (Müller, 2003), kann man sich vorstellen, dass das einstündige Kolloquium die Vorstellungen der Studierenden nicht eklatant veränderte. Daher wurde das Interview nach dem Kolloquium durchgeführt.

Das Interview wurde wie das leitfadengestützte Interview transkribiert und Abschnitte, die Aufschluss über die Forschungsfragen geben, wurden identifiziert, was eine Interpretation der Daten erforderte. Aus den interpretierten Interviewdaten wurden Lernziele abgeleitet, die bei der daran anschließenden Erstellung des Drehbuchs berücksichtigt wurden.

#### **3.4. Verlaufsplanung der virtuellen Lernumgebung anhand eines Drehbuchs**

Zur Planung und Produktion der virtuellen Lernumgebung wurde ein Drehbuch (vgl. Westphal, 2011), das den Verlauf der virtuellen Lernumgebung veranschaulicht, erstellt. Dies wird empfohlen, da Programmänderungen kosten- und zeit-intensiv sind (Westphal, 2011). Der Planung kommt deswegen eine wichtige Rolle zu (Westphal, 2011).

Wie in Abschnitt 3.1 Fragestellung und Lernumgebungsdesign beschrieben, wurden zunächst, auf der Basis der Ergebnisse vom leitfadengestützten Interview, Inhalte ausgewählt und dazu passende didaktische Methoden ausgewählt. Dazu wurden die in Abschnitt 2.4.1 Praxisbeispiel einer virtuellen Lernumgebung vorgestellten Simulationen zur Orientierung hinsichtlich der Methoden und des Designs verwendet. Das so entstandene Konzept wurde in einem Drehbuch zusammengefasst, anhand dessen eine Abschätzung der Realisierbarkeit durch einen Programmierer aus der Arbeitsgruppe erfolgte.

Zur Drehbucherstellung können verschiedene Programme genutzt werden (Westphal, 2011). In der vorliegenden Arbeit wurden die Bilder des Drehbuchs mit Hilfe des Bildbearbeitungsprogramms GIMP (GNU Image Manipulation Program) der Version 2.4.18 unter zur Hilfenahme der Abpausmethode nach Rincke (2009) erstellt.

Die virtuelle Lernumgebung wurde auf der Grundlage des Drehbuchs mit HTML (Hypertext Markup Language), CSS (Cascading Style Sheets) und der Programmiersprache Javascript erstellt. Dazu wurden im Internet veröffentlichte Skripte auf die hiesige Verwendung umgeschrieben.

Eine Frage, die sich während der Programmierung stellte ist „Welche Bedienungsschwierigkeiten treten bei der Verwendung der virtuellen Lernumgebung auf?“ Um diese Frage zu berücksichtigen erfolgte ein den Programmierungsprozess der virtuellen Lernumgebung begleitendes (formatives) Interview, das im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.



### 3.5. Pilottest und Nachbearbeitung

Um zu überprüfen inwiefern die Simulation für Studierende handzuhaben- und attraktiv ist, wurden eine Studentin und ein Student (n=2) gemeinsam in einem Interview befragt. Die Studierenden wurden gebeten, die virtuelle Lernumgebung zu bearbeiten und anschließend – nach der realen Versuchsdurchführung – ihre Meinung über die virtuelle Lernumgebung abzugeben. Das Interview wurde, anders als das leitfadengestützte Interview, vor dem Kolloquium durchgeführt, da in diesem Interview die Simulation getestet wurde, die von den Studierenden in Zukunft zu Hause bearbeitet werden soll, war es hier wichtiger als im leitfadengestützten Interview, dass die Studierenden durch das Kolloquium nicht beeinflusst wurden.

Ihre Identitäten wurden anonymisiert indem ihre Namen durch die Kennung „Studentin“ bzw. „Student“ ersetzt wurden.

Das formative Interview wurde ebenfalls mit dem Audiotranskriptions-Programm f4tanscript der Version v5.60.3 nach dem „*Einfachen Transkriptionssystem*“ Dresing und Pehl (2015, S. 20) transkribiert und Abschnitte, die Aufschluss über die Bedienungsfreundlichkeit und Attraktivität der virtuellen Lernumgebung geben, wurden identifiziert, was eine Interpretation der Daten erforderte.



## **4. Ergebnisse der Maßnahmen zur Konzeption der virtuellen Lernumgebung**

Im Abschnitt 4.1 Ergebnisse der leitfadengestützten Studierendenbefragung werden die Lernziele für die virtuelle Lernumgebung entwickelt und Antworten auf die erste Frage der Fragestellung gegeben. Anschließend werden das Drehbuch und die Testversion vorgestellt (4.2 Vorstellung des Drehbuchs und der Testversion). Im Abschnitt 4.3 Ergebnisse des formativen Pilottests werden Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert und Aspekte zur Beantwortung der zweiten Frage der Fragestellung genannt. Abschließend wird die optimierte Version der virtuellen Lernumgebung präsentiert (4.4 Optimierung der virtuellen Lernumgebung).

### **4.1. Ergebnisse der leitfadengestützten Studierendenbefragung**

Das leitfadengestützte Interview wurde durchgeführt

- um Verwechslungen von Bauteilen zu erkennen,
- um zu ermitteln, welche Vorstellungen (hinsichtlich der Sichtbarkeit) über die, in dem Versuchsapparat ablaufenden, Prozesse stattfinden und
- um zu testen, inwiefern Studierende über die Inbetriebnahme des EIFS-Apparatur Bescheid wissen.

(1) Es traten verschiedene Schwierigkeiten bei der Identifizierung und Lokalisation von Bauteilen auf. Wie durch den Versuchsbetreuer beschrieben, wurde das Penning-Vakuummeter – fälschlicher Weise, aber aus nachvollziehbarem Grund – als Glühdraht identifiziert.

108 Student 1: [...], was man hier schön so glühen sieht/

110 Student 2: Das ist der Glühdraht, höchstwahrscheinlich.

111 Student 1: Ja, genau das dürfte der Glühdraht sein. [...]

Der Grund für die Verwechslung ist, dass sich im Penning-Vakuummeter ein Glühdraht befindet, der direkt ins Auge fällt, da das Gehäuse des Vakuummeters aus Glas ist. Im

weiteren Verlauf des Interviews änderten die Studierenden, auf die erneute Nachfrage durch den Interviewer ihre Meinung:

151 Student 2: Das Problem ist dabei: Eigentlich müsste der Glühdraht hier irgendwo in der Nähe von der Pumpe sein, weil die Pumpe sollte bei dem Glühdraht für ein gutes Vakuum sorgen. Es wäre auch ein bisschen einfacher, die Elektronen zu fokussieren, wenn sie da drin sind.

Nachdem die Studierenden zu der Erkenntnis kamen, dass der Glühdraht im Penning-Vakuummeter nicht der in der Versuchsanleitung beschriebene Heizdraht ist, identifizierten sie das Vakuummeter als magnetische Spule, was sie allerdings wieder verwarfen.

160 Interviewer : [...] was ist dann das hier? (zeigt auf das Penning-Vakuummeter)

162 Student 1: Ist das die Spule? Magnetische Linse?

163 Student 2: Ne, die ist ja hier drin.

164 Student 1: Was ist das dann?

Der Interviewabschnitt verdeutlicht das Verlangen, der Studierenden dem Penning- Vakuummeter eine Funktion zuzuordnen. Daher ist es sinnvoll, diese den Studierenden zugänglich zu machen, damit sich die Fehlvorstellung "Verwechslung von Penning-Vakuummeter und Heizdraht" nicht festigt und keine kognitiven Kapazitäten für das "Grübeln" darüber verschwendet werden (vgl. Sweller, 2005).

Eine weitere Unsicherheit der Studierenden betraf die Frage, ob sich der Turm horizontal oder vertikal erstreckt. Bei diesem Interviewabschnitt hatten sie das Foto des Versuchsaufbaus noch nicht gesehen. Sie haben keine eindeutige Entscheidung darüber getroffen, wie der Versuchsapparat ausgerichtet ist:

87 Student 1: [...] Wir haben [...] den Turm mit dem seitlichen Ausläufer, was dann letztendlich das Spektrometer sein soll. Oder ist das flachliegend? [...]

91 Student 1: [...] Es wird nicht [...] einen Meter hoch sein.

93 Student 2: Er (der Betreuer) hat halt so einen Turm erwähnt und meinte, das ist wirklich so ein Turm. Ich meine was ist denn praktischer? Man kann das alles auch liegend machen.

98 Student 1: [...] Also ich wüsste jetzt keinen Grund, warum das nicht auch horizontal sein könnte. Außer transportbedingte [...] Sachen.

Eine Idee ist diese Unsicherheit durch ein Foto des Versuchsapparates zu beheben oder die Ablenkung der Elektronen im Erdmagnetfeld als Hinweis zu nennen, warum der Turm vertikal aufgestellt ist.

(2) Zu erklären, wie das Innere der Versuchsapparatur aussieht, und was theoretisch zu sehen wäre, wenn man sich in die Versuchsapparatur hineinbegeben könnte, stellte für die Studierenden kein eklatantes Problem dar. Daher wird auf diesen Aspekt hier nicht näher eingegangen. Der entsprechende Transkriptabschnitt kann in Anhang C Transkript zum leifadengestützten Interview (Zeilen 189-302) nachgelesen werden.

(3) Bezüglich der Inbetriebnahme der EIFS-Apparatur wurde festgestellt, dass die Studierenden nicht wissen in welcher Reihenfolge die Elemente in Betrieb genommen werden. Begründet wird dies dadurch, dass sie der Frage, die zur Beschreibung der Inbetriebnahme auffordert, ausweichen.

320 Student 1: Ich denke, was der Betreuer, dann morgen in der halben Stunde vorher macht ist, dass er schon auf maximalen Strom hier einstellt [...].

Die Studierenden sind kaum auf die Reihenfolge in der die Parameter eingestellt werden sollten eingegangen.

Zusätzlich bemerkten sie Schwierigkeiten beim Skizzenverständnis, dass zum Teil als irreführend wahrgenommen wurde:

402 Student 1: [...] Man hat gemerkt, dass Gitter ist ein bisschen anders. Beim Versuchsaufbau hast du das Gitter einfach mittendrin reingezeichnet bekommen. Was irgendwie nicht stimmt, weil das sollte eigentlich so rechts (zeigt auf das Foto des EIFS-Aufbaus) sein und dann ist es sphärisch und es wird nicht gezeigt, wie das (Licht) dann zurück läuft. Der rechte Teil (der Skizze)[...] stimmt dann nicht mehr so ganz.

Zusammenfassend haben sich die folgenden Schwierigkeiten ergeben: Die Ausrichtung der Versuchsanordnung sowie die Größe des Versuchsaufbaus im Raum können nicht adäquat eingeschätzt werden. Verwechslungen von Bauteilen – insbesondere von Glühdraht, Penning-Vakuummeter und magnetischer Spule – treten auf. Zudem wirken unterschiedliche Darstellungen in den Vorbereitungsunterlagen mit Transmissions- und Reflexionsgitter irreführend auf die Studierenden. Dass es sich um ein sphärisches Gitter handelt, wurde zumindest einem Studierenden erst im Kolloquium klar. Letztendlich kann die Reihenfolge der in Betrieb zu nehmenden Versuchsinstrumente von den Studierenden nicht angegeben werden. Dementsprechend lauten die Lernziele für die virtuelle Lernumgebung:

- Die Studierenden haben eine adäquate Vorstellung über die Lage der Versuchsanordnung im Raum.
- Die Studierenden können das Penning-Vakuummeter auf einem Foto bzw. am realen Versuchsinstrument identifizieren und örtlich sowie funktionstechnisch von dem Heizdraht bzw. der magnetischen Spule unterscheiden.
- Die Studierenden wissen, dass weder ein planares noch ein Transmissionsgitter – sondern ein sphärisches Reflexionsgitter – im Spektrometer verbaut ist.
- Die Studierenden können die Inbetriebnahme in adäquater Reihenfolge erklären.

Um auf die Fragestellung aus Abschnitt 3.1 Fragestellung und Lernumgebungsdesign einzugehen, kann festgehalten werden, dass die obigen Schwierigkeiten auftreten, weshalb sich eine Unterstützung dahingehend anbietet. Die ersten drei Lernziele wurden bei der Erstellung der virtuellen Lernumgebung berücksichtigt, was im nächsten Abschnitt erklärt wird. Das letzte Lernziel wurde erst später im Entwicklungsverlauf, während der Optimierungsphase (Abschnitt 4.4 Optimierung der virtuellen Lernumgebung), in der optimierten virtuellen Lernumgebung berücksichtigt.

## 4.2. Vorstellung des Drehbuchs und der Testversion

Zur Konzeption der virtuellen Lernumgebung wurde ein Drehbuch verfasst, das im Folgenden vorgestellt wird. Die virtuelle Lernumgebung wurde in drei Abschnitte eingeteilt, was dem Sequenzierungsprinzip (T. Mayer, 2001) entspricht: Den Versuchsaufbau, die Fernfokuselektronenquelle, das Spektrometer.

Zu aller erst wird den Anwendern ein Bild des Versuchsaufbaus (siehe Abb. 4.1) präsentiert, was den Zweck hat die Vorstellung über die räumliche Lage des Aufbaus zu verdeutlichen und insbesondere zu zeigen, dass es sich um einen vertikal ausgerichteten "Turm" handelt. Außerdem erhalten Benutzer durch eine horizontale Navigationsleiste am Seitenkopf einen Überblick über die Struktur der Lernumgebung. Durch Mausklicks

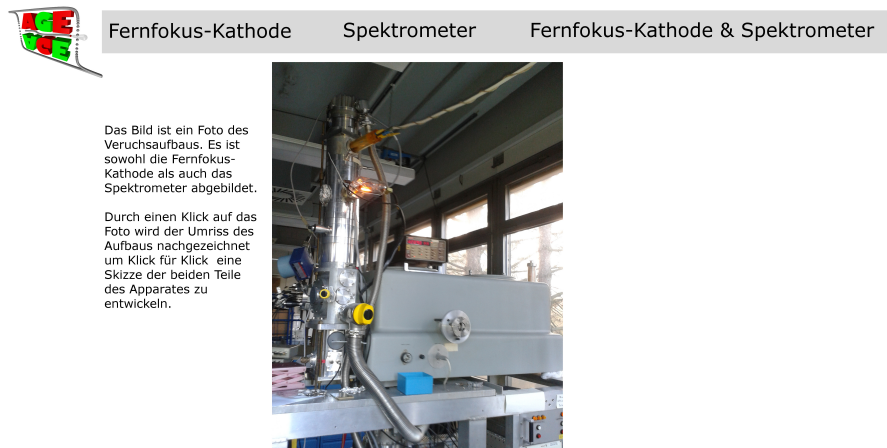


Abbildung 4.1.: Navigationsleiste und Einstiegsbild des Versuchsaufbaus. [erstellt mit GIMP]

auf das Bild kann der Anwender sich durch eine linear abrufbare Bilderfolge (siehe Abb. 4.2) navigieren, während der eine Skizze zum EIFS-Aufbau erstellt wird. Während dieses Vorgangs wird explizit beschrieben, dass im Spektrometer ein Reflexionsgitter verwendet wird, dass in der Skizze durch einen Bogen dargestellt wird. Durch Klicken auf das Foto findet ein Abpausen statt. Außerdem gelangt der Anwender durch das Platzieren des Cursors auf der Skizze zur Benennung der einzelnen Bauteile, was einer Verwechslung der Bauteile entgegen wirken soll, da durch einen Doppelklick auf die Skizze das Foto immer wieder aufgerufen und so mit der Skizze abgeglichen werden kann. Dann können die Anwender zur Wiederholung und Sicherung die Begriffe per Drag-and-Drop der vorher beschriebenen Skizze zuordnen (siehe Abb. 4.3). Dabei können die Studierenden ungestört überprüfen, ob sie die Bauteile lokalisieren können, wobei sie ein direktes Feedback über die Richtigkeit der Zuordnung erhalten (vgl. Abschnitt 2.4.2 Praxisbeispiel einer virtuellen Lernumgebung).

Zum nächsten Abschnitt "Fernfokuskathode" (siehe Abb. 4.4) gelangt der Anwender automatisch – nach erfolgreicher Zuordnung der Begriffe – zur Simulation der Fernfoku-



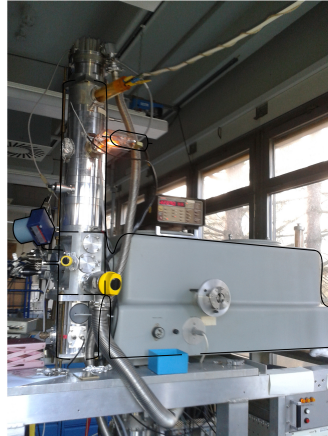
Fernfokus-Kathode

Spektrometer

Fernfokus-Kathode & Spektrometer

Das Bild ist ein Foto des Versuchsaufbaus. Es ist sowohl die Fernfokus-Kathode als auch das Spektrometer abgebildet.

Durch einen Klick auf das Foto wird der Umriss des Aufbaus nachgezeichnet um Klick für Klick eine Skizze der beiden Teile des Apparates zu entwickeln.



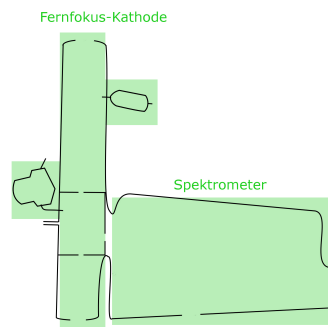
Fernfokus-Kathode

Spektrometer

Fernfokus-Kathode & Spektrometer

Das Bild ist ein Foto des Versuchsaufbaus. Es ist sowohl die Fernfokus-Kathode als auch das Spektrometer abgebildet.

Durch einen Klick auf das Foto wird der Umriss des Aufbaus nachgezeichnet um Klick für Klick eine Skizze der beiden Teile des Apparates zu entwickeln.



Fernfokus-Kathode

Spektrometer

Fernfokus-Kathode & Spektrometer

Das Bild ist ein Foto des Versuchsaufbaus. Es ist sowohl die Fernfokus-Kathode als auch das Spektrometer abgebildet.

Durch einen Klick auf das Foto wird der Umriss des Aufbaus nachgezeichnet um Klick für Klick eine Skizze der beiden Teile des Apparates zu entwickeln.

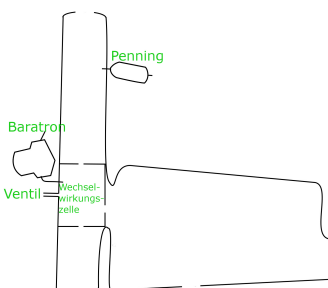


Abbildung 4.2.: Ausschnitte der linearen Bilderfolge: Entstehung einer Skizze zum EIFS-Aufbau. [erstellt mit GIMP]



Fernfokus-Kathode

Spektrometer

Fernfokus-Kathode & Spektrometer

Vervollständigen Sie die Skizze indem Sie die untenstehenden Begriffe per Drag & Drop platzieren.

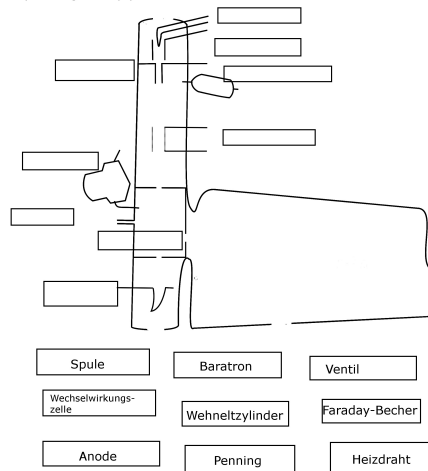


Abbildung 4.3.: Sicherung: Zuordnung von Begriffen zur Versuchsskizze. [erstellt mit GIMP]

selektronenquelle. Dort ist ein Foto des Hochspannungs-Racks an denjenigen Stellen markiert und beschriftet, wo sich die Steuergeräte der entsprechenden Parameter einstellen lassen. Durch Klicken auf die weißen, beschrifteten Flächen, können die jeweiligen Parameter an einem Balken eingestellt werden (siehe Abb. 4.5). Sind alle Parameter auf einen Wert ungleich Null eingeschaltet, so wird im gelb markierten Bereich der Stromstärke im Faraday-Becher angegeben und der Gang der Elektronen wird weiß gestrichelt dargestellt. Ist die maximale Stromstärke im Faraday-Becher erreicht, so erhalten die Anwender ein Feedback darüber und gelangen zum nächsten Abschnitt der virtuellen Lernumgebung "Spektrometer".

Das Rotationsgitter im Spektrometer kann durch Anklicken und Eingabe eines Zahlenwertes zwischen 0 und 999 in das weiße, beschriftete Rechteck in der Draufsicht (siehe Abb. ??) gedreht werden. Erfolgt eine Eingabe so werden die Anwender aufgefordert Gas in das Wechselwirkungsvolumen einzulassen indem auf das Wechselwirkungsvolumen geklickt wird. Dann werden das Fluoreszenzlicht im Wechselwirkungsvolumen sowie dessen Ausbreitung und Dispersion durch das Reflexionsgitter im Spektrometer schematisch dargestellt (siehe Abb. 4.6).

Die Testversion der virtuellen Lernumgebung (siehe Abb. 4.7) gliedert sich in drei Teile:

1. Der Versuchsaufbau: Dabei findet eine Erklärung der relevanten Bauteile sowie eine Sicherungsphase per Drag-and-Drop statt.
2. Die Simulation der Fernfokuselektronenquelle: Dabei können die beiden Parameter Heizstromstärke und Hochspannung variiert werden und in der schematischen



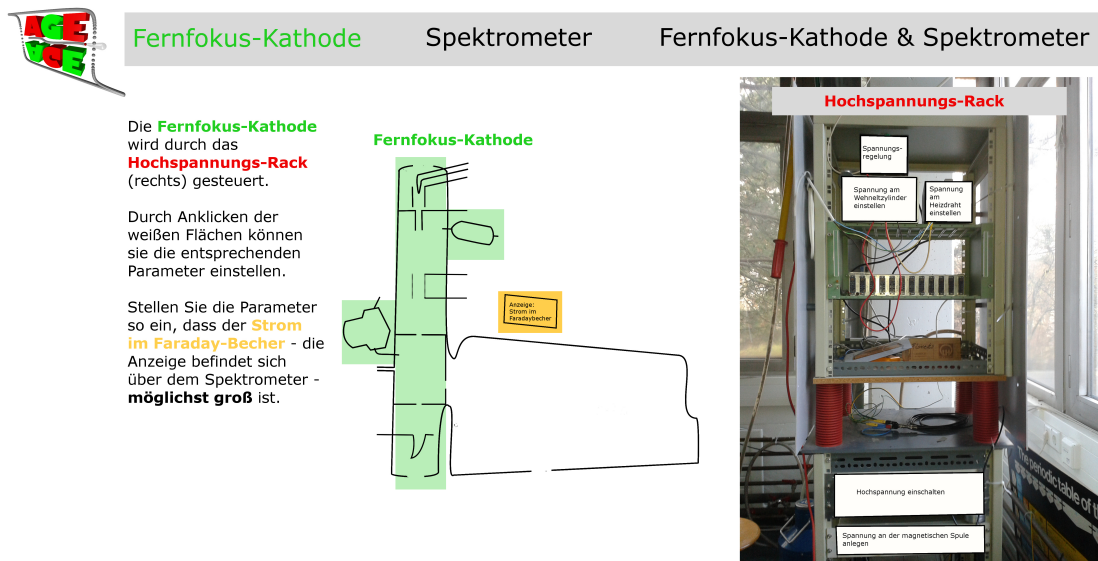


Abbildung 4.4.: Simulation des Versuchsaufbaus. [erstellt mit GIMP]



Abbildung 4.5.: Variation der Parameter. [erstellt mit GIMP]

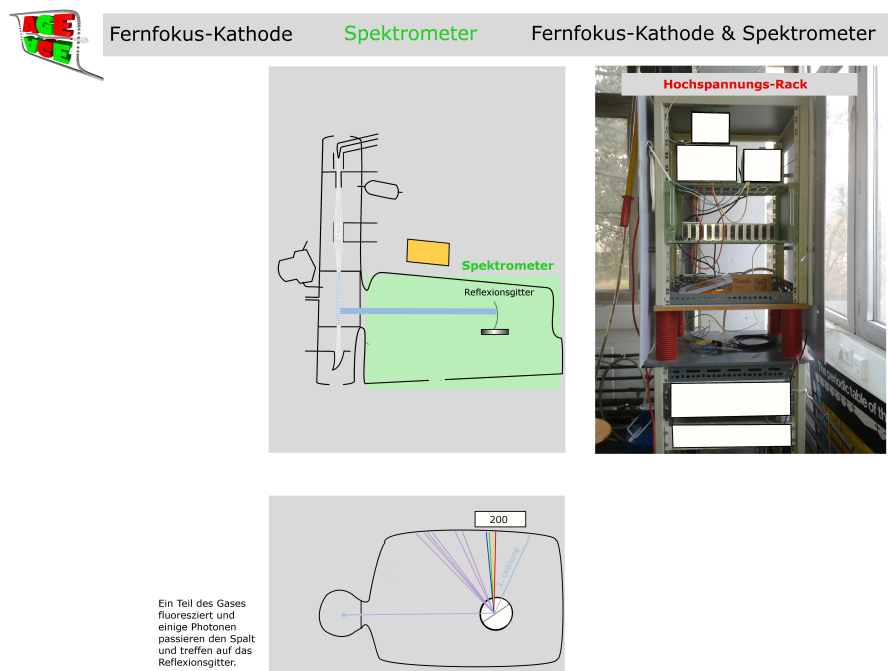


Abbildung 4.6.: Fluoreszenzlicht-Ausbreitung und -Dispersion durch das Reflexionsgitter im Spektrometer bei bereits eingelassenem Gas im Wechselwirkungsvolumen. [erstellt mit GIMP]



Abbildung 4.7.: Startseite der Testversion der virtuellen Lernumgebung.

Darstellung wird qualitativ die Intensität des Fluoreszenzlichts angezeigt.

3. Die Simulation des EIFS-Aufbaus: Der Einfallswinkel des im Wechselwirkungsvolumen emittierten Lichts kann variiert werden und die Dispersion wird in dessen Abhängigkeit sowie ein vereinfachtes Detektorbild dargestellt wird.

Die Navigationsleiste am Kopf jeder Webpage ermöglicht es zwischen den drei Einheiten zu wechseln. Von einer zur nächsten Webpage gelangen die Lernenden über die Verknüpfung "weiter". Auf jeder Webpage befindet sich eine – durch Anklicken – ausklappbare "Information!". Dort werden Hinweise zu den dargebotenen Darstellungen gegeben. Ebenso können die Verknüpfungen "Was können Sie hier tun?" und "Und wenn ich damit fertig bin?" betätigt werden. Dort werden Metainformationen gegeben, wie auf der Seite verfahren werden kann bzw. wie die Lernenden sich durch die Lernumgebung manövrieren können um das Gefühl der Verirrung im virtuellen Raum zu vermeiden (vgl. Gay und Mazur, 1991).

### 4.3. Ergebnisse des formativen Pilottests

Ziel des Pilottest und der anschließenden Erhebung der Meinung der Studierenden ist es Benutzerschwierigkeiten zu erheben und inwiefern die virtuelle Lernumgebung aus Sicht der Studierenden eine Bereicherung für die Vorbereitung auf die Versuchsdurchführung darstellt.

Von den Studierenden wurden die folgenden positiven Aspekte der virtuellen Lernumgebung genannt:

Einerseits bietet sie eine anschauliche Gelegenheit, den EIFS-Aufbau kennen zu lernen.

4 Student: [...] die Simulation war wirklich dahingehend fantastisch, dass man gleich ein Gefühl für das Gerät bekommt. Das gibt es in den meisten Vorschriften nicht. Das ist ein Sachtext, der einfach runtergeleiert wird. Da konnte man selbst ein bisschen anfassen auch bewegen, einfügen und da lernt man das Gerät wenigstens kennen.

Andererseits gibt die Bearbeitung der Lernumgebung Sicherheit im Umgang mit der EIFS-Apparatur.

11 Student: Ich hatte [...] ein viel sichereres Gefühl, als einfach dann vor dem Gerät zu stehen.

Ein hoher Aufforderungscharakter wird der Simulation besonders wegen einer vorhandenen Benutzerführung zugeschrieben.

63 Student: Wenn mir das gegeben wird, direkt auf der moodle-homepage, direkt unter dem Skript, mache ich das sofort. Es ist eine wunderbare Veranschaulichung des Aufbaus, man lernt sofort, was muss ich beachten, was sehe ich da.

Der hohe Aufforderungscharakter wird aber auch kritisch gesehen, da die Studierenden in vorigen Vorlesungen die Erfahrung gemacht haben, dass online zur Verfügung gestellte Simulationsprogramme nur von einigen ihrer Kommilitonen genutzt wurden.

71 Studentin: Ich probiere so etwas dann auch schon mal aus, wenn ich die Möglichkeit habe. Ich weiß allerdings nicht, ob das alle machen würden. [...] wir hatten nämlich in einer Vorlesung [...] auch immer Computerprogramme zur Hilfe gegeben und das [...] hat dann [...] fast niemand gemacht.

77 Student: Ja, aber da muss du differenzieren. So, von dem Aufbau, so wie wir ihn da gesehen haben, das ist nicht zu vergleichen. Man wird direkt dadurch geführt. Das Programm von Herrn Unbekannt ist vollkommen frei und diese Freiheit ist auch gleichzeitig problematisch. Man sitzt nämlich davor und weiß erstmal gar nichts. Weiß nicht [...], wo man welche Einstellungen machen soll.

Die hiesigen Beobachtungen sind mit den Ergebnissen von Fricke und Schecker (2012) kohärent: Interaktive Elemente werden auch hier von den Studierenden positiv wahrgenommen (vgl. Abschnitt 2.1 Empirische Studie zur virtuellen Vorbereitung im Physikpraktikum) und der Aufforderungscharakter wird von den hier befragten Studierenden bei geringer Benutzerführung gering eingeschätzt. Anders als Fricke und Schecker (2012) begründen die Studierenden eine geringe Nutzung durch zu wenig Benutzerführung statt durch ein geringes Physikinteresse (Fricke & Schecker, 2012).

Darüber hinaus wurden von den Studierenden Verbesserungshinweise gegeben. Diese betreffen hauptsächlich die farbliche Gestaltung und die Positionierung relevanter Elemente. Die beiden wesentlichen Kritikpunkte sind, dass die farbliche Gestaltung von Verknüpfungen mit der Farbe Blau einfacher als Verknüpfungen wahrgenommen wird

33 Student: Was mir geholfen hätte, wäre bei dem ersten Schritt. Nicht dieses Informationszeichen, sondern vielleicht einfach die zu klickenden Verlinkungen farblich zu gestalten. Dann weiß man sofort, wenn etwas im schwarzen Text ist, dann weiß ich, ich muss diesen Text einfach nur lesen. Wenn es farblich gestaltet ist, z.B. in einem hellblau, wie es für Verlinkungen häufiger ist, gehe ich direkt drauf und werde weiter geleitet und weiß: "Ah, ich bin jetzt da!".

und die "weiterVerknüpfung unten rechts platziert, einfacher zu finden ist sowie, dass der Kasten in dem das vereinfachte Detektorbild dargestellt ist auf dem Bildschirm nicht stark genug ins Auge gefallen ist um einen Unterschied zur vorigen Website zu erkennen.

42 Studentin: [...] als dann das Spektrum, also der leere Kasten gezeigt wurde, das habe ich [...] nicht gleich mitbekommen, also mir ist das irgendwie anfangs nicht aufgefallen.

46 Student: Ja, der war nicht ganz zu sehen. [...]

Die genannten Aspekte wurden im nächsten Arbeitsschritt, bei der Optimierung der Lernumgebung, berücksichtigt.

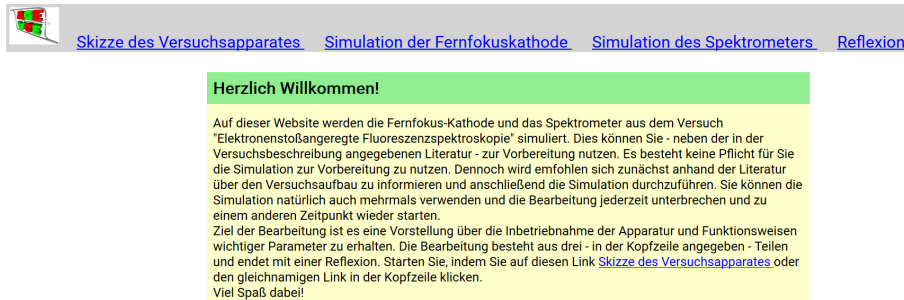


Abbildung 4.8.: Bildschirmansicht der virtuellen Lernumgebung: Die Einleitung in die virtuelle Lernumgebung zum EIFS-Aufbau.

## 4.4. Optimierung der virtuellen Lernumgebung

Verglichen mit der Testversion sind in die Gliederung der virtuellen Lernumgebung zusätzlich eine Einleitung sowie eine Reflexionsphase integriert worden, sodass sich die optimierte Version in

0. eine Einleitung (Abb. 4.8),
1. eine Erklärung des Versuchsaufbaus einschließlich der Drag-and-Drop-Überprüfung (Abb. 4.9),
2. eine Simulation der Fernfokuselektronenkatode (Abb. 4.11),
3. eine Simulation des EIFS-Aufbaus (Abb. 4.12) und
4. eine Reflexion (Abb. 4.13)

gliedert.

Ziel der Einleitung ist es für die Lernenden den Zweck der virtuellen Lernumgebung – als fakultatives Vorbereitungsmaterial – sowie die Lernziele zu verdeutlichen. Darüber hinaus werden Bedienungshinweise gegeben.

Die Erklärung kann schrittweise abgerufen werden und einzelne Schritte können nach Belieben der Lernenden übersprungen oder wiederholt werden, wodurch eine Differenzierung nach dem individuellen Lerntempo des Anwenders ermöglicht wird (vgl. Haack, 1997). Die Erklärung des Versuchsaufbaus (siehe Abb. 4.9) ist gefolgt von der Drag-and-Drop-Überprüfung (siehe Abb. 4.10).

Bei der Simulation der Fernfokuselektronenquelle können das Wehneltzylinderpotential, die Heizstromstärke, das elektrische Potential an den Spulenenden der magnetischen Linse sowie die Hochspannung zwischen der Anode und der Kathode eingestellt werden. Vorher müssen allerdings die Kontrollkästchen (siehe Abb. 4.11) durch Anklicken abgehakt werden. Dabei wird auf die Reihenfolge der Tätigkeiten zur Inbetriebnahme der

**Skizze des Versuchsapparates**

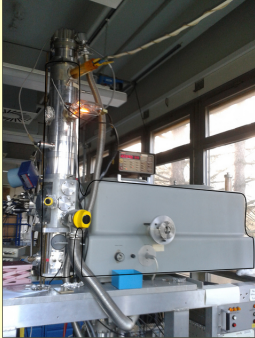
**Was können Sie hier tun?**

Rechts werden die Orte der verschiedenen Bauteile der Fernfokus-Kathode und des Spektrometers beschrieben. Durch Anklicken der aufgelisteten Punkte erfahren Sie näheres.

**Und wenn Sie damit fertig sind?**

[zurück](#)

1. [Foto des Versuchsapparates](#)  
Der Versuchsapparat besteht aus der Fernfokuselektronenquelle (vertikaler Turm auf dem Foto) und dem Spektrometers (großer, grauer Körper rechts neben der Fernfokus-Kathode).
2. [Abpausen des Apparaturumrisses](#)  
Schauen Sie sich den Umriss (schwarz) genau an und vergleichen Sie ihn mit dem Foto. Es sollen nur kleine Abweichungen beobachtbar sein.
3. [Apparaturumriss ohne Fotohintergrund](#)
4. [Evakuieren des Apparates](#)
5. [Das Wechselwirkungsvolumen](#)
6. [Heizdraht](#)
7. [Wehneltzylinder und Anode](#)
8. [Spule](#)
9. [Faraday-Becher](#)
10. [Reflexionsgitter](#)
11. [Detektor](#)



**Und wenn Sie damit fertig sind?**

[weiter](#)

**Der Heizdraht** ist spitzenförmig gebogen und reagiert sehr empfindlich auf eine hohe Heizstromstärke. Diese darf nicht zu hoch eingestellt werden, da dies zum Durchbrennen des Heizdrahtes führt. Der Heizdraht sollte nicht mit dem Glühdraht im Penning-Vakuummeter (siehe "1. Foto der Versuchsapparatur") vertauscht werden.

7. [Wehneltzylinder und Anode](#)

Der Wehneltzylinder fokussiert den Elektronenstrahl, sodass möglichst viele Elektronen sich an der Anode vorbei bewegen.

8. [Spule](#)

Die Spule projiziert den Fokus, der von den Wehneltzylindern erzeugt wird unter die Spule. Ziel ist es den Fokus so zu projizieren, dass er sich vor dem Spalt zum Spektrometer befindet.

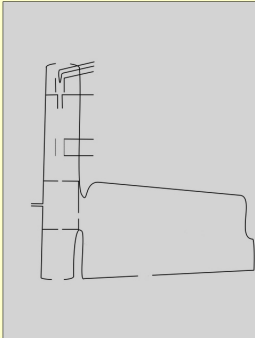
9. [Faraday-Becher](#)

10. [Reflexionsgitter](#)

11. [Detektor](#)

**Und wenn Sie damit fertig sind?**

[zurück](#)



**Die Spule** projiziert den Fokus, der von den Wehneltzylindern erzeugt wird unter die Spule. Ziel ist es den Fokus so zu projizieren, dass er sich vor dem Spalt zum Spektrometer befindet.

9. [Faraday-Becher](#)

Elektronen, die das Wechselwirkungsvolumen passieren und auf den Faraday-Becher treffen, werden kontrolliert abgeleitet.

10. [Reflexionsgitter](#)

Ist Gas über das Ventil in das Wechselwirkungsvolumen eingelassen, so wird ein Teil des Gases fluoreszieren. Durch den Spalt treten Photonen in das Spektrometer und treffen auf ein Reflexionsgitter. Dort findet eine Dispersion statt, bei der Photonen - der Wellenlänge nach - von einander getrennt werden.

**Und wenn Sie damit fertig sind?**

Klicken Sie auf "weiter" am Ende der webpage.

[zurück](#)

Die Spule projiziert den Fokus, der von den Wehneltzylindern erzeugt wird unter die Spule. Ziel ist es den Fokus so zu projizieren, dass er sich vor dem Spalt zum Spektrometer befindet.

9. [Faraday-Becher](#)

Elektronen, die das Wechselwirkungsvolumen passieren und auf den Faraday-Becher treffen, werden kontrolliert abgeleitet.

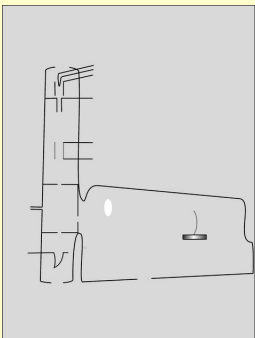
10. [Reflexionsgitter](#)

Ist Gas über das Ventil in das Wechselwirkungsvolumen eingelassen, so wird ein Teil des Gases fluoreszieren. Durch den Spalt treten Photonen in das Spektrometer und treffen auf ein Reflexionsgitter. Dort findet eine Dispersion statt, bei der Photonen - der Wellenlänge nach - von einander getrennt werden.

**Und wenn Sie damit fertig sind?**

Klicken Sie auf "weiter" am Ende der webpage.

[zurück](#)



**Der Detektor** ist durch den weißen Fleck dargestellt. Der Ort der auftreffenden Photonen wird dort gemessen.

[weiter](#)

Abbildung 4.9.: Bildschirmansicht der virtuellen Lernumgebung: Die Erklärung relevanter Bauteile des EIFS-Aufbaus.

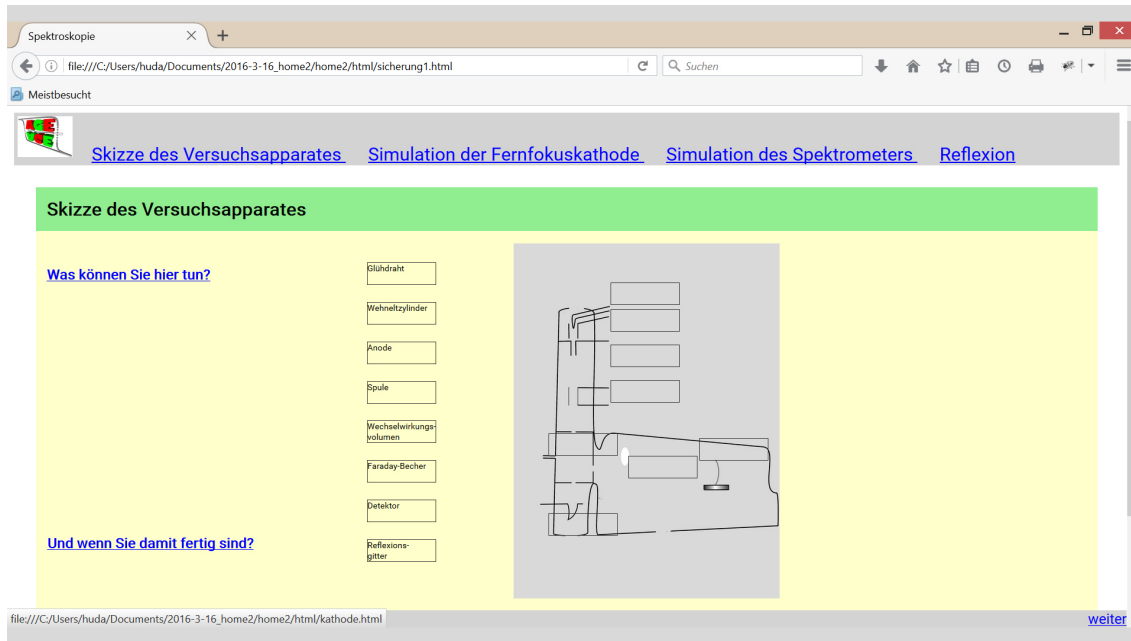



Abbildung 4.10.: Bildschirmansicht der virtuellen Lernumgebung: Die Drag-and-Drop-Überprüfung.

EIFS-Apparatur eingegangen. Ist die Hochspannung eingeschaltet, so müssen die Kästchen vor den Schieberegler abgehakt werden, damit keine Pop-Up-Warnung ausgegeben wird, die darauf hinweist, dass Isolatoren zum Einstellen der Parameter verwendet werden sollen (siehe Abb. 4.11, 3. Bild). In der Versuchsskizze ist bei geeigneter Parameterwahl ein blauer Fleck (siehe Abb. 4.11, 2. Bild) erkennbar, der das Fluoreszenzlicht darstellt. Dessen Intensität wird durch die Variation des Potentials, das an den Wehneltzylindern anliegt, der Heizstromstärke und der Hochspannung geändert, während die Verschiebung in vertikaler Richtung des Flecks durch die Änderung der Spulenstromstärke erfolgen kann. Zusätzlich wird im Bild des Hochspannungsracks durch ein gelbes Rechteck und den Hinweis "Achtung Hochspannung" angezeigt (siehe Abb. 4.11, 2. Bild), welcher Teil des Racks relativ zum Boden auf hohem Potential liegt. Darunter werden textuell die Darstellungen sowie das Stromstärke-Zeit-Diagramm (siehe Abb. 4.11, 4. Bild) erläutert. Ziel der in Abbildung 4.11 dargestellten Webpage ist es, dass die Lernenden die Parameter variieren, sodass eine möglichst große Stromstärke im Stromstärke-Zeit-Diagramm abzulesen ist. Wenn die Lernenden damit fertig sind, können Sie zur nächsten Webpage durch Anklicken der "weiter"-Verknüpfung gelangen.

Dort ist eine Draufsicht auf das Spektrometer (Abb. 4.12, 3. Bild) dargestellt, wo Lernende den Einfallswinkel des Fluoreszenzlichts auf das Reflexionsgitter variieren können. Die Skizze verdeutlicht die Dispersion des Fluoreszenzlichts und die Änderung des Ausfallwinkels in Abhängigkeit von dem Einfallswinkel. Neben der Skizze wird ein Detektorbild angeboten. Damit wird verdeutlicht, dass nur ein Teil des dispergierten Lichts auf den



## 4. Ergebnisse der Maßnahmen zur Konzeption der virtuellen Lernumgebung


[Skizze des Versuchsapparates](#)
[Simulation der Fernfokuskathode](#)
[Simulation des Spektrometers](#)
[Reflexion](#)

### Simulation der Fernfokuskathode

[Was können Sie hier tun?](#)

1. Schritt

2. Schritt

[Und wenn Sie damit fertig sind?](#)

Skizze des Versuchsapparates

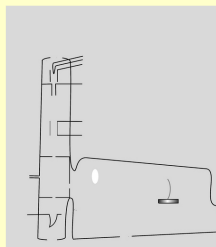



Foto des Hochspannungs-Racks



**Checklist**

Vorpumpenventil öffnen ☐

Vorpumpe einschalten ☐

beide Turbomolekularpumpen einschalten ☐

Gas einlassen ☐

**Einstellen der Parameter**

Potential der an dem einen Wehneltzylinder ☐

Potential dem anderen Wehneltzylinder ☐

Heizstrom ☐

Spulenstromstärke ☐

beschleunigende Hochspannung ☐

Scrollen Sie ggf. runter um den Text unter der Skizze zu lesen.

[Was können Sie hier tun?](#)

Die Fernfokuskathode wird durch das Hochspannungs-Rack (rechts) gesteuert. Die beschrifteten, weißen Flächen geben an, welche Parameter am Hochspannungs-rack einzustellen sind. Stellen Sie die Parameter (ganz rechts, unter "Einstellen der Parameter") so ein, dass sich ein Fokus des Elektronenstrahls vor dem Spalt befindet. Beachten Sie die Phantastie unter.

[Und wenn Sie damit fertig sind?](#)

Skizze des Versuchsapparates

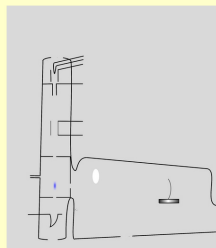



Foto des Hochspannungs-Racks



**Checklist**

Vorpumpenventil öffnen ☒

Vorpumpe einschalten ☒

beide Turbomolekularpumpen einschalten ☒

Gas einlassen ☒

**Einstellen der Parameter**

Potential der an dem einen Wehneltzylinder ☐

Potential dem anderen Wehneltzylinder ☐

Heizstrom ☐

Spulenstromstärke ☐

beschleunigende Hochspannung ☐

Der umrahmte Teil auf dem Foto des Hochspannungs-Racks liegt auf sehr hohem

[zurück](#) [weiter](#)

### Simulation der Fernfokuskathode

Scrollen Sie ggf. runter um den Text unter der Skizze zu lesen.

[Was können Sie hier tun?](#)

Die Fernfokuskathode wird durch das Hochspannungs-Rack (rechts) gesteuert. Die beschrifteten, weißen Flächen geben an, welche Parameter am Hochspannungs-rack einzustellen sind. Stellen Sie die Parameter (ganz rechts, unter "Einstellen der Parameter") so ein, dass sich ein Fokus des Elektronenstrahls vor dem Spalt befindet. Beachten Sie die Phantastie unter.

[Und wenn Sie damit fertig sind?](#)

Skizze des Versuchsapparates


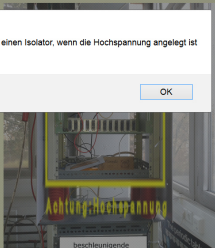


Foto des Hochspannungs-Racks



**Checklist**

Vorpumpenventil öffnen ☒

Vorpumpe einschalten ☒

beide Turbomolekularpumpen einschalten ☒

Gas einlassen ☒

**Einstellen der Parameter**

Potential der an dem einen Wehneltzylinder ☐

Potential dem anderen Wehneltzylinder ☐

Heizstrom ☐

Spulenstromstärke ☐

beschleunigende Hochspannung ☐

Benutzen Sie unbedingt einen Isolator, wenn die Hochspannung angelegt ist

Der umrahmte Teil auf dem Foto des Hochspannungs-Racks liegt auf sehr hohem

[zurück](#) [weiter](#)

abzuhaben. Wenn Sie möchten, können Sie die Schritt für Schritt Anleitung (siehe unten) befolgen.

1. Schritt

Haken Sie die Checklist ab. Dort sind Tätigkeiten aufgeführt die ausgeführt werden müssen, um die Apparatur in Betrieb zu nehmen. Stellen Sie die Parameter so ein, dass sich ein Fokus vor dem Spalt befindet. Erst, wenn die Checkliste komplett abgehakt ist, können die Parameter unter "Einstellen der Parameter" variiert werden.

[Und wenn Sie damit fertig sind?](#)

Der umrahmte Teil auf dem Foto des Hochspannungs-Racks liegt auf sehr hohem Potential! Nachdem die Parameter eingestellt sind, kann es zur Fluoreszenz im Wechselwirkungsvolumen kommen. Falls Fluoreszenz stattfindet, wird das ausgesendete Licht in der Skizze blau dargestellt.

Variieren Sie nun die Parameter erneut, um die maximale Stromstärke im Faraday-Becher zu erhalten. Deren zeitliche Änderung wird im - unten angezeigten - Diagramm angezeigt. Beachten Sie beim Variieren, dass Sie die Isolatoren (quadratischen Kästchen vor den Slidern) benutzen! Wenn die maximale Stromstärke im Faraday-Becher zu beobachten ist, befindet sich ein Fokus vor dem Spalt (siehe Skizze) und möglichst viel des ausgesendeten Lichts tritt durch ihn hindurch.

**Stromstärke-Zeit-Diagramm**

Beide Achsen in willkürlichen Einheiten



**Checklist**

Vorpumpenventil öffnen ☒

Vorpumpe einschalten ☒

beide Turbomolekularpumpen einschalten ☒

Gas einlassen ☒

**Einstellen der Parameter**

Potential der an dem einen Wehneltzylinder ☒

Potential dem anderen Wehneltzylinder ☒

Heizstrom ☒

Spulenstromstärke ☒

beschleunigende Hochspannung ☒

Abbildung 4.11.: Bildschirmansicht der virtuellen Lernumgebung: Die Simulation der Fernfokuselektronenkathode in der optimierten Version der virtuellen Lernumgebung.



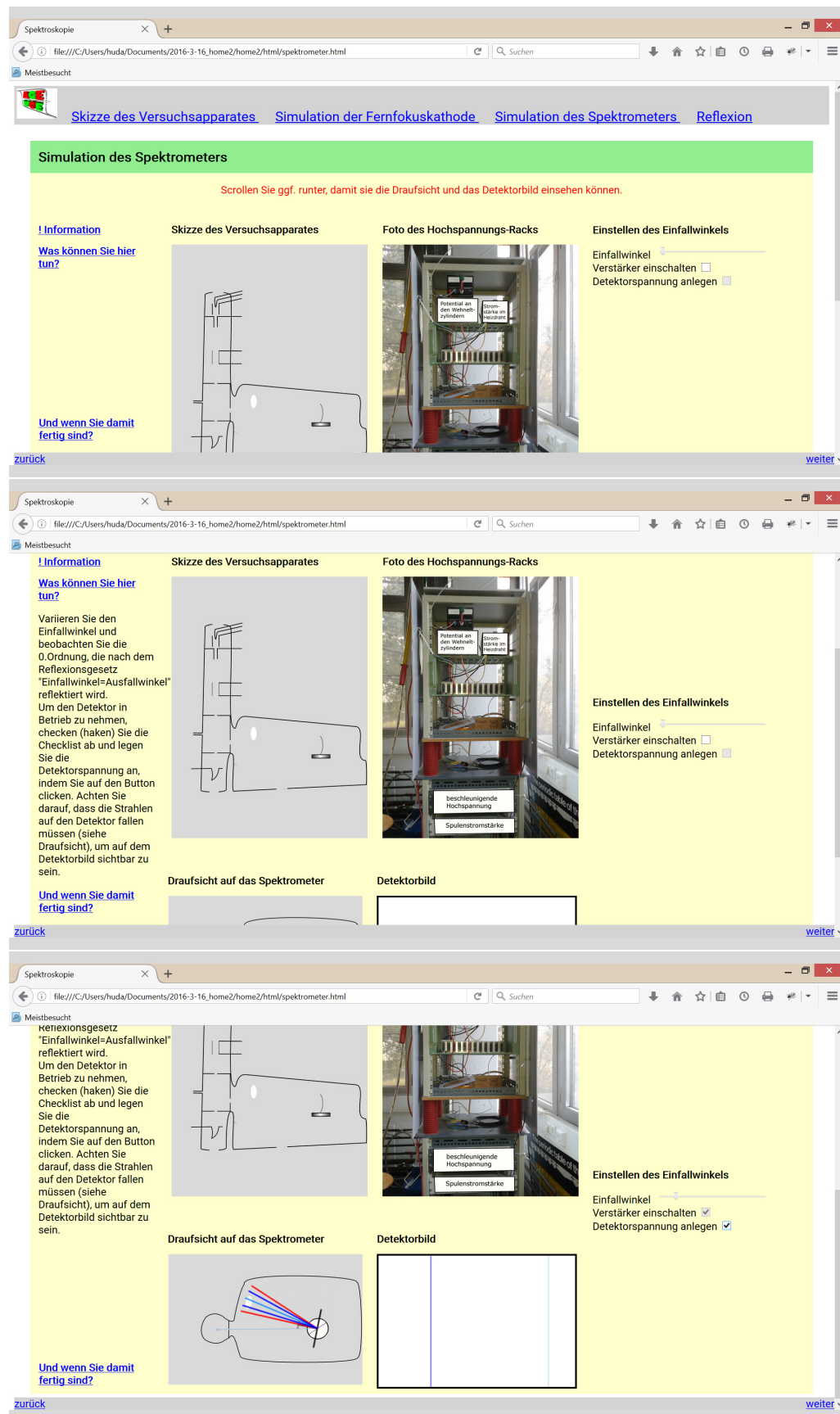


Abbildung 4.12.: Bildschirmansicht der virtuellen Lernumgebung: Die Simulation des Spektrometers im EIFS-Aufbau in der optimierten Version der virtuellen Lernumgebung.

Detektor fällt und dort vertikale Spuren hinterlässt.

Während der Reflexionphase (Abb. 4.13) werden die Lernenden angehalten selber zu überprüfen inwiefern sie die Inhalte verstanden haben und inwiefern sie auf die Versuchsdurchführung vorbereitet sind, was eigenverantwortliches Lernen erfordert.

In der virtuellen Lernumgebung sind verschiedene methodische Konzepte integriert. Im ersten Teil – der Erklärung des Versuchsaufbaus – wird der Inhalt linear-präsentierend und instruktiv dargeboten, während im zweiten und dritten Teil die Simulationen spielerisch nach dem entdeckenden Lernen das Wirken der Parameter veranschaulichen (vgl. de Jong, 2005), da die Lernenden die Einflüsse der Parameter selber herausfinden bzw. erkennen können. Bei der Bearbeitung der virtuellen Lernumgebung wird der Einfluss verschiedener Parameter am Beispiel des EIFS-Experiments bearbeitet (vgl. Kerres u. a., 2011). Damit wird der Aspekt – die Bearbeitung eines realistischen Falles – von virtuellen Lernumgebungen genutzt um dem Umgang mit vielen Parametern zu fördern:

[...] [wenn] es darum geht anspruchsvollere Kompetenzen aufzubauen [...] können realistische Fälle in Simulationen bearbeitet werden. (Kerres u. a., 2011, S. 269) Abschließend wird mit der Reflexion (siehe Abb. 4.13) die Selbststeuerung des gesamten Vorbereitungsprozesses aufgegriffen und die Studierenden können ihre bisherige Vorbereitung besonders bezogen auf experimentelle Inhalte reflektieren (vgl. de Jong, 2005).

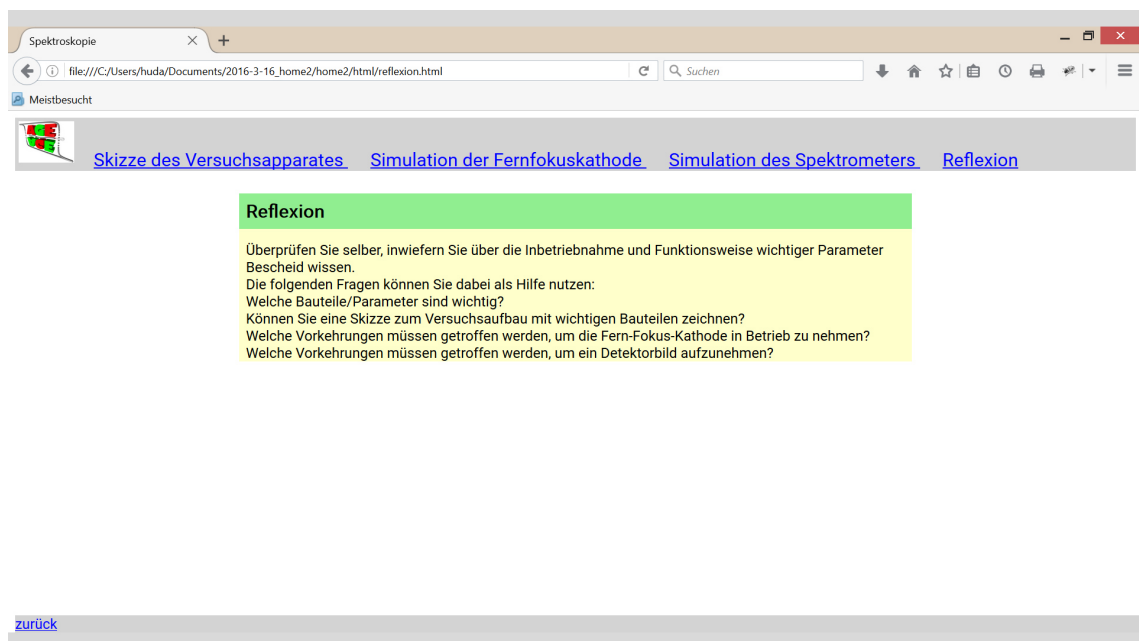


Abbildung 4.13.: Bildschirmansicht der virtuellen Lernumgebung: Die Reflexion.

## 5. Reflexion der Untersuchungsmethode

### Die Fragestellung

- Inwiefern treten Schwierigkeiten beim Verständnis der Versuchsanordnung auf (vgl. Fricke und Schecker, 2012) und
- inwiefern stellt die Simulation aus Sicht der Studierenden eine Bereicherung für die Vorbereitung dar (vgl. Fricke und Schecker, 2012)?

konnte teilweise beantwortet werden, da konkrete Verständnisschwierigkeiten, wie z.B. die Verwechslung von Glühdraht im Penning-Vakuummeter und Heizdraht, identifiziert wurden. Auch Informationen über die Attraktivität der virtuellen Lernumgebung aus Sicht der Studierenden wurden erhoben (z.B. die befragten Studierenden (n=2) empfinden das hier erstellte Angebot ansprechend und sind daher geneigt dies zu nutzen).

Dennoch gelten die Ergebnisse aus den folgenden Gründen mit Einschränkung: Die von Schulmeister (2002) genannten generellen Probleme (siehe Abschnitt 2.2.1 Probleme empirischer Erhebungen zu Interaktivität und Lernerfolg) betreffen teilweise auch die hiesige Untersuchungsmethode. Eine repräsentative und genügend große Stichprobe zu erreichen war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da die Anzahl an Studierenden (n=4), die den Versuch in dem zur Verfügung gestandenen Zeitraum durchführten, zu klein war. Um belastbarere Ergebnisse zu erzielen, sollte die Stichprobe vergrößert werden Schulmeister (2002). Bei den durchgeführten Interviews wurde davon ausgegangen, dass die Befragten ihre Aussagen mit der Intention diese so wahr wie möglich zu tätigen angeben. Davon auszugehen wird von Schulmeister (2002) kritisch betrachtet: *„Meinungsbefragungen hängen von Umgebungsfaktoren und Erfahrungen ab. [...] Im besten Fall sind die erhobenen Daten zwar gültig, aber ihre Aussagekraft ist aufgrund der Kontextfähigkeit lokal und zeitlich beschränkt.“* (Schulmeister, 2002, S. 400). Um Neuigkeitseffekte, die zu Einstellungsänderungen führen können, auszuschließen sind Langzeitstudien notwendig (Schulmeister, 2002), was im Rahmen dieser Arbeit nicht verwirklicht werden konnte.

Außerdem sind leitfadengestützte Interviews eine der am schwierigsten umzusetzenden Forschungsformate (Niebert & Gropengießer, 2014). Die Erfahrung des Interviewers und die Nutzung eines evaluierten Leitfadens sind häufig von ausschlaggebender Bedeutung, da die Beeinflussung der Befragten andernfalls schwer zu vermeiden ist (vgl. Niebert und Gropengießer, 2014). Dies kann speziell in Interview I mehrdeutige Daten verursacht haben, z.B. als die Studierenden kaum auf die Reihenfolge eingegangen in der die Parameter eingestellt werden eingegangen sind. Dieser Abschnitt wurde so interpretiert, dass

die Studierenden nicht in der Lage waren die Reihenfolge adäquat anzugeben. Es kann aber auch sein, dass dies nicht an deren Unvermögen lag sondern an der Fragetechnik des Interviewer. Daher ist dieses Ergebnis durchaus mit Einschränkung zu betrachten. Im leitfadengestützten Interview wurden Vorstellungen der Studierenden hinsichtlich der Sichtbarkeit von in der Apparatur ablaufenden Prozessen untersucht. Um die beiden Aspekte Sichtbarkeit und Inbetriebnahme des EIFS-Aufbaus adäquat zu untersuchen sind weitere Erhebungen sicher sinnvoll.

Um Bedienungsschwierigkeiten zu untersuchen, wurden die Studierenden während sie die virtuelle Lernumgebung testeten dazu befragt und nach der Versuchsdurchführung direkt nach ihrer Meinung gefragt. Diese Erhebung könnte durch die Methode des „*Lauten Denkens*“ (Sandmann, 2014, S. 179) und eine Videoaufnahme wie z.B. im Untersuchungsformat von Fricke und Schecker (2012) weiteren Aufschluss über implizite, unbewusste Schwierigkeiten geben. Die angewendete Interviewmethode könnte daher durch lautes Denken und Videoanalyseverfahren ergänzt werden um Handlungen und implizite Schwierigkeiten der Probanden zu erheben (vgl. Sandmann, 2014).

Zudem ist es ratsam, eine virtuelle Lernumgebung interdisziplinär, mit der Hilfe verschiedener Experten – Programmierern, Didaktikern und themenspezifischer Experten – zu erstellen (Westphal, 2011; Kammerl, 2000). Im Idealfall kommen zur Entwicklung einer virtuellen Lernumgebung professionell ausgebildete Personen verschiedener Bereiche zusammen, da technische, didaktische und themenspezifische Expertise benötigt wird (Westphal, 2011; Kammerl, 2000). Die Erfahrung, dass ein hoher zeitlicher Aufwand zur Erstellung der virtuellen Lernumgebung benötigt wird (Westphal, 2011) kann durch die hiesigen Arbeiten bestätigt werden.

Des Weiteren bieten die erhobenen Interviewdaten Anlass zu deren weiterer Auswertung zum Thema Studentenvorstellungen, denn in dieser Arbeit wurden nur die für die hiesige Fragestellung am relevantesten gehaltenen Aspekte ausgewertet.

Offen geblieben ist, inwiefern die Lernziele durch die Simulation erzielt werden, wozu sich weitere Evaluationen anbieten. Außerdem wurde zwar der Aufforderungscharakter der virtuellen Lernumgebung von den Studierenden wegen der vorhandenen Benutzerführung hoch eingeschätzt, inwiefern das fakultative Angebot hingegen tatsächlich von Studierenden wahrgenommen wird bleibt dennoch offen.

## 6. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine virtuelle Lernumgebung erstellt um Verwechslungen von Bauteilen – speziell dem Penning-Vakuummeter, dem Heizdraht und der magnetischen Spule – durch die Studierenden vorzubeugen und den Studierenden die Möglichkeit zu bieten die Inbetriebnahme der EIFS-Apparatur zu erproben, da diese Aspekte Studierenden Schwierigkeiten bereiten können, was zusätzlich in dieser Arbeit erhoben wurde.

Entwickelt wurde die virtuelle Lernumgebung angelehnt an den Entwicklungskreislauf nach T. Mayer (2001) und durch die Orientierung an einer virtuellen Lernumgebung von Richtberg und Girwidz (2013b). Währenddessen entstand ein Drehbuch für eine virtuelle Lernumgebung, die den o.g. Schwierigkeiten der Studierenden entgegen wirken soll. Die entsprechenden Lernziele wurden anhand eines leitfadengestützten Interviews (n=2) abgesteckt. Darauf aufbauend wurde die virtuelle Lernumgebung programmiert und in einem weiteren Interview (n=2) hinsichtlich der Bedienungsfreundlichkeit und Attraktivität für Studierende als Lernmedium getestet. Danach wurde die virtuelle Lernumgebung basierend auf den Erkenntnissen aus diesem Interview weiterentwickelt zu einer benutzerfreundlicheren, virtuellen Lernumgebung über den EIFS-Aufbau.

Aus der Sicht aller befragten Studierenden (n=2) wird die hier entwickelte, virtuelle Lernumgebung als eine Bereicherung für den Vorbereitungsprozess empfunden. Besonders heben sie die Anschaulichkeit der Darstellungen in der virtuellen Lernumgebung hervor sowie, dass sich durch deren Bearbeitung ein Gefühl der Sicherheit bei der Bedienung der realen Versuchsanlage einstellt. Gleichzeitig betrachten sie den Einsatz der virtuellen Lernumgebung aber kritisch indem sie bemerken, dass sie in vorigen Lehrveranstaltungen die Erfahrung gemacht haben, dass virtuelle Simulationen kaum Resonanz finden, was sie einer geringen Benutzerführung zuschreiben. Daher kommen die Studierenden zu dem Schluss, dass die hiesige Benutzerführung einer geringen Resonanz entgegen wirken kann.

Die virtuelle Lernumgebung hat das Potential Fehlvorstellungen der Studierenden über den EIFS-Praktikumsversuch zu beheben und dadurch Studierende von extrinsischer kognitiver Belastung zu entlasten (vgl. Sweller, 2005), sodass der Fokus auf weiterführende Lernziele gelegt werden kann.



# Literaturverzeichnis

- Ainsworth, S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers & Education*, 33(2-3), 131–152.
- Berger, V. (2010). Mit dem Computer im Unterrichtmodellieren. In H. F. Mikelskis (Hrsg.), *Physikdidaktik* (S. 139–143).
- Brünken, R. & Seufert, T. (2011). Wissenserwerb mit digitalen Medien. In P. Klimsa & L. J. Issing (Hrsg.), *Online-Lernen* (S. 105–114). Oldenbourg: Wissenschaftsverlag GmbH.
- de Jong, T. (2005). The Guided Discovery Principle in Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 215–228). Cambridge: Cambridge University Press.
- de Jong, T., Ainsworth, S., Dobson, M., van der Hulst, A., Levonen, J., & Reimann, P. (1998). The use of multiple Representations in Technology-Based Learning Environments. In M. W. van Someren (Hrsg.), *Learning with multiple representations* (S. 9–40). Advances in learning and instruction series. New York: Pergamon.
- Dick, E. (2000). *Multimediale Lernprogramme und telematische Lernarrangements // Multimediale Lernprogramme und telematische Lernarrangements: Einführung in die didaktische Gestaltung*. Reihe multimediales Lernen in der Berufsbildung. Nürnberg: BW Bildung und Wissen und BW, Bildung und Wissen, Verl. und Software.
- Dresing, T. & Pehl, T. (2015). *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse: Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende* (6. Aufl.). Marburg: Eigenverl.
- Edmonds, G. S., Branch, R. C., & Mukherjee, P. (1994). A conceptual framework for comparing instructional design models. *Educational Technology Research and Development*, 42(4), 55–72.
- Fricke, A. & Schecker, H. (2012). Hypermediale Vorbereitung auf das Physikalische Praktikum. In S. Bernholt (Hrsg.), *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht* (Bd. 32, S. 295–297). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Berlin [u.a.]: LIT.
- Fund, Z. (2007). The effects of scaffolded computerized science problem-solving on achievement outcomes: A comparative study of support programs. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23(5), 410–424. doi:10.1111/j.1365-2729.2007.00226.x
- Gay, G. & Mazur, J. (1991). Navigating in hypermedia. In E. Berk & J. Devlin (Hrsg.), *Hypertext* (S. 271–283). McGraw Hill software engineering series. New York: Intertext Publications : McGraw-Hill.
- Haack, J. (1997). Interaktivität als Kennzeichen von Multimedia und Hypermedia. In L. J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia* (S. 153–166). Weinheim: Beltz.
- Helfferrich, C. (2009). *Die Qualität qualitativer Daten: Manual für die Durchführung qualitativer Interviews* (3. Aufl.). SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH.
- Iske, S. (2003). Simulationen in der Hochschule: Arbeitspapier im Rahmen des Projektes „Evaluation Neuer Medien in den Geistes- und Naturwissenschaften“. Bielefeld.

- Zugriff 10. Juni 2016, unter [http://blog.hf.uni-koeln.de/medien/wp-content/blogs.dir/14/files/2011/03/2003\\_iske\\_workingpaper\\_eval\\_sim1.pdf](http://blog.hf.uni-koeln.de/medien/wp-content/blogs.dir/14/files/2011/03/2003_iske_workingpaper_eval_sim1.pdf)
- Issing, L. J. (1997). Instruktionsdesign für Multimedia. In L. J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia* (S. 195–220). Weinheim: Beltz.
- Issing, L. J. (2002). Neue Medien - Herausforderung und Chance für die Hochschule. In L. J. Issing (Hrsg.), *Studieren mit Multimedia und Internet* (Bd. 16, S. 9–17). Medien in der Wissenschaft. Münster: Waxmann GmbH Verlag.
- Kammerl, R. (2000). Computerunterstütztes Lernen: Eine Einführung. In R. Kammerl (Hrsg.), *Computerunterstütztes Lernen* (S. 7–22). Oldenbourg: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Kerres, M. (2000). Computerunterstütztes Lernen als Element hybrider Lernarrangements. In R. Kammerl (Hrsg.), *Computerunterstütztes Lernen* (S. 23–39). Oldenbourg: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Kerres, M., Ojstersek, N., & Stratmann, J. (2011). Didaktische Konzeption von Angeboten des Online-Lernens. In P. Klimsa & L. J. Issing (Hrsg.), *Online-Lernen* (S. 263–271). Oldenbourg: Wissenschaftsverlag GmbH.
- Klimsa, P. & Issing, L. J. (Hrsg.). (2011). *Online-Lernen: Handbuch für Wissenschaft und Praxis* (2. Aufl.). Oldenbourg: Wissenschaftsverlag GmbH.
- Leisen, J. (2004). Modellbildungssysteme zur Simulation dynamischer Vorgänge. Zugriff 6. Mai 2016, unter [http://www.studienseminar-koblenz.de/medien/wahlmodule\\_unterlagen/2004/119/4%20Modellbildungssysteme%20zur%20Simulation%20dyn%20amischer%20Vorgaenge.pdf](http://www.studienseminar-koblenz.de/medien/wahlmodule_unterlagen/2004/119/4%20Modellbildungssysteme%20zur%20Simulation%20dyn%20amischer%20Vorgaenge.pdf)
- Mandl, H. & Winkler, K. (2002). Neue Medien als Chance für Problemorientiertes Lernen an der Hochschule. In L. J. Issing (Hrsg.), *Studieren mit Multimedia und Internet* (Bd. 16, S. 31–48). Medien in der Wissenschaft. Münster: Waxmann GmbH Verlag.
- Mayer, R. E. (2005). Principles for Managing Essential Processing in Multimedia Learning: Segmenting, Pretraining, and Modality Principles. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 169–182). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, T. (2001). *I-Learning statt E-Learning: Ein integratives und universelles Modell für Lernsysteme jenseits von Schulbank und Seminarraum, Multimedia und Internet* (Inaugural-Dissertation, Friedrich-Alexander Universität, Erlangen-Nürnberg).
- Meder, N. (1994). Objektorientierte Wissensdarstellung und -navigation. In H. Best (Hrsg.), *Informations- und Wissensverarbeitung in den Sozialwissenschaften*. Opladen: Westdeutscher Verlag.
- Müller, R. (Hrsg.). (2003). *Quantenphysik in der Schule: Studien zum Physiklernen*. Berlin: Logos.
- Niebert, K. & Gropengießer, H. (2014). Leitfadengestützte Interviews. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftlichen- didaktischen Forschung // Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 121–132). SpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Spektrum.
- Niedderer, H. & Schecker, H. (1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In R. Duit, F. Goldberg, & H. Niedderer (Hrsg.), *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies; proceedings of an international workshop* (S. 74–98). Kiel: Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften.



- Oberländer, A. (2015). Beispiele aktueller IBE-Produktionen zum Ausprobieren. Zugriff 3. Dezember 2015, unter <http://didaktik.physik.fu-berlin.de/projekte/ibe/beispiele/%20index.html>
- Park, O.-C. & Hopkins, R. (1992). Instructional conditions for using dynamic visual displays: a review. *Instructional Science*, 21(6), 427–449.
- Reinmann, G. & Mandl, H. (2006). Unterrichten und Lernumgebungen gestalten. In A. Krapp (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 613–658). Lehrbuch. Weinheim [u.a.]: Beltz.
- Richtberg, S. & Girwidz, R. (2013a). Elektronenstrahlen im E- und B-Feld. *Unterricht Physik*, 24(138), 34–37.
- Richtberg, S. & Girwidz, R. (2013b). Unterstützung der Formelgenese mithilfe graphischer Überlagerung. München. Zugriff 6. Mai 2016, unter <http://www.phydid.de/index.php/phydid-b/article/view/458/598>
- Richtberg, S. & Girwidz, R. (2016). Versuchsaufbau zur Ablenkung von Elektronen im E-Feld. Zugriff 7. April 2016, unter <http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/elektronenbahnen/e-feld/hypothesen/Versuchsaufbau.php>
- Rincke, K. (2009). Bildmaterial mit dem Computer erstellen - Handwerkliche Griffe und Kniffe für leistungsfähige Visualisierungen. *Unterricht Physik*, 20(109), 36–37.
- Sandmann, A. (2014). Lautes Denken - die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftlichen-didaktischen Forschung // Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 179–188). SpringerLink : Bücher. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Spektrum.
- Schulmeister, R. (2001). *Virtuelle Universität - Virtuelles Lernen: Mit einem Kapitel von Martin Wessner*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Schulmeister, R. (Hrsg.). (2002). *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie - Didaktik - Design* (3. Aufl.). München [u.a.]: Oldenbourg.
- Strittmatter, P. & Mauel, D. (1997). Einzelmedium, Medienverbund und Multimedia. In L. J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia* (S. 47–61). Weinheim: Beltz.
- Strzebkowski, R. (1997). Realisierung von Interaktivität und multimedialen Präsentationstechniken. In L. J. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia* (S. 268–303). Weinheim: Beltz.
- Sweller, J. (2005). Implications of Cognitive Load Theory for Multimedia Learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 19–30). Cambridge: Cambridge University Press.
- Weidenmann, B. (2011). Multimedia, Multicodierung und Multimodalität beim Online-Lernen. In P. Klimsa & L. J. Issing (Hrsg.), *Online-Lernen* (S. 73–86). Oldenbourg: Wissenschaftsverlag GmbH.
- Westphal, A. (2011). Drehbuchsreiben für online Lernangebote. In P. Klimsa & L. J. Issing (Hrsg.), *Online-Lernen* (S. 197–206). Oldenbourg: Wissenschaftsverlag GmbH.
- Wiesner, H. (1986). Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten im Bereich der Optik. *Naturwissenschaften im Unterricht*, 34(13), 25–29.



# Selbständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel verwandt und die Stellen, die anderen benutzten Druck- und digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Quellenangaben kenntlich gemacht habe. (In die Versicherung sind gegebenenfalls auch Zeichnungen, Skizzen sowie bildliche und sonstige Darstellungen sowie Ton- und Datenträger einzuschließen.)

Huda Otto



## **A. Vorbereitungsunterlagen zum Praktikumsversuch**

# **Messung elektronenstoßangeregter Fluoreszenz von atomaren und molekularen Gasen**

## **Arbeitsgruppenversuch**

**A-Versuch für Modul PM1 „Fortgeschrittenenpraktikum MA“**

Universität Kassel

Fachbereich 10 - Naturwissenschaften

Institut für Physik

**Arbeitsgruppe Experimentalphysik IV - Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung**

**Prof. Arno Ehresmann**



### **Betreuer:**

Andreas Hans, [hans@physik.uni-kassel.de](mailto:hans@physik.uni-kassel.de)

Philipp Schmidt, [p.schmidt@uni-kassel.de](mailto:p.schmidt@uni-kassel.de)

Raum 0182, AVZ

Tel.: 0561-804-4046

Stand: März 2014

# Einleitung

Durch Messung der Zerfallsprodukte von angeregten Systemen kann viel über den Aufbau und die Eigenschaften von Atomen und Molekülen gelernt werden. Ein Teil der Arbeitsgruppe Experimentalphysik IV hat sich auf die Messung von Fluoreszenz spezialisiert, also die spontane Emission von Photonen durch ein angeregtes System. Zur Anregung wird in diesem Arbeitsversuch der Mechanismus des Elektronenstoßes benutzt. Da energetische Elektronen einen beliebigen Anteil ihrer Energie abgeben können, stellt der Elektronenstoß eine breitbandige Anregung dar. Dies ist nützlich um einen Überblick zu gewinnen, welche Zerfallskanäle grundsätzlich in einem System existieren. Bei späteren Experimenten können dann auftretende Übergänge zugeordnet werden.

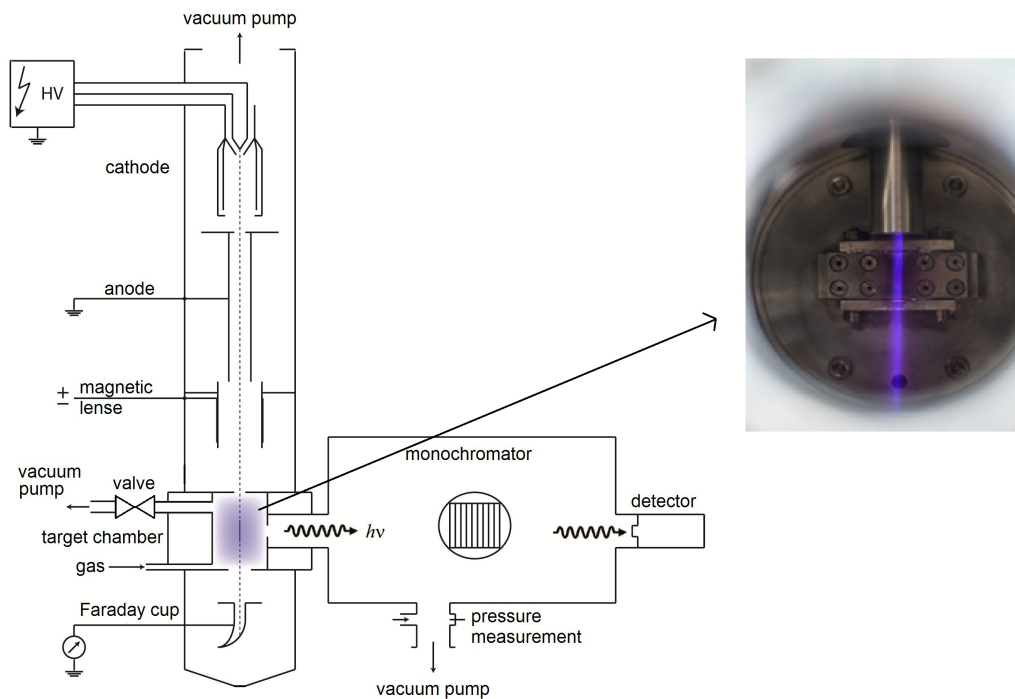
Im Experiment wird entstehende Fluoreszenz in einem Spektrometer mit einem optischen Gitter dispersiert und dann spektral aufgelöst gemessen. Hierfür werden positionsempfindliche Ein-Photonen-Detektoren benutzt. Es stehen Detektoren für den vakuum-ultravioletten bis sichtbaren Spektralbereich (40 nm - 600 nm) zur Verfügung. Als Target werden atomare oder kleine molekulare Gase in eine Zelle eingelassen. Da die Erzeugung eines ausreichend intensiven Elektronenstrahls nur im Vakuum möglich ist, ist der komplette Versuchsaufbau evakuiert.

Der Arbeitsgruppenversuch soll einen Einblick in die Spektroskopie bieten. Grundsätzliches für den Umgang mit Vakuumtechnologie sowie die Funktionsweise von modernen Photonendetektoren werden vermittelt. Bei der Auswertung kann Erfahrung mit der Analyse von Spektren und Literaturrecherche gewonnen werden.

## Apparatives

### Fernfokuselektronenquelle

Der apparative Aufbau zur Messung elektronenstoßangeregter Fluoreszenz [KBS12] ist in Abbildung 1 skizziert. Die aus einem Glühdraht emittierten Elektronen werden mit einer Anordnung von Wehneltzylindern in Richtung einer Anode gelenkt. Durch eine Hochspannung werden sie beschleunigt und mit einer magnetischen Linse ins Wechselwirkungszentrum fokussiert [Han13]. Seitlich des Wechselwirkungsvolumens befindet sich der Eintrittsspalt zum Spektrometer, in dem ein optisches Gitter die auftreffende Fluoreszenz dispersiert und damit räumlich trennt. Mit einem positionsempfindlichen Detektor am Austrittsarm wird die Fluoreszenz schließlich gemessen. Für ausreichend intensive Fluoreszenz ist ein Elektronenstrom im Wechselwirkungsvolumen in der Größenordnung von  $10\text{ }\mu\text{A}$  -  $100\text{ }\mu\text{A}$  nötig. Dazu müssen alle Betriebsparameter perfekt aufeinander abgestimmt sein. Die wesentlichen relevanten Größen sind die beschleunigende Hochspannung  $U_{\text{HV}}$ , die Spulenstromstärke  $I_{\text{Spule}}$  der magnetischen Linse und die Potentiale von innerem, mittlerem und äußerem Wehneltzy-



**Abbildung 1:** Skizze des Versuchsaufbaus zur Messung elektronenstoßangeregter Fluoreszenz. Bei hohem Gasdruck in der Targetkammer ist die Fluoreszenz mit bloßem Auge sichtbar.

linder  $U_{WI}$ ,  $U_{WM}$ ,  $U_{WA}$ . Teil des Versuchs ist eine Untersuchung des Einflusses dieser Parameter auf Strahlprofil und -intensität.

## Spektrometer

Verwendet wird ein 1m-NIM-Spektrometer von *McPherson* (Type 225), d.h., Wechselwirkungszentrum und Detektorebene befinden sich in einem Meter Abstand zum optischen Gitter. Über eine Mechanik kann das Gitter im Inneren von außen gedreht werden, sodass verschiedene spektrale Ausschnitte durch die Blende am Austrittsarm auf den Detektor fallen. Zur Aufnahme eines kompletten Spektrums ist deshalb die Messung mehrerer Ausschnitte und anschließendes Zusammenfügen erforderlich. Eine Skala gibt den aktuellen Stand des Gitters in  $\text{\AA}$  an. Diese Skala ist auf ein 600 Linien/mm-Gitter kalibriert. Wird ein Gitter mit höherer Liniendichte verwendet (es stehen noch Gitter mit 1200 bzw. 2400 L/mm zur Verfügung), muss der angezeigte Wert entsprechend halbiert bzw. geviertelt werden (Hinweis zur Vorbereitung: Warum?).

## Detektoren

Die Detektion der Photonen erfolgt folgendermaßen: Photonen treffen zunächst auf Mikrokanalplatten (englisch: *Micro-channel plate*, kurz: MCP), wo sie die Emission von Elektronenschauern auslösen [Han13, Wiz79]. Die Vorderseite des MCPs ist beschichtet. Die Beschichtung bestimmt den



Energiebereich der detektierbaren Photonen. Die orts aufgelöste Detektion selbst erfolgt dann durch Messung der Elektronenschauer auf ortsauflösenden Anoden [Han13, Kni12, Sch13].

## Vakuumapparatur

Für die Erzeugung eines Elektronenstrahls und die Anregung einer bestimmten Gasart ist Hochvakuum erforderlich. Der gesamte Aufbau wird dazu mit einer Vorpumpe und zwei Turbomolekularpumpen evakuiert, von denen eine oberhalb des elektronenemittierenden Glühdrahts und die andere am Spektrometer sitzt. Machen Sie sich zur Vorbereitung mit den Grundlagen der Vakuumphysik und -erzeugung vertraut [Dem1, Wut04].

## Versuchsdurchführung und Auswertung

### Aufgaben

#### 1. Einfluss der Betriebsparameter der Fernfokuselektronenquelle

Stellen Sie alle Betriebsparameter auf maximalen Elektronenstrom  $I_e$  ein. Variieren Sie nun die Parameter beschleunigende Hochspannung  $U_{HV}$ , Spulenstromstärke  $I_{Spule}$  der magnetischen Linse und Potential von innerem, mittlerem und äußerem Wehneltzylinder  $U_{WI}, U_{WM}, U_{WA}$  nacheinander um das Maximum. Beschreiben Sie qualitativ den relativen Einfluss auf den Betrag des Elektronenstroms ohne Gas in der Targetkammer. Lassen Sie dann Gas in die Kammer ein; die Fluoreszenz des Elektronenstrahls sollte nun mit dem bloßen Auge gut sichtbar sein. Variieren Sie die Parameter erneut und beschreiben Sie den Einfluss auf das sichtbare Strahlprofil.

#### 2. Laterale Quanteneffizienz des Detektors

Für Aussagen über relative Intensitäten von Übergängen sind Kenntnisse über die laterale Quanteneffizienz eines Detektors wichtig, da sie durch die räumliche Trennung in der Regel auf verschiedenen Detektorbereichen gemessen werden. Wählen Sie eine Gitterstellung, bei der ein deutlicher und isolierter Übergang auf dem Detektorbild zu sehen ist. Schieben Sie nun durch Drehung des Gitters diesen Übergang in 0,5 nm-Schritten über die Detektorfläche. Tragen Sie Intensität, Halbwertsbreite und Verschiebung gegen die Position auf dem Detektorbild auf.

#### 3. Messung zu aktuellen Themen der Fluoreszenzspektroskopie

Zur Fluoreszenzspektroskopie gibt es stets aktuelle Fragestellungen. Führen Sie eine Messung nach Anweisung des Betreuers durch und werten Sie diese aus.

## Generelle Informationen

- Der Versuch wird im Forschungslabor der Arbeitsgruppe durchgeführt. Vorher ist eine entsprechende Sicherheitsunterweisung durchzuführen. Den Anweisungen der Betreuer ist unbedingt Folge zu leisten.
- Der Inhalt von Aufgabenteil 3 ist an das aktuelle Forschungsprogramm der Arbeitsgruppe angepasst. Bei der Anmeldung erhalten die Praktikanten nähere Informationen und gegebenenfalls weitere Literatur.
- Die Anmeldung muss mindestens zwei Wochen vor geplantem Versuchsdatum bei den Betreuern persönlich erfolgen!
- Innerhalb von zwei Wochen nach dem Versuch muss das Versuchsprotokoll abgegeben werden!

# Vorbereitung und Literatur

Grundlagen der Atom- und Molekülphysik und zur Absorption und Emission von Strahlung [Dem3, HW04, Ber05] sind essentiell für diesen Versuch. Der experimentelle Aufbau und seine Verwendung zur Messung elektronenstoßangeregter Fluoreszenz sind in [KBS12, Han13] beschrieben. Bereiten Sie sich insbesondere auf Fragestellungen zu den folgenden Stichworten vor: quantenmechanische Beschreibung des Wasserstoffatoms, Zustände in einfachen Molekülen, Anregungs- und Abregungsprozesse, Einsteinkoeffizienten, Auswahlregeln, Interferenz und Dispersion, Erzeugung von Vakuum, Funktionsweise von Turbomolekularpumpen, Druckmessungen.

[Dem1] W. Demtröder, *Experimentalphysik 1*, 4. Auflage, Springer 2010

[Dem3] W. Demtröder, *Experimentalphysik 3*, 4. Auflage, Springer 2010

[HW04] H. Haken und H. Wolf, *Atom- und Quantenphysik*, 8. Auflage, Springer 2004

[Ber05] P. Bernath, *Spectra of Atoms and Molecules*, 2nd edition, Oxford University Press 2005

[KBS12] A. Knie et al., *Electron-impact induced fluorescence for EUV spectrometer-detector calibration*, J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom. **185** 492-497 (2012)

[Bro33] R. Brode, *The Quantitative Study of the Collisions of Electrons with Atoms*, Rev. Mod. Phys. **5** 257 (1933)

[Han13] A. Hans, Diplomarbeit, Universität Kassel, 2013

[Kni12] A. Knie, Dissertation, Universität Kassel, 2012

[Sch13] P. Schmidt, Diplomarbeit, Universität Kassel, 2013

[Wiz79] J. L. Wiza, *Microchannel plate detectors*, Nucl. Instr. and Meth., **162** 587 (1979)

[Wut04] M. Wutz, *Handbuch der Vakuumtechnik*, 8. Auflage, Vieweg 2004



## **B. Interviewleitfaden**

## Interventionen

### Gestalt

Beschreibt mal, wie ihr euch das Labor vorstellt. Welche Sinneseindrücke kann man wahrnehmen?
---

Beschreibt mal, wie ihr euch den Arbeitsplatz vorstellt. Abmessungen und Größenverhältnisse der Apparatur?
--

BILD: Wo befinden sich die Bauteile auf dem Bild?
---

### Sichtbarkeit

Stellt euch vor ihr könntet in die Apparatur hinein gehen. Kann man den Elektronenstrahl sehen? Wenn ja, wie sieht der aus?
--

Kann man den Photonenstrahl sehen? Wenn ja, wie sieht der aus?
---

Wie würdet ihr Elektronen und Photonen in einer Skizze darstellen?
--

### Parameter-Variation

Beschreibe den Ablauf, bis das Gerät betriebsbereit ist. Wie wird die Messung durchgeführt?
---

Was passiert bei der Variation von Parametern?
--

**Sind Schwierigkeiten bei der Vorbereitung aufgetreten?**

**Ins Labor gehen: Unterschiede?**

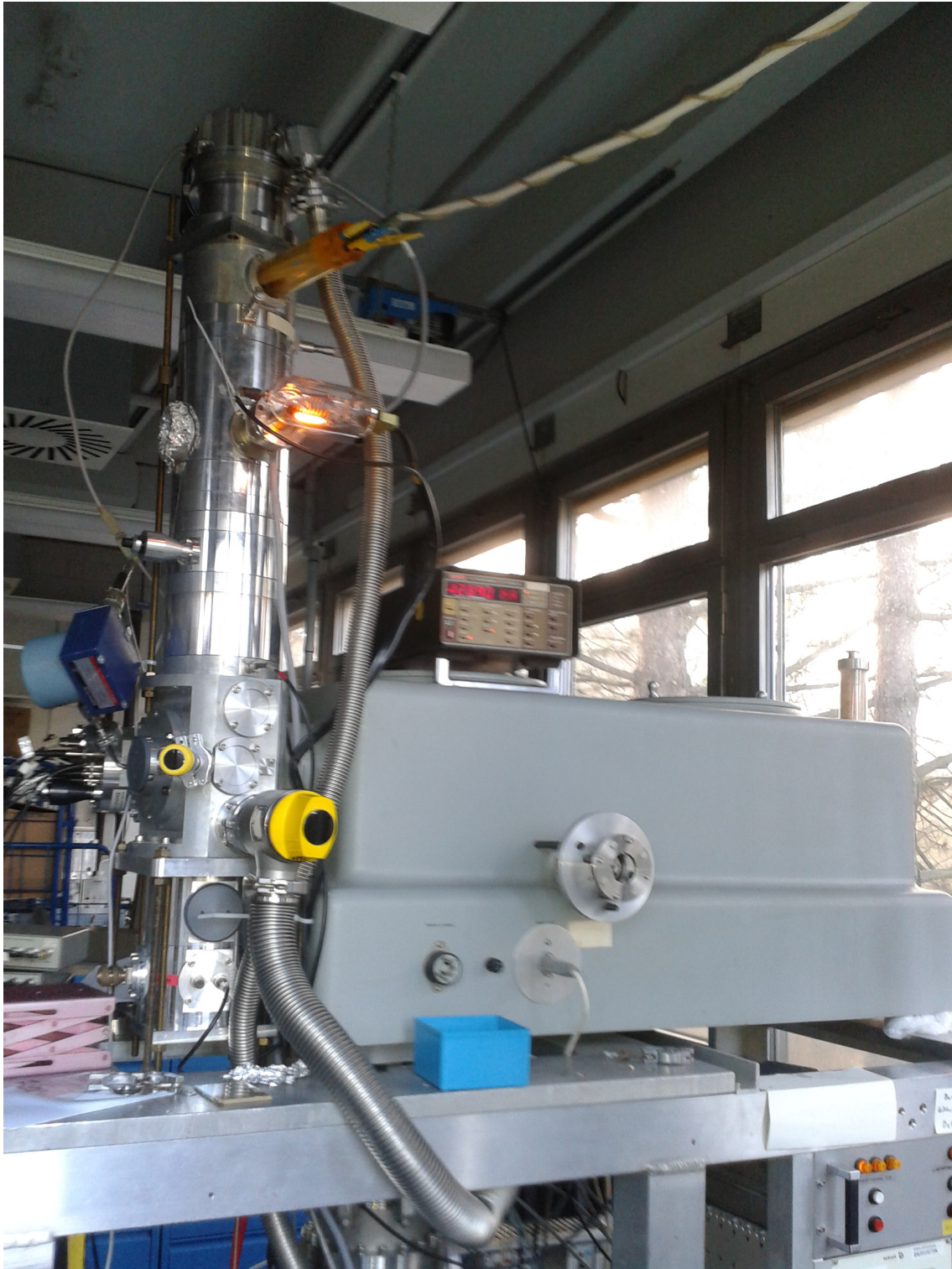


Abbildung B.1.: Foto des EIFS-Aufbaus.





## **C. Transkript zum leitfadengestützten Interview**

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

### (1) Gestalt

- 1 Interviewer: Also beschreibt vielleicht erstmal wie ihr euch das Labor vorstellt.  
2 #00:00:13-8#
- 3 Student1: Wie wir uns das Labor vorstellen? #00:00:14-1#
- 4 Student2: Das Labor kenne ich ja. #00:00:15-8#
- 5 Interviewer: Kennst du (Student2) das? #00:00:18-4#
- 6 Student2: Ist das oben? #00:00:18-4#
- 7 Interviewer: Das was früher McVeb war und jetzt Leila ist. #00:00:24-6#
- 8 Student2: Das oben bei neben Name1 und Name2 das Büro, neben dem Büro.  
9 #00:00:34-2#
- 10 Interviewer: Wenn du (Student2) das schon kennst, dann sag du (Student1) viel-  
11 leicht erstmal etwas. Es gibt ja z.B. einen Unterschied zwischen  
12 Chemie- und Physiklaboren. Kannst du da vielleicht erstmal anfan-  
13 gen, es ist ja ein Physiklabor, wie du dir das so vorstellst?  
14 #00:00:49-9#
- 15 Student1: Ja, wir haben da jetzt, gut, das hängt ja davon ab, werden da noch  
16 irgendwelche Chemikalien gelagert? Also naja, dann gehe ich mal  
17 davon aus, dass es keine Abzüge geben wird. Und da ich ja auch  
18 weiß, wie das sonst bei euch allgemein in der Arbeitsgruppe genau  
19 aussieht, stelle ich mir das fast vor als wenn es kein richtiger, extra  
20 Laborraum wäre, sondern, eben, so ähnlich wie der Seminarraum.  
21 Da wird ein Tisch rum stehen. Da wird nicht extra was gekachelt  
22 sein, sondern, da steht dann halt die Apparatur, die aus Edelstahl,  
23 denke ich mal ist, oder so sein wird, weil es halt eine Vakuumappa-  
24 ratur ist. Diverse Rechner, alles so im klassischen AVZ-Stil, wobei so  
25 eine Wand, sowas ungefähr, ja, äh, eher so im 80er Jahre Stil, also

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 26 nichts gekacheltes, wie man es so aus einem Chemielabor kennt,  
27 z.B. / #00:01:54-2#
- 28 Interviewer: Ok, willst du (Student2) mal schildern, wie du das Labor kennst?  
29 #00:01:56-6#
- 30 Student2: Das Labor ist etwas größer als der Raum hier, so von hier bis zum  
31 Ende der Küche, würde ich mal schätzen und auch doppelt, naja 1,5  
32 mal so breit. Viele Schubladen für Werkzeuge stehen dann noch da-  
33 rum, die Maschine steht dann noch hinten rechts. Regale stehen da  
34 rum, befüllt mit irgendeinem Kram. Was war noch? Der Boden halt.  
35 #00:02:42-0#
- 36 Student1: Laminat #00:02:42-0#
- 37 Student2: Laminat? Nein. Wie nennt man das? Also so wie du hier auf der Uni  
38 immer herum läufst. #00:02:45-2#
- 39 Student1: Ja. #00:02:50-5#
- 40 Interviewer: Ja. #00:02:50-5#
- 41 Student2: Mir fällt jetzt nicht so viel zum Boden ein. Relativ hoch ist der Raum,  
42 hinten links ist so eine tolle Säule, das weiß ich noch. Und vorne  
43 sind dann noch so/ #00:03:04-4#
- 44 Student1: Sicherheitsvorkehrungen oder so? Um zu sagen, dass irgendwas  
45 besonders ist?
- 46 Student2: Nein. #00:03:09-1#
- 47 Student1: Ok. #00:03:11-9#
- 48 Interviewer: Habt ihr denn oder kannst du dir vorstellen, was für Sinneseindrü-  
49 cke man dann so hat, wenn man rein kommt? #00:03:16-7#
- 50 Student2: Ja, wie Student1 ja schon sagte, da wird ja wirklich viel Krimskrams  
51 herumliegen, einfach Wartungstechnisch. Ich würde sagen, dass es  
52 da schon so ein Basteleindruck macht, dass da einfach mehr Sachen  
53 - nicht, dass da ein Chaos ist - aber ich kann mir schon vorstellen,  
54 dass da nicht alles Haarklein beschriftet abgelegt ist, sondern eben

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 55                   Regale wo sich eben ansammelt, was nützlich sind. Ja. Dann sollte ja  
56                   die Apparatur, steht da jetzt noch mehr drin, außer wirklich nur die  
57                   Fluoreszenz? #00:03:53-4#
- 58   Student1:     Das steht einfach so da. #00:03:55-9#
- 59   Student2:     Ok. Ja gut, die Pumpen sind dann noch da. Auf jeden Fall sollte der  
60                   Messaufbau schon das bestimmende Element sein in dem Labor.  
61                   #00:04:16-1#
- 62   Interviewer:  Jetzt habt ihr ja schon beschrieben, was es so alles gibt in dem La-  
63                   bor. Habt ihr auch noch einen Eindruck davon, was man hört oder  
64                   fühlt, wenn man da rein kommt. #00:04:37-2#
- 65   Student1:     Ja, klar, die Pumpen und eine Vibration durch die Pumpen. Wenn  
66                   die jetzt aus sind, weniger in der Hinsicht. #00:04:39-2#
- 67   Student2:     Geruch? Wofür ist denn der Abzug da? Was wird denn da noch?  
68                   Alles, was man da einleiten also spektroskopiert werden kann.  
69                   #00:04:49-7#
- 70   Student1:     Ne, das ist. Ich weiß nicht ganz genau was die da machen. Ein paar  
71                   Entwickler hast du da für Fotolacke. Achso, das wird da auch ge-  
72                   macht. Ok. #00:05:05-1#
- 73   Student2:     Nicht hauptsächlich. #00:05:08-6#
- 74   Student1:     Das ist da gelagert. #00:05:08-6#
- 75   Student2:     Das wird da gelagert. Das kannst du aber auch da machen, da ist ja  
76                   ein Abzug dafür. #00:05:13-2#
- 77   Student1:     Das hast du auch da gemacht in deiner Bachelorarbeit? #00:05:13-  
78                   2#
- 79   Student2:     Ich habe Aceton benutzt dafür. #00:05:15-4#
- 80   Student1:     Ah. #00:05:16-3#
- 81   Student2:     Ich habe nichts anderes als (unv., #00:05:20-1#) genommen.  
82                   #00:05:20-1#
- 83   Student1:     Ja. Ok. Du hast keine Entwickler gemacht. #00:05:22-4#

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 84 Interviewer: Ihr habt ja eben schon so ein bisschen angefangen den Arbeitsplatz  
85 zu beschreiben. Könnt ihr das nochmal wiederholen, oder ein biss-  
86 chen genauer erklären. #00:05:40-9#
- 87 Student1: Ja. Genau. Wir haben ja den Turm mit dem seitlichen Ausläufer, was  
88 dann letztendlich das Spektrometer sein soll. Oder ist das flachlie-  
89 gend? #00:05:46-9#
- 90 Student2: Ich stelle mir das - wie stelle ich mir das vor. #00:05:50-0#
- 91 Student1: Es wird kein (unv., #00:05:58-7#) sein. Es wird nicht so einen Me-  
92 ter hoch sein. #00:05:58-8#
- 93 Student2: Er [der Betreuer] hat halt so einen Turm erwähnt und meinte, das  
94 ist wirklich so ein Turm. Ich mein was ist denn praktischer? Man  
95 kann das alles auch liegend machen. #00:06:09-6#
- 96 Student2: Ich hab das Ding immer so als viereckigen Klotz in Erinnerung ge-  
97 habt. #00:06:14-6#
- 98 Student1: Ok. Also ich wüsste jetzt keinen Grund, warum das nicht auch hori-  
99 zontal sein könnte. Außer Transportbedingte, blöde Sachen.  
100 #00:06:22-7#
- 101 Student2: Ja. Zum Transportieren. #00:06:24-2#
- 102 Interviewer: Also stellt ihr euch das entweder liegend oder stehen, also das der  
103 Turm entweder so (vertikal) oder so (horizontal). Gut. Dann zeig  
104 ich euch mal ein Bild von dem Versuchsaufbau. Guckt euch das mal  
105 an und dann zeigt mal, wo ihr meint, dass sich die Bauteile, die ihr  
106 aus der Skizze kennt hier wieder finden würdet oder hier vermutet.  
107 #00:07:05-9#
- 108 Student1: Wir haben hier, dass Gitter ebend, den Monochromator, was man  
109 hier schön so glühen sieht/ #00:07:14-0#
- 110 Student2: Das ist der Glühdraht, höchstwahrscheinlich. #00:07:14-5#
- 111 Student1: Ja, genau das dürfte der Glühdraht sein. Hier oben wird dann die  
112 Vakuumpumpe sein, die eine, hier unten, dann noch eine weitere.

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

113 Die kann ich jetzt aber grad nicht so ausmachen - war zumindest  
114 von der Zeichnung so, glaube ich. #00:07:25-2#  
115 Student2: Kann sein, dass die zweite auch gar nicht dabei ist. #00:07:25-8#  
116 Student1: Auf jeden Fall hier wird dann das Gas eingelassen werden. Und ist  
117 das schon die Regelung für die Magnetspule. #00:07:37-7#  
118 Student2: Das wird irgendeine Regelung sein, wahrscheinlich. #00:07:37-7#  
119 Student1: Und ist das der Regler fürs Gitter? #00:07:47-9#  
120 Interviewer: Der ist im Grunde auf der gleichen Höhe aber auf der anderen Seite  
121 #00:07:47-9#  
122 Student1: Ah Ok. Also Monochromator hier. Elektronenquelle hier. Targetbe-  
123 reich hier. Pumpe. Pumpe und ja. #00:08:00-6#  
124 Interviewer: Gibt es noch Bauteile, die ihr noch nicht erwähnt habt. #00:08:07-  
125 3#  
126 Student2: Die Wehneltzylinder. #00:08:07-3#  
127 Student1: Die müssen dann irgendwo hier liegen. #00:08:08-3#  
128 Student2: Die müssten eigentlich in der Nähe vom #00:08:08-3#  
129 Student1: Die Spule wird irgendwo hier liegen. Ich weiß jetzt nicht, wie aktu-  
130 ell ist das Foto? Es gibt ja jetzt noch den Kondensator, der jetzt noch  
131 nicht erwähnt wurde, meinte er (der Betreuer) ja. #00:08:13-2#  
132 Interviewer: Genau. Der Kondensator ist in dem Bild noch nicht drin. #00:08:21-  
133 4#  
134 Student1: Ok, ja. #00:08:27-5#  
135 Student2: Also, was dieser Teil hier jetzt im Detail sein soll weiß ich jetzt nicht  
136 unbedingt. Ne, das ist nicht der Detektor, oder, ne. #00:08:37-2#  
137 Interviewer: Wo stellt ihr euch den Detektor vor? #00:08:38-9#  
138 Student1: Schon eigentlich eher hier so. #00:08:40-2#  
139 Student2: Kommt das nicht hier auf den Spalt und geht dann hier auf den De-  
140 tektor zurück. Dann müsste der Detektor hier, also irgendwo da  
141 hinten sein. #00:08:53-6#

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 142 Student1: Dann wär das Gitter mehr hier. #00:08:57-8#
- 143 Student2: Ja. #00:08:57-8#
- 144 Interviewer: Ich weiß, ihr habt es schon mal gesagt, aber für mich ist es halt  
145 wichtig, dass ich auch manche Fragen mehrmals frage, weil man die  
146 auch unter anderem falsch verstehen kann. Könnt ihr nochmal sa-  
147 gen, wo ihr meint, wo sich der Glühdraht befindet. #00:09:13-5#
- 148 Student1: Da hätten wir jetzt intuitiv gesagt, hier, weil das so schön leuchtet.  
149 Und, aber, gut, wie wird das dann rum-reflektiert? Eigentlich macht  
150 das keinen Sinn. #00:09:19-6#
- 151 Student2: Das Problem ist dabei: Eigentlich müsste der Glühdraht hier ir-  
152 gendwo in der Nähe von der Pumpe sein, weil die Pumpe sollte bei  
153 dem Glühdraht für ein gutes Vakuum sorgen. Es wäre auch ein biss-  
154 chen einfacher, die Elektronen zu fokussieren, wenn sie da drin  
155 sind. #00:09:38-8#
- 156 Student1: Es wäre auch ein bisschen einfacher die Elektronen zu fokussieren,  
157 wenn Sie dann da drin sind. Ich verstehe nur nicht. #00:09:46-1#
- 158 Student2: Ist das eine Überprüfung, ich weiß es nicht. Also eigentlich würde  
159 ich sagen, dass der eher hier ist. #00:09:49-0#
- 160 Interviewer: Ok und was ist dann das hier? (zeigt auf das Penning-Vakuumeter)  
161 #00:09:49-0#
- 162 Student1: Ist das die Spule? Magnetische Linse? #00:09:56-8#
- 163 Student2: Ne, die ist ja hier drin. #00:09:56-8#
- 164 Student1: Was ist das dann? #00:09:56-8#
- 165 Interviewer: Also da habt ihr auch im Kolloquium noch nicht drüber gesprochen.  
166 Aber habt ihr noch eine Idee, was es sein könnte? #00:10:13-9#
- 167 Student1: Ist das vielleicht ein Messgerät zur Überprüfung des Vakuums? Ich  
168 weiß ja nicht, es gibt ja noch diese Ion (unv., #00:10:36-3#) Ionisa-  
169 tionsmanometer. Nein, die sehen anders aus. Das ist nichts in der  
170 Richtung. Ich weiß es jetzt gar nicht. #00:10:38-3#

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 171 Interviewer: Ok. Und die Wehneltzylinder, wo stellt ihr euch die vor? #00:10:38-  
172 0#
- 173 Student1: Der sollte eben, wenn, der Glühdraht hier ist (zeigt auf eine adäqua-  
174 te Position für den Heizdraht) (...) / #00:10:44-3#
- 175 Student2: Ah, hier hast du wahrscheinlich auch die Hochspannung gelegt  
176 (zeigt auf die adäquate Position). #00:10:44-3#
- 177 Student1: Also sollte er hier (zeigt auf die adäquate Position für die Wehnelt-  
178 zylinder) sein. #00:10:53-1#
- 179 Student2: Also schließen wir es vollkommen aus, dass der Glühdraht das hier  
180 (zeigt auf das Penning-Vakuumeter) ist. #00:10:53-1#
- 181 Interviewer: Und das Faraday-Cup, wo stellt ihr euch das vor? #00:10:55-4#
- 182 Student1: Der sollte irgendwo am unteren Ende des Turms sein. Hier (unv.,  
183 #00:11:13-0#) wird die Strahlung, also die Photonen abgefangen.  
184 #00:11:13-4#
- 185 Student2: Und das hier ist die zweite Vakuumpumpe. #00:11:13-7#
- 186 Student1: Ja, das denke ich auch. #00:11:28-3#
- 187 Interviewer: Ok. Vielen Dank schon mal dafür. #00:11:28-3#
- 188 Student2: Kein Problem.

## (2) Sichtbarkeit

- 189 Interviewer: Stellt euch mal vor ihr könntet in die Apparatur rein gehen.  
190 #00:11:28-3#
- 191 Student2: Mhm. #00:11:28-3#
- 192 Interviewer: Was kann man dann sehen? #00:11:28-3#
- 193 Student2: Einen Glühdraht. #00:11:35-9#
- 194 Student1: Die Spule, hier irgendwo. #00:11:35-9#
- 195 Student2: Ja, die Spule auf jeden Fall. So ein Ding, was so ein Loch drin hat.  
196 #00:11:46-4#



## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 197 Student1: Ja, so blendenmäßig. #00:11:49-2#
- 198 Student2: Also Metalldings mit Loch. #00:11:55-1#
- 199 Student1: Oder was meinst du jetzt noch. #00:11:58-4#
- 200 Student2: Ja und da unten noch so einen gekrümmten Becher, den Faraday-
- 201 Becher. Wie sieht es denn da in der Errektionskammer, wie sollte es
- 202 denn da aussehen? Da hast du dann deinen Strahl. #00:12:12-9#
- 203 Student1: Wenn er eingelassen ist, dann sieht man ja das leuchten. #00:12:16-
- 204 4#
- 205 Interviewer: Welchen Strahl meinst du jetzt? #00:12:29-5#
- 206 Student2: Also du siehst den Elektronenstrahl und dann hast du deine Anre-
- 207 gung und dann hast du deine, wobei die Anregung geht ja nicht ge-
- 208 richtet. #00:12:29-5# #00:12:32-3#
- 209 Student1: Ja, ja. Die wird aber vor allem hier detektiert. #00:12:38-3#
- 210 Student2: Wenn dann da ein Gas drin ist, wird das dann leuchten. #00:12:38-
- 211 7#
- 212 Student1: Ja. leuchten. Dass sollten wir ja eigentlich auch überprüfen, also es
- 213 ist ja Aufgabe 1, dass wir diesen Fluoreszenzbereich ja erkennen
- 214 können, wenn Gas drin ist. #00:12:54-1#
- 215 Student2: Ja, genau, der Elektronenstrahl, der sollte dann eigentlich so
- 216 schraubenförmig sein. #00:12:54-3#
- 217 Student1: Den sehen wir aber nicht. Da ist ja nichts womit wir interagieren
- 218 können.
- 219 Interviewer: Also würdet ihr sagen, dass man den Elektronenstrahl sehen kann
- 220 oder nicht? #00:13:12-2#
- 221 Student2: Da auf jeden Fall, wenn da Gas drin ist. #00:13:12-3#
- 222 Student1: Hier oben will man ja möglichst kein Gas haben, das heißt wenn die
- 223 Apparatur funktioniert, wie sie funktionieren soll, dann sollte man
- 224 ihn nicht sehen können, weil da dann eben nichts da ist, womit die

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 225                    Elektronen wechselwirken können und deshalb nicht fluoreszieren.  
226                    #00:13:29-4#
- 227    Interviewer:    Genau. Dann habe ich noch eine Frage: Wie würdet ihr Elektronen  
228                    in einer Skizze darstellen? Ich habe leider jetzt keinen Stift.  
229                    #00:13:41-9#
- 230    Student1:       Ich würde sagen, dass das kommt ganz darauf an, was man denn  
231                    verdeutlichen will, was da die Eigenschaft von den Elektronen ist,  
232                    wenn man das in so einem Strahlencharakter zeichnen will, dann  
233                    zeichnet man sie eben als Teilchen, wenn man jetzt aber zeigen will,  
234                    dass Elektronen auch interferieren können, dann muss man sie als  
235                    Welle zeichnen, wie sie z.B. gebeugt werden an einem Gitter.  
236                    #00:13:55-7#
- 237    Interviewer:    Kannst du beschreiben, wie du das als Welle zeichnen würdest.  
238                    #00:13:57-3#
- 239    Student1:       Ja #00:14:02-3#
- 240    Interviewer:    Soll ich mal eben einen Stift holen? Ach da ist einer. #00:14:02-3#
- 241    Student1:       Kennt man ja. Ach Gott jetzt muss ich wieder. Kennt man ja z.B. bei  
242                    der Bragg Bedingung. Mit Netzebenen würde man auch erstmal so  
243                    eine gewisse Ausbreitungsrichtung der Welle zeichnen. Aber das  
244                    eigentliche Elektron würde man jetzt trotzdem in so einer Wellen-  
245                    struktur zeichnen, um dann bei zwei verschiedenen Elektronen-  
246                    strahlen, die Interferenz darzustellen und das ist eine Welleneigen-  
247                    schaft. Deshalb würde ich das als Welle skizzieren. Während ich  
248                    jetzt im Fall von so einem Elektronenstrahl, wie man es hier ma-  
249                    chen würde, schreiben wir ein Minus dran und sagen, das wäre ein  
250                    Strahl von Teilchen. #00:14:58-3#
- 251    Interviewer:    Und wie würdest du (Student2) das machen? #00:14:58-3#

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 252 Student2: Ich würde auch sagen / Ich würde es auch eher als Linie zeichnen.  
253 Jetzt in dem Fall von unserem Elektronenstrahl. Anstatt so eine  
254 Welle. #00:15:10-2#
- 255 Interviewer: Und die Photonen? #00:15:15-8#
- 256 Student1: Das kommt ja auch wieder drauf an. Ich meine, es gibt ganze Kon-  
257 zepte, die sich damit verhalten. Wenn man zum Beispiel mit einer  
258 gewissen Linsenoptik arbeitet, dann hat man eher das Strahlenmo-  
259 dell. Quasi, wenn man jetzt hier so ein Linsenaufbau hat und die fo-  
260 kussieren. Dann sagt man eher Strahlen. Während man, wenn man  
261 das Photon direkt beschreiben möchte, z.B. im Doppelspaltexperi-  
262 ment, da kommt die Wellennatur des Lichts. Also ich würde sagen,  
263 pauschal, kann man/ #00:15:54-2#
- 264 Student2: Beim Doppelspalt würde ich trotzdem noch mit Strahlen zeichnen.  
265 Ich würde fast immer nur mit Stichen machen und wenn ich unter-  
266 schiedliche Wellenlängen habe, dann würde ich zu den Strichen die  
267 Wellenlänge noch dazu zeichnen. Damit man den Unterschied sieht.  
268 #00:16:05-7#
- 269 Interviewer: Dann würdest du das hier in dem Spektrometer auch so machen mit  
270 Strahlen, den Photonenstrahl zeichnen? #00:16:19-3#
- 271 Student1: Ja, das haben wir im Kolloquium auch so gemacht, damit man zei-  
272 gen kann, wo z.B. auf dem Detektor die jeweilige Wellenlänge auf-  
273 kommt. Würde man auch wieder mit / In diesen Strahlen, wenn  
274 jetzt hier das Gitter ist – nein – das ist jetzt nicht 100 Prozent so ge-  
275 zeichnet. Das ist jetzt das Gitter und das ist/
- 276 Student1: Also das ist der Detektor und das ist das – in dem Fall – rote Licht  
277 und – in dem Fall – blaue Licht, nicht wahr? War doch ungefähr so?  
278 #00:16:50-9#
- 279 Student2: Wo ist die Nullte? #00:16:50-4#
- 280 Student1: Die Null war hier irgendwo. #00:16:53-2#

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 281 Student2: Das ist das Blaue und das das Rote? Ja Ok. #00:16:53-2#
- 282 Student1: So man würde auch hier wieder mit so einem Strahl anfangen.
- 283 Zeichnet die Farbe ein oder malt die Welle auf. Ja. #00:17:08-6#
- 284 Interview: Was haltet ihr von dieser Darstellung (Wellenpacket) für Photonen?
- 285 #00:17:14-5#
- 286 Student2: Das Wellenpacket. #00:17:18-9#
- 287 Student1: Gut, das allgemein das Konzept vom Wellenpacket verdeutlicht ja
- 288 ganz gut diese beiden, den Teilchen und den Wellenaspekt gut in al-
- 289 lem. Also ich finde es schon gut, aber in diesem Zusammenhang
- 290 wäre es ein bisschen übertrieben. #00:17:37-7#
- 291 Student2: Wenn man Skizzen zeichnet ist es halt immer etwas aufwendig das
- 292 so zu zeichnen, statt mal schnell so einen Strahl zu machen.
- 293 #00:17:40-5#
- 294 Interviewer: Ok, und wenn ihr eine Simulation hättet zu diesem Versuchsaufbau,
- 295 würdet ihr dann auch die Strahldarstellung bevorzugen? Sozusagen
- 296 würde sich der Aufwand lohnen, das so (Wellenpacket) darzustel-
- 297 len? Oder würde das das Verständnis nur verkomplizieren?
- 298 #00:17:59-9#
- 299 Student2: Nur wenn das wirklich wichtig ist. Also, wenn man genau darauf
- 300 hinaus will. Wenn man z.B. den Photoeffekt erklären will, dann ist
- 301 sowas als Zeichnung wichtig. Sonst ist das eigentlich egal, meiner
- 302 Meinung nach. #00:18:12-1#

### (3) Parameter-Variation

- 303 Interviewer: Ok, dann habe ich noch eine letzte Frage und zwar: Ob ihr mal den
- 304 Ablauf beschreiben könnt, was ihr tun müsst, bis das Gerät be-
- 305 triebsbereit ist. #00:18:29-6#
- 306 Student2: Die Vorpumpe anstellen. #00:18:38-0#

## **Transkript zum leitfadengestützten Interview**

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 307 Student1: Ja. #00:18:38-0#
- 308 Student2: Dann die Turbomolekularpumpen anstellen. #00:18:38-0#
- 309 Student1: Ja. #00:18:41-5#
- 310 Student2: Spannung. Nein, ich muss nochmal überlegen. Bevor man die Pum-
- 311 pen anschmeißt erstmal überprüfen, ob alle Ventile auch zu sind.
- 312 #00:18:52-4#
- 313 Student1: Ja, klar, sonst funktionieren die nicht #00:18:52-4#
- 314 Student2: Dass alle Dinge drin sind, also der Detektor ist drin, das Gitter ist
- 315 drin, das kann man ja austauschen, vorher muss man natürlich wis-
- 316 sen, welches Gitter man drin hat. Dann halt die Vorpumpen anstel-
- 317 len, Turbomolekularpump anstellen, Glühdraht Spannung drauf ge-
- 318 ben. Beschleunigungsspannung, Hochspannung drauf geben.
- 319 #00:19:21-6#
- 320 Student1: Ich denke, was der Betreuer, dann morgen in der halben Stunde
- 321 vorher macht ist, dass er schon auf maximalen Strom hier einstellt
- 322 unten. Dann allerdings nur wartet, weil er sich dadurch schon ver-
- 323 ändern wird, dadurch dass sich die Temperaturen verändern, so-
- 324 wohl bei Spule, die den fokussiert, als auch beim Glühdraht, der die
- 325 Elektronen emittieren lässt. Wird es da Abweichungen geben und
- 326 dann wird er schon mal eine erste Optimierung der Parameter ma-
- 327 chen bis es halt so läuft, dass es stabil ist. Und dann spielen wir qua-
- 328 si in der Aufgabe 1 nochmal daran rum und gucken wie dann der
- 329 Strom sich verhält. #00:19:50-8#

### **Schwierigkeiten**

- 330 Interviewer: Ja, genau. Hattet ihr irgendwelche Schwierigkeiten bei der Vorbe-
- 331 reitung, oder was man beim Vorbereitungsmaterial verbessern
- 332 könnte. #00:20:09-3#

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 333 Student1: Ich fand es diesmal gar nicht schlecht, dass da nur Stichworte stan-  
334 den und hier ist die Literatur dazu. Weil viele Versuche/ Ich meine  
335 wir sind jetzt im Master, da kann man schon mal erwarten, dass es  
336 ein bisschen freier geht. Aber in einem Anfängerpraktikum müssen  
337 natürlich die Inhalte nochmal selbst aufbereitet sein für den Ver-  
338 such. Von daher fand ich es jetzt nicht schlecht, dass endlich, was  
339 heißt endlich, aber, dass es mal ein fortgeschrittener Versuch war,  
340 wo einfach steht: „Hier könnt ihr was finden und dann guckt einfach  
341 selber nach.“ Und von daher passt das schon. Weil, das hat man ja  
342 im Kolloquium auch schon gemerkt, es gibt verschiedene Wege sich  
343 darauf vorzubereiten und ganz konkret bei den Auswahlregeln:  
344 Man kann es einmal über das Matrizenelement, quantenmechanisch  
345 begründen oder einfach nur über den Impuls. Und das macht einen  
346 in der Vorbereitung freier. Man liest einfach auch mal in Bereiche  
347 ein, die man, wenn man etwas serviert bekommt vielleicht außer  
348 Acht lässt. Also als Student nimmt man ja auch den Weg des ge-  
349 ringsten Widerstandes und dann liest man halt gerne das Vorbe-  
350 reitete. Die Stichworte waren gut, also es war schon ziemlich aufbe-  
351 reitet, weil im Demtröder steht das alles was hier aufgeführt war  
352 wunderbar aufbereitet drin. Eigentlich brauchte man sich mit  
353 nichts anderem vorzubereiten – gefühlt. #00:21:17-2#
- 354 Student2: Außer beim Vakuum. #00:21:17-2#
- 355 Student1: Gut, ja, beim Vakuum. Dazu haben wir aber so gut wie nichts gefragt  
356 bekommen. Von daher war das in Ordnung. Und es ist halt nicht nur  
357 die Literatur, sondern, dass auch die Diplomarbeiten von dem Be-  
358 treuer und dass auch noch Dissertationen aus der Gruppe nochmal  
359 zielgerichteter auf den Versuch vorbereitet haben. Also von daher  
360 würde ich sagen war das eigentlich nicht verbesserungsbedürftig.  
361 Für meinen Geschmack war das eigentlich gut genug. #00:21:36-6#

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 362 Student2: Ja, ich fand eigentlich auch, dass die Vorbereitung ok war. Vor al-  
363 lem, dass man die Diplomarbeit zum Versuchsaufbau betrachten  
364 konnte, die natürlich dann auch erklärt hat, wie das wirklich funkti-  
365 oniert. Das war ganz praktisch. Das Wichtigste stand dann auch  
366 noch auf den Zetteln, die man dazu hatte, da drauf zum Versuchs-  
367 aufbau und die Theorie, ja, das war auch ganz ok, dass da Bücher  
368 angegeben wurden. Mittlerweile bekommt man das schon ganz gut  
369 hin. #00:22:10-4#
- 370 Student1: Ja. #00:22:10-4#
- 371 Student2: Man weiß, dann auch eher welche Bücher man dann besser ver-  
372 steht. Im Buch ist das meistens auch besser erklärt, als man das in  
373 einem Skript vielleicht kann. #00:22:19-4#
- 374 Student1: Ja. #00:22:19-4#
- 375 Interviewer: Und habt ihr Dissertationen benutzt, um euch vorzubereiten?  
376 #00:22:24-6#
- 377 Student2: Ja #00:22:27-9#
- 378 Student1: Ja. Wir haben halt in die von mittlerweile Doktor Name3 reinge-  
379 guckt. #00:22:36-0#
- 380 Student2: Schon lange Doktor. #00:22:37-6#
- 381 Interviewer: Ja. #00:22:37-6#
- 382 Student1: Die war eben auf Englisch. Das war halt auch von den theoretischen  
383 Grundlagen ein bisschen anders aufgearbeitet, sage ich mal, war, als  
384 es jetzt in den Diplomarbeiten waren. Da hat man dann halt mal  
385 rein geguckt. Ich habe mich halt jetzt eher mit den Diplomarbeiten  
386 vorbereitet als mit der Dissertation. Hab mal drüber geguckt, aber ...  
387 #00:22:56-8#
- 388 Student2: Ich habe mir die Diplomarbeit vom Betreuer und einem anderen  
389 durchgelesen, also Teile davon gelesen. So ein bisschen, die Grund-  
390 lagen habe ich gelesen. Den Aufbau habe ich mir auch gelesen. Von

## Transkript zum leitfadengestützten Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

391 Dr. Name habe ich mir auch den Aufbau, was er dazu geschrieben  
392 hat, habe ich mir durchgelesen. #00:23:12-8#

393 Student1: Ja. #00:23:13-5#

394 Student2: Und das Paper von Dr. Name3 haben wir auch gelesen. #00:23:17-  
395 4#

396 Student1: Genau. In das Paper haben wir auch noch rein geguckt. #00:23:17-  
397 4#

398 Interviewer: Ist euch das schwer gefallen den Versuchsaufbau vorzustellen, nur  
399 anhand der Skizzen, die ihr vorher hattet? #00:23:35-4#

400 Student1: Ich würde sagen, der Versuchsaufbau ging halt, aber so Labor an  
401 sich, war eine etwas knifflige Frage, da denkt man nicht unbedingt  
402 drüber nach, weil man ja eher nur auf sowas fokussiert ist. Man hat  
403 gemerkt, dass Gitter ist ein bisschen anders. Beim Versuchsaufbau  
404 hast du das Gitter einfach mittendrin reingezeichnet bekommen.  
405 Was irgendwie nicht so stimmt, weil das sollte eigentlich so nach  
406 rechts (zeigt auf das Foto des EIFS-Aufbaus) sein und dann ist es  
407 sphärisch und es wird nicht gezeigt, wie das [Licht] dann zurück  
408 läuft. Der rechte Teil [der Skizze] ist so ein bisschen (...)/ Er stimmt  
409 dann nicht mehr so ganz. #00:24:12-9#

410 Student2: Bis auf das Ding, wo wir jetzt immer noch nicht so genau wissen,  
411 was das ist. #00:24:19-8#

412 Interviewer: Hier? #00:24:19-3#

413 Student2: Ja, genau. Das ist ein Penning-Vakuumeter. #00:24:21-2#

414 Interviewer: Das ist ein Penning-Vakuumeter. #00:24:26-2#

415 Student2: Also war das richtig. Dann ist das doch die Penning. #00:24:26-2#

416 Interviewer: Ja. Und mit dem Strahlengang hin und zurück meinst du, dass der  
417 zurück nicht dargestellt wurde, oder was? #00:24:38-1#

418 Student2: Ja, genau. Das wird nämlich einfach dadurch gezeichnet. #00:24:38-  
419 1#



## **Transkript zum leitfadengestützten Interview**

Ort: Kleiner Seminarraum der AG Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung

Datum: 15.12.2015

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

420 Student1: Ja. #00:24:40-3#



## **D. Transkript zum formativen Interview**

## **Interview-Transkript zum formativem Interview**

Ort: Kleiner Seminarraum der AG „Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung“

Datum: 18.01.2016

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

### **Befragung nach der Durchführung des EIFS-Versuchs**

- 1 Interviewer: Habt ihr das Gefühl, dass euch die Simulation Hilfe dabei gegeben  
2 hat den Versuch durchzuführen oder war das schon ganz weit weg?  
3 Ihr könnt ruhig beides erklären.
- 4 Student: Also, die Simulation war wirklich dahingehend fantastisch, dass  
5 man gleich ein Gefühl für das Gerät bekommt. Das gibt es in den  
6 meisten Vorschriften nicht. Das ist ein Sachtext, der einfach runter-  
7 geleiert wird. Da konnte man selbst ein bisschen anfassen auch be-  
8 wegen, einfügen und da lernt man das Gerät wenigstens kennen, so  
9 kam es mir jedenfalls vor. #00:00:56-1#
- 10 Studentin: Ja. #00:00:56-1#
- 11 Student: Ich hatte auch ein viel sichereres Gefühl, als einfach dann vor dem  
12 Gerät zu stehen. #00:00:59-0#
- 13 Studentin: Ja. Vor allem war das auch als wir die unterschiedlichen Parameter  
14 aussuchen konnten, z.B. bei den Spannungen war das, beim Gerät,  
15 da geht man ja nicht einfach so vom ganz kleinen direkt zu dem  
16 höchsten Wert und das konnte man da problemlos machen und  
17 dann auch richtig gut sehen. Also das fand ich ganz gut und dann  
18 hat man das Gerät auch schneller wieder erkannt. #00:01:29-9#
- 19 Interviewer: Das ist schön zu hören. Trotzdem ist es ja so, dass es bei der Simula-  
20 tion oder bei dem Aufbau der Lernumgebung noch zu Schwierigkei-  
21 ten gekommen ist. Fällt euch da was ein, was man an dem Aufbau  
22 noch verändern könnte? #00:01:57-6#
- 23 Student: Bei dem Aufbau jetzt als solchem. #00:02:04-7#
- 24 Interviewer: Oder bei dem Aufbau auf der Homepage auch. #00:02:01-3#  
25 #00:02:17-0#  
26

## Interview-Transkript zum formativem Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG „Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung“

Datum: 18.01.2016

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 27 Studentin: Also, das ist jetzt aber nur eine Kleinigkeit, ich hätte das "weiter"  
28 nach unten rechts gemacht. Ich hab erst nach unten rechts geguckt,  
29 habe da nichts gesehen und war dann erstmal verwundert. Das ist  
30 aber auch von Person zu Person unterschiedlich. #00:02:23-0#
- 31 Interviewer: Ja, aber, das ist ein wichtiger Punkt sowas brauche ich um die Simu-  
32 lation zu verbessern. #00:02:30-8#
- 33 Student: Was mir geholfen hätte, wäre bei dem ersten Schritt. Nicht dieses  
34 Informationszeichen, sondern vielleicht einfach die zu klickenden  
35 Verlinkungen farblich zu gestalten. Dann weiß man sofort, wenn  
36 etwas im schwarzen Text ist, dann weiß ich, ich muss diesen Text  
37 einfach nur lesen. Wenn es farblich gestaltet ist, z.B. in einem hell-  
38 blau, wie es für Verlinkungen häufiger ist, gehe ich direkt drauf und  
39 werde weiter geleitet und weiß ah, ich bin jetzt da. Oder einfach ein  
40 anderer Hintergrund. Dann weiß ich bin jetzt da. #00:03:02-6#
- 41 Interviewer: Das ist auch ein guter Punkt. #00:03:01-1#
- 42 Studentin: Ja und bei der letzten Folie war das, glaube ich, als dann das Spekt-  
43 rum, also der leere Kasten gezeigt wurde, da habe ich ja nicht gleich  
44 mitbekommen, also mir ist das irgendwie anfangs nicht aufgefallen.  
45 #00:03:23-2#
- 46 Student: Ja, der war nicht ganz zu sehen. #00:03:23-2#
- 47 Interviewer: Ja, das stimmt. Da war dann einfach nur so ein schwarzer Rahmen  
48 im Grunde, der da neu aufgetaucht ist. #00:03:27-2#
- 49 Studentin: Genau und das ist mir da nicht gleich aufgefallen. Das man da viel-  
50 leicht nochmal drauf hinweist und dass man dann nochmal den  
51 Spiegel variiert und dann guckt, was sich verändert. #00:03:41-3#
- 52 Interviewer: Ja, das ist ein guter Punkt. #00:03:41-3#
- 53 Student: Danach, wenn das erste angeklickt wurde, wurden wir auch wun-  
54 derbar direkt weiter durch das Programm geführt, das fand ich  
55 auch schön, dass das stufenlos regelbar ist, fand ist, ist sehr schön,

## Interview-Transkript zum formativem Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG „Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung“

Datum: 18.01.2016

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 56 dann kann man gleich mal wie oben aufdrehen, ohne, dass da ir-  
57 gendwie was los geht. Das war, hat schon viel gebracht, fand ich.  
58 #00:04:07-5#
- 59 Studentin: Ja, doch. Also es war auf jeden Fall auch sehr anschaulich.
- 60 Interviewer: Und könntet ihr euch auch Vorstellen zu Hause zu benutzen, oder  
61 würdet ihr, das wie ihr heute vor dem Kolloquium machen oder da-  
62 nach, das ginge ja auch? #00:04:30-2#
- 63 Student: Wenn mir das gegeben wird, direkt auf der Moodle-Homepage, di-  
64 rekt unter dem Skript. Mache ich das sofort. Es ist eine wunderbare  
65 Veranschaulichung des Aufbaus, man lernt sofort, was muss ich be-  
66 achten, was sehe ich da? Kurz vorher kann man das natürlich auch  
67 machen, vielleicht wird es aus Zeitnot auch so häufiger gemacht  
68 werden. Wenn ich aber, wie jetzt zum Beispiel, das Wochenende  
69 nutzen kann, das so durchzuführen, mache ich das liebend gerne  
70 auf der Homepage. #00:05:03-3#
- 71 Studentin: Ich probiere so etwas dann auch schon mal aus, wenn ich die Mög-  
72 lichkeit habe. Ich weiß allerdings nicht, ob das alle machen würden.  
73 Jetzt bei wir hatten nämlich in einer Vorlesung, da hatte Herr Na-  
74 me4 auch immer Computerprogramme zur Hilfe gegeben und das  
75 war dann auch Bestandteil der Übung und diese Aufgaben hat dann  
76 auch fast niemand gemacht. #00:05:31-9#
- 77 Student: Ja, aber da muss du differenzieren. So, von dem Aufbau, so wie wir  
78 ihn da gesehen haben, das ist nicht zu vergleichen. Man wird direkt  
79 dadurch geführt. Das Programm von Herrn Name4 ist vollkommen  
80 frei. Und diese Freiheit ist auch gleichzeitig problematisch. Man  
81 sitzt nämlich davor und weiß erstmal gar nichts. Weiß nicht wie  
82 man jetzt wo was hinein setzen soll, wo man welche Einstellungen  
83 machen soll. #00:05:57-2#
- 84 Studentin: Ja, das stimmt. #00:05:57-2#

## Interview-Transkript zum formativem Interview

Ort: Kleiner Seminarraum der AG „Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung“

Datum: 18.01.2016

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

- 85 Student: Das ist schon besser und es ist visuell ansprechend, ich lerne sehr  
86 stark über das visuelle, ich muss es anfassen, ich muss es ansehen.  
87 Das ist erheblich einfacher, als wenn ich dann so einen Text habe  
88 oder wie dann Herr Name4 gesagt hat, geben Sie diese und diese  
89 Terme an und dann hoffen Sie mal, dass es funktioniert. Ich persön-  
90 lich bin, damit nicht immer klar gekommen. #00:06:24-1#
- 91 Studentin: Ja, ich hatte da auch immer meine Probleme, da die sehr empfind-  
92 lich waren bezüglich der Maustasten. Also, das war hier sehr viel  
93 einfacher. #00:06:29-3#
- 94 Student: Ja. #00:06:32-4#
- 95 Studentin: Vor allem könnte ich mir auch vorstellen, vielleicht, weil das dann ja  
96 auch fortgeschrittene Studenten sind, dass man da das dann viel-  
97 leicht auch eher macht. Aber das müsste man wahrscheinlich aus-  
98 probieren. Aber so direkt vorher fand ich es auch nicht schlecht.  
99 #00:06:50-1#
- 100 Student: Egal wie, ich sehe darin eine Möglichkeit, noch kürzer als Texte zu  
101 lesen anzueignen. Man lernt es erheblich schneller. Man sieht es  
102 und macht es selbst und wenn man es zweimal gemacht hat, viel-  
103 leicht sogar im Höchstfall hat man es eigentlich drauf. Einmal reicht  
104 eigentlich schon um ein Grundverständnis entwickelt zu haben.  
105 #00:07:12-3#
- 106 Studentin: Ja. Was dann vielleicht noch ganz sinnvoll wäre, wenn man das jetzt  
107 zum Üben macht, wenn man das also einsetzt. Also z.B. die unter-  
108 schiedlichen Bauteile an die unterschiedlichen Stellen ziehen, wenn  
109 dann so ein richtig und falsch kommen würde. #00:07:36-9#
- 110 Interviewer: Also so ähnlich, wie bei dem Drag-and-Drop mit den Wörtern, aber  
111 das halt mit den Markierungen für den Glühdraht. #00:07:51-4#
- 112 Student: Ja, genau. #00:07:51-4#

## **Interview-Transkript zum formativem Interview**

Ort: Kleiner Seminarraum der AG „Dünne Schichten und Synchrotronstrahlung“

Datum: 18.01.2016

Uhrzeit: 09.00

Interviewer: Huda Otto

113 Studentin: Ja, ich glaube wir hatten das jetzt zwar alles richtig, da kam zumin-  
114 dest nichts anderes. #00:08:03-3#

115 Interviewer: Fällt euch sonst noch etwas ein, was ihr loswerden wollt.  
116 #00:08:08-4#

117 Student: Nein. #00:08:08-4#

118 Interviewer: Ok, vielen Dank. #00:08:08-6#



## **E. Bachelorthesis**

UNIVERSITÄT KASSEL  
Institut für Physik  
Experimentalphysik IV  
Heinrich-Plett-Straße 40  
34132 Kassel

Bachelorthesis

# Elektronenstoßangeregte Fluoreszenzspektroskopie von Methan im EUV-, VUV- und FUV

Huda Otto

7. Juli 2014

AG Experimentalphysik IV  
Dünne Schichten & Synchrotronstrahlung  
Betreuung durch Prof. Dr. Arno Ehresmann  
Co-Betreuung durch Dr. André Knie



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einführung und Thema</b>	<b>5</b>
<b>2. Experimentelle Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1. Aufbau des Experiments . . . . .	6
2.1.1. Die Fernfokuselektronenquelle . . . . .	7
2.1.2. Das Spektrometer . . . . .	8
2.1.3. Das Vakuumsystem . . . . .	8
2.2. Die Detektoren . . . . .	9
2.2.1. Der Open-Face-Detektor . . . . .	11
2.2.2. Photek PMT240 FUV Detektor . . . . .	12
<b>3. Theoretische Grundlagen</b>	<b>13</b>
3.1. Elektronenstoßanregung von Atomen und Molekülen . . . . .	13
3.1.1. Elektronische Zustände in Atomen . . . . .	13
3.1.2. Die LS-Kopplung . . . . .	15
3.1.3. Elektronische Zustände in Molekülen . . . . .	15
3.1.4. Anregung durch Elektronenstoß . . . . .	17
3.2. Fluoreszenz . . . . .	19
3.3. Elektrische Dipol-Auswahlregeln . . . . .	20
3.4. Methan und elektron-induzierte Prozesse . . . . .	21
3.5. Lyman-Serie des Wasserstoffspektrums . . . . .	22
<b>4. Aufnahme der Fluoreszenzspektren</b>	<b>23</b>
4.1. Messungen im Spektralbereich 30 bis 130 nm . . . . .	23
4.2. Messungen im Spektralbereich 110 bis 310 nm . . . . .	24
<b>5. Auswertung und Diskussion der Messungen von 30 - 130 nm</b>	<b>25</b>
5.1. Kalibrierung der Referenzspektrums . . . . .	25
5.2. Kalibrierung des Methanspektrums . . . . .	27
5.3. Identifizierung der Fluoreszenzübergänge . . . . .	28
5.4. Unsicherheiten der Wellenlängenkalibrierung des Methanspektrums . . . . .	32
5.5. Unsicherheiten $\delta I_{rel}$ der relativen Intensitäten . . . . .	33
<b>6. Auswertung und Diskussion der Messungen von 110 - 310 nm</b>	<b>34</b>
6.1. Kalibrierung des Methanspektrums . . . . .	34
6.2. Kalibrierung des Referenzspektrums . . . . .	36
6.3. Identifizierung der Fluoreszenzübergänge . . . . .	37
6.4. Unsicherheiten $\delta \lambda$ der Wellenlängenkalibrierung . . . . .	41
6.5. Unsicherheiten $\delta I_{rel}$ der relativen Intensitäten . . . . .	42
6.6. Alternative Kalibrierungsmethode . . . . .	43
6.6.1. Unsicherheiten der alternativen Kalibrierung . . . . .	46
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>47</b>

<b>A. Auswertungsscript des Matlab-Programmes</b>	<b>50</b>
A.1. Auswertungs-Script . . . . .	50
A.2. Erstellung der Fluoreszenzmatrizen . . . . .	55
A.3. Bestimmung der Koordinaten für Delay-Line-Anoden . . . . .	56
A.4. Bestimmung der Koordinaten für Keil-und-Streifen-Anoden . . . . .	58

# 1. Einführung und Thema

Die Fluoreszenz-Spektroskopie ist ein weites Forschungsfeld mit vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten z.B. zur Stoffanalyse in der Biologie und Chemie. So vielfältig wie ihre Anwendungen sind auch die verwendeten Methoden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Anregung des beobachteten Stoffes, Methan, durch Wechselwirkung mit Elektronen der Energie 3,5 keV. Dazu wird ein in der Arbeitsgruppe etablierter Versuchsaufbau verwendet. Die Fluoreszenz-Übergänge werden im Spektralbereich von 30-310 nm untersucht.

Bei Methan handelt es sich um das einfachste organische Molekül. Es besteht aus Wasserstoffatomen, die tetraedrisch an ein zentrales C-Atom gebunden sind. Viele organische, aber auch nicht-organische Stoffe weisen chirales Verhalten auf. D.h. es existieren Stoffe gleicher Summenformel, also gleicher Zusammensetzung an Elementen, deren geometrische Anordnungen der Atome spiegelbildlich zueinander sind. Solche Stoffe können sich in ihren biologisch-chemischen Eigenschaften stark unterscheiden. Enantiomere können z.B. in Medikamenten verschiedene Wirkungen haben. Die gleiche geometrische Anordnung wie Methan weist Halomethan auf. Dieses Molekül besitzt auch ein zentrales C-Atom, das aber mit je einem H, F, Cl und Br verbunden ist (Abb. 1.1). Halomethan ist ein chirales Molekül. Die biologischen Eigenschaften chiraler Moleküle sind im Vergleich zu deren elektronischer Struktur relativ unbekannt und deshalb Teil aktueller Forschung. Das Projekt zur Untersuchung ELEKTRODYNAMISCHER CHIRALER SYSTEME (ELCH) widmet sich chiralen Molekülen. Langfristig soll Halomethan untersucht werden.

Methan bietet gegenüber Halomethan einen wesentlichen Vorteil. Methan besteht aus weniger Elementen. Die Messung an Methan bildet somit eine Vorstufe zur Untersuchung des chiralen Halomethans. Es wird sich zeigen, ob das Methanspektrum bei der Untersuchung von Halomethan als Referenzspektrum dienen kann.

Methan selber ist nicht chiral. Ziel dieser Arbeit ist es die fluoreszierenden Spezies, die bei der Wechselwirkung zwischen Elektronen und gasförmigem Methan entstehen, und die zugehörigen Übergänge zu identifizieren. Es werden atomare und molekulare Fragmente von Methan erwartet.

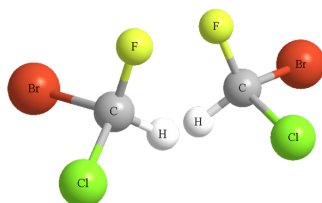


Abbildung 1.1.: Enantiomere und tetraedrische Struktur des Halomethans.

## 2. Experimentelle Grundlagen

Dieses Kapitel handelt vom Aufbau des Experiments. Ausgewählte funktionelle Untersysteme werden erklärt. Im Detail sollen die Detektoren beschrieben werden. Diese haben einen besonderen Stellenwert, da sie den beobachteten Energiebereich maßgeblich beeinflussen. Die Abstimmung zwischen Detektor und Gitter ist ebenfalls entscheidend für die Qualität der Messergebnisse, daher wird der Einsatz unterschiedlicher Gitter erläutert.

### 2.1. Aufbau des Experiments

Der experimentelle Aufbau ist einteilbar in Fernfokuselektronenquelle und Spektrometer (Abb. 2.1).

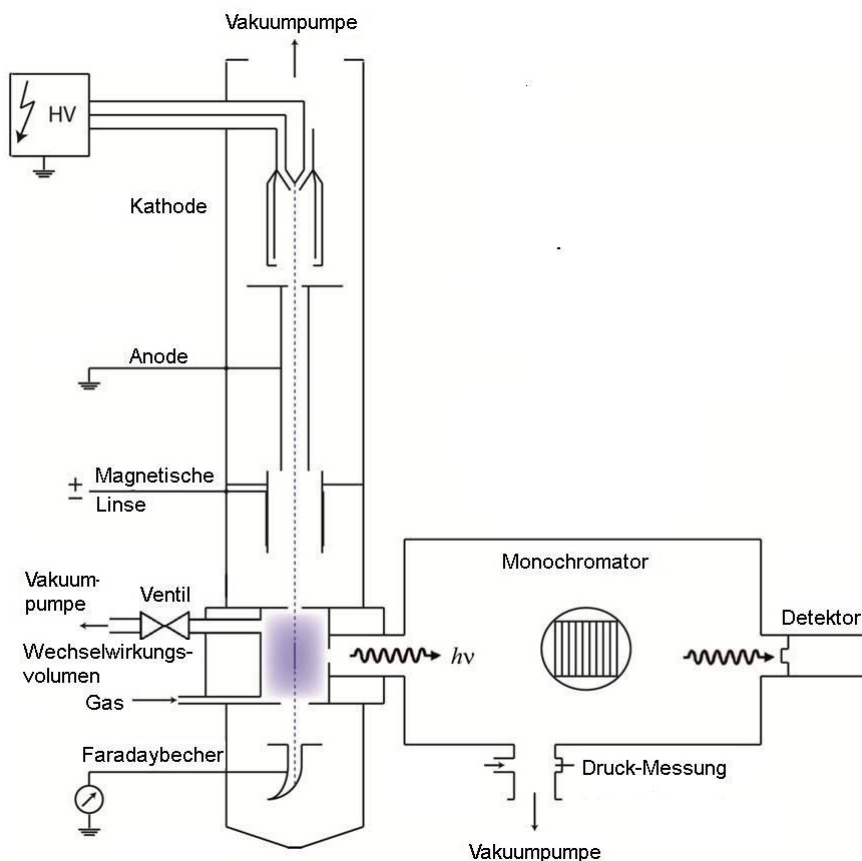


Abbildung 2.1.: Schematischer Aufbau des Versuchsaufbaus [Han13].

In der Fernfokuselektronenquelle werden Elektronen auf 3500 eV beschleunigt. Innerhalb der Gaszelle wechselwirken das Probegas und die Elektronen.

Nach dem Anregungsprozess gehen die Gasmoleküle fluoreszierend in niedrige Zustände über. Die Fluoreszenzphotonen werden an einem Gitter dispergiert und können so energie-aufgelöst gemessen werden.

### 2.1.1. Die Fernfokuselektronenquelle

Die Elektronen werden von einem Wolframdraht, durch den ein Strom von etwa 2 A fließt, emittiert. Der Draht dient gleichzeitig als Kathode. Der Strahl durchläuft anschließend ein Fokussierungssystem (Abb.2.1). Es besteht aus Wehneltzylindern (Abb. 2.2), der Anode, einer magnetischen Linse und einer Blende.

Die Formen der Wehneltzylinder sind in Abb. 2.2 dargestellt. Sie werden zur Fokussierung und Stromstärkeregelung des Strahls verwendet. Die Form und die Spannung erzeugen eine präferierte Flugrichtung der Elektronen. Die Elektronen werden durch die zylinderförmige Anode beschleunigt.

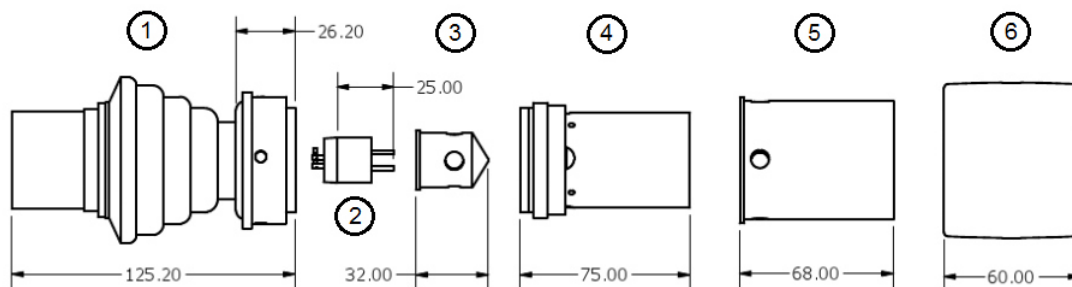


Abbildung 2.2.: Die Heizdrahthalterung ② hat eine Länge von 25 mm, der erste Wehneltzylinder ③ von 32 mm, der zweite Wehneltzylinder ④ von 75 mm und der dritte Zylinder ⑤ von 68 mm. Bei dem Bauteil ⑥ handelt es sich um die Schraubvorrichtung, die an der Fassung ① der Fernfokuskathode befestigt wird. Dies dient dazu, die Zylinder zusammen zu halten [Kni12].

Eine magnetische Linse verschiebt den Fokuspunkt des Strahls. Sie besteht aus einer Spule mit 285 Windungen bei einer Länge von 9,5 cm und einer Dicke von 4,5 cm. Der Betriebsstrom beträgt ungefähr 1,3 A. Zwischen der magnetischen Linse und der Zelle ist eine Blende eingebaut, um zu gewährleisten, dass im Wechselwirkungsvolumen ein hoher Druck herrschen kann, sodass das restliche Volumen des Aufbaus weitgehend evakuiert bleibt [Kni14].

Nachdem die Elektronen die Zelle passiert haben, treffen sie auf den Faradaybecher. Dabei wird der Elektronenstrom gemessen. Außerdem ermöglicht der Becher einen kontrollierten Abzug der energiereichen Elektronen. Heizstrom, Spulenstrom und Wehneltspannung werden so gewählt, dass der Strom im Faradaybecher möglichst groß ist. Es hat sich herausgestellt, dass die Fokussierung technisch notwendig ist. Bei fehlender Fokussierung wird kein messbares Signal erzeugt [Kni14].



## 2. Experimentelle Grundlagen

### 2.1.2. Das Spektrometer

Es wird ein kommerzieller Monochromator des Typs 225 der Firma McPherson benutzt. Typischer Weise befindet sich ein Austrittsspalt vor der Detektorhalterung, damit Photonen einer Wellenlänge extrahiert werden können. Dieser Spalt wird in diesem Aufbau nicht verwendet. Sodass die Bezeichnung Spektrometer treffender ist als Monochromator [Kni14]. In das Spektrometer wird ein Gitter eingebaut und an ihn ein Detektor angeschlossen.

Die Photonen treten durch einen Spalt, dessen Breite  $100\text{ }\mu\text{m}$  entspricht, in das Spektrometer (Abb. 2.1). Im Monochromator trifft der Fluoreszenzstrahl auf das optische Gitter. Damit unterschiedliche Wellenlängen des Lichts gemessen werden können muss das Gitter über eine mechanische Vorrichtung gedreht werden. Diese ermöglicht es, das Gitter über eine durch McPherson patentierte Technologie automatisch so einzustellen, dass die Fokussierung des Lichts in der Detektorebene optimal ist [Bur11].

### 2.1.3. Das Vakuumsystem

Das System besteht aus zwei Pumpentypen, der Vor- und der Turbomolekularpumpe. Die Vorpumpe ist so angeschlossen, dass sie gleichzeitig im Spektrometer und in der Fernfokuselektronenquelle für Vakuum sorgt. Die Anschlüsse sind zum Teil in Abb. 2.1 angedeutet. Sie erzeugt in ca. 20 min ein Druck von etwa  $10^{-2}$  mbar. Dann können die Turbomolekularpumpen eingeschaltet werden, sodass ein Druck von einigen  $10^{-6}$  mbar im Spektrometer erzeugt wird.

Im Versuchsaufbau sind vier Arten von Druckmesselementen integriert, ein Piranielement, eine Heißkathode, eine Penning-Röhre und ein Baratron. Mit dem Piranielement wird der Druck, den die Vorpumpe erzeugt, gemessen. Daher ist es am Übergang zwischen Vorpumpe und Spektrometer angebracht. Die Heißkathode dient der Druckmessung im Gang des Elektronenstrahls. Sie ist daher zwischen den Wehneltzylindern und der Anode angebracht. Die Penning-Röhre misst den Druck im Monochromator und mit Hilfe eines Baratrons wird der Druck in der Messzelle gemessen. Die Penning-Röhren eignen sich zur groben Druckmessung, während der Druck im Wechselwirkungsvolumen sehr genau gemessen werden soll. Daher wird dort ein Baratron verwendet. Die Heißkathode gewährt gegenüber einer Penning-Röhre, die Abwesenheit eines Magnetfeldes, sodass die Elektronen durch die Druckmessung nicht abgelenkt werden.

## 2.2. Die Detektoren

Zur Detektion müssen einzelne Photonen in ein elektrisches Signal umgewandelt werden. Dazu wird, bei den hier verwendeten Detektoren, der Photoeffekt ausgenutzt. Trifft ein Photon auf eine Oberfläche, so können unter Absorption des Photons Elektronen aus der Oberfläche emittiert werden. Dazu muss die Energie  $E_{ph}$  der Photonen größer als die Austrittsarbeit  $W$  der Elektronen aus der Oberfläche sein, also

$$E_{ph} = h\nu > W \quad (2.1)$$

mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  und der Frequenz  $\nu$ . Somit limitiert das Material der Photokathode den messbaren Bereich zu niedrigen Energien hin.

Um einen messbaren Elektronenstrom zu erzeugen werden sogenannte Mikrokanalplatten (Abk.: MCP) genutzt. Diese sind von Kanälen durchsetzte Platten. Die Kanäle haben einen Durchmesser von einigen  $\mu\text{m}$  und schließen mit der Oberfläche der Platten einen Winkel zwischen  $0$  und  $15^\circ$  ein [AnHa]. Sie haben die Aufgabe, den Elektronenstrom zu vervielfachen. Der Verstärkungsfaktor des Signals innerhalb eines MCPs liegt in der Größenordnung von  $10^4$  [Han13]. Das Wirkungsprinzip dieser Bauteile ist unten in Abb. 2.3 (a) dargestellt.

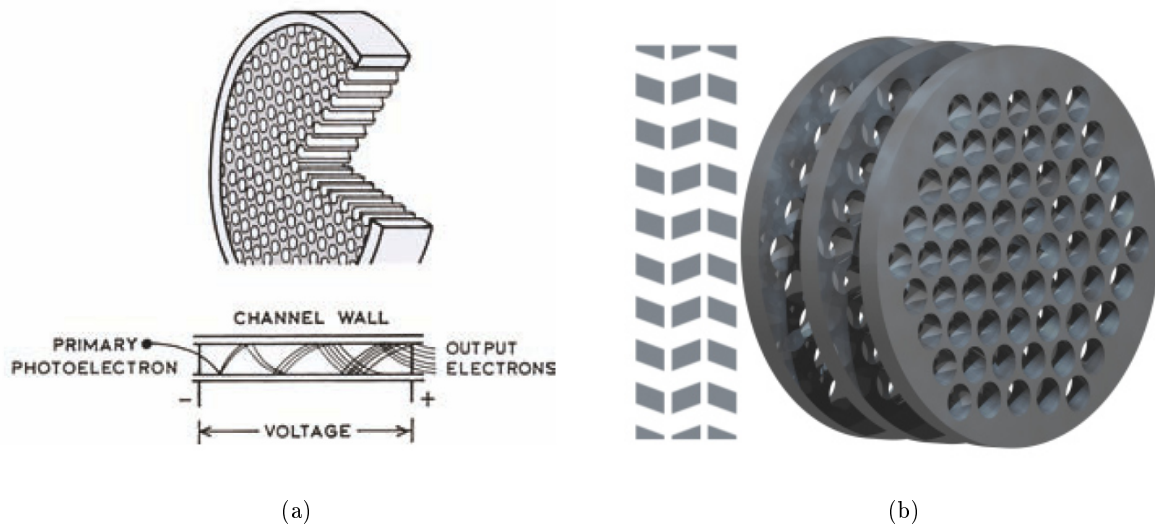


Abbildung 2.3.: (a) Oben: MCP mit Mikrokanälen. Unten: Ein Mikrokanal an dem die Funktionsweise demonstriert wird [Lan06]. (b) Anordnung dreier MCPs hintereinander, im sogenannten Z-Stack. Die Bezeichnung bezieht sich auf die Anordnung der Tunnel zueinander [Rei10].

Dies geschieht über Emission von Sekundärelektronen. Der Effekt eines MCPs kann verstärkt werden, indem mehrere hintereinander verwendet werden (siehe Abb. 2.3 (b)). Damit die Elektronen auf ihrem Weg durch die Mikrotunnel häufig mit den Tunnelwänden stoßen, wird zwischen Vorder- und Rückseite jeden MCPs eine Spannung von ca. 1 kV angelegt.

Der grundlegende Detektoraufbau ist in Abb. 2.4 dargestellt. Auf seinem optischen Weg passiert ein

## 2. Experimentelle Grundlagen

Photon zunächst ein Fenster oder Gitter. Dann wird aus der Kathode ein Elektron emittiert. Photonen hoher Energien werden unter Umständen durch das Fenster absorbiert, während Photonen niedriger Energien die Bedingung des Photoeffekts nicht erfüllen. Der detektierbare Bereich ist somit durch Fenster und Kathode begrenzt (Abb. 2.4(b)).

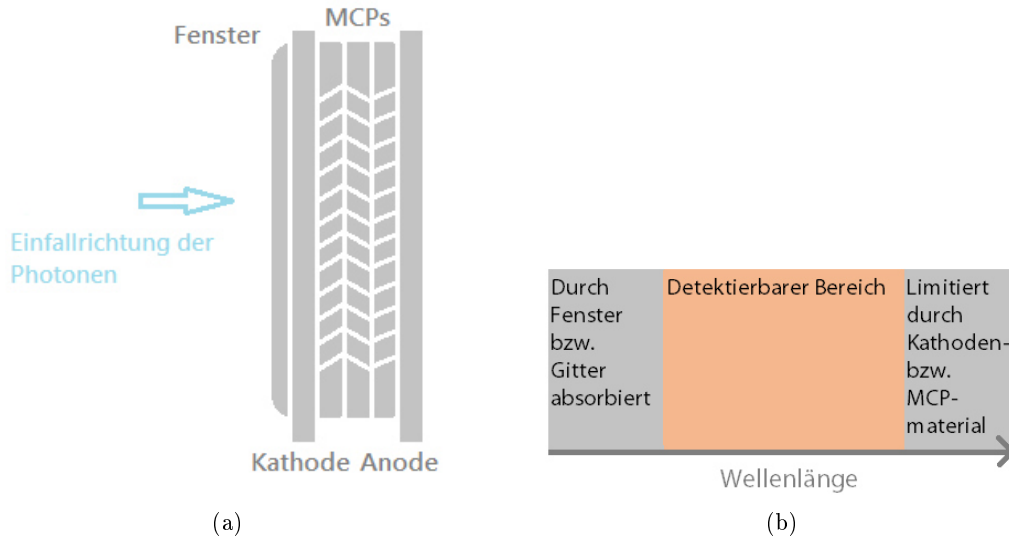


Abbildung 2.4.: (a) Schematischer Aufbau eines Detektors. (b) Begrenzung des detektierbaren Bereichs.

Schließlich trifft die, von den MCPs generierte, Elektronenschauer auf die Anode mit dem Potential 0 V. Die Anode ist so aufgebaut, dass der Auftreffort der Elektronenschauer berechnet werden kann (Abschnitte 2.2.1 und 2.2.2).

Eine Übersicht der verwendeten Detektoren und deren messbarer Energiebereich ist in Abb. 2.5 dargestellt. Auf Einzelheiten der beiden verwendeten Detektoren wird in den folgenden Abschnitten eingegangen.

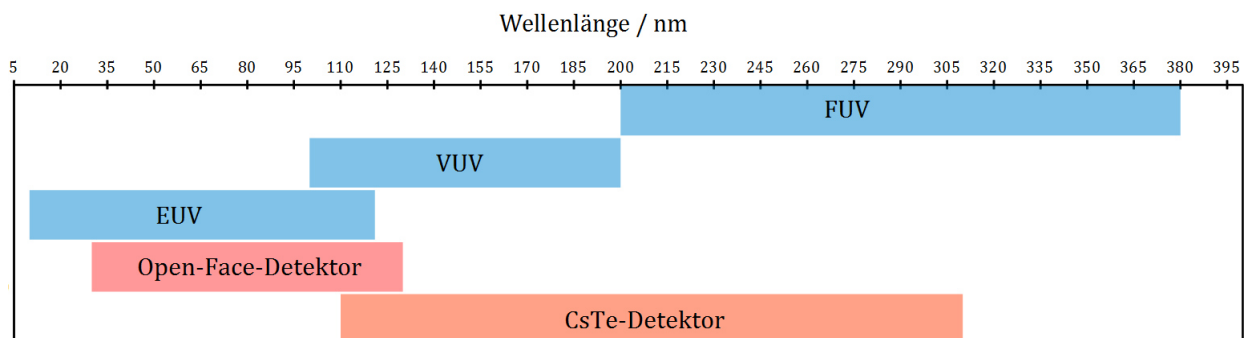


Abbildung 2.5.: Definition der Spektralbereiche „Extremes Ultraviolett“ (EUV), „Vakuum Ultraviolett“ (VUV) und „Fernes Ultraviolett“ (FUV), sowie die detektierbaren Bereiche der beiden Detektoren [Nor84].

### 2.2.1. Der Open-Face-Detektor

Der Open-Face-Detektor detektiert Photonen im Wellenlängenbereich von 30 bis 130 nm [Sch13]. Dieser Bereich liegt im EUV (10-121 nm) [Nor84].

Um Störsignale durch auftreffende Ionen zu verhindern wird hier ein großmaschiges Drahtgitter mit ca. 1 cm<sup>2</sup> großen Maschen, das auf positivem Potential liegt, verwendet. Die Photonen treffen direkt auf die MCPs. Der Detektor wird daher auch „Open-Face-Detektor“ genannt. Da keine externe Kathode vorhanden ist, bestimmt die Oberflächenbeschichtung der MCPs den detektierbaren minimalen Energiebereich. Die vom MCP erzeugte Ladungswolke wird mit einer Keil-und-Streifen-Anode detektiert. Diese besteht aus drei zueinander isolierten Leitern, die in einer Ebene liegen (Abb.2.6). Leiter A zeichnet sich durch keilförmige Spitzen aus, während Leiter B streifenförmige Abschnitte besitzt. Zwischen A und B liegt Leiter C, der Meander, der den Zwischenraum füllt.

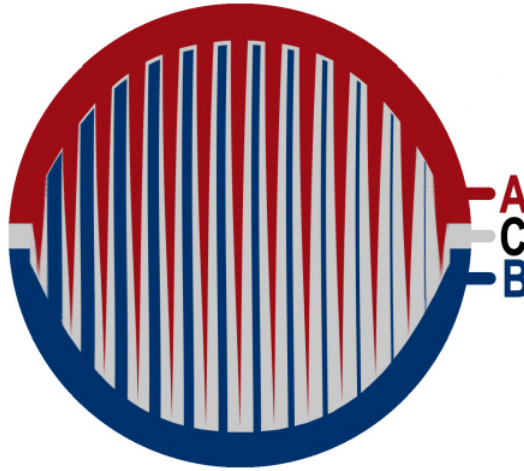


Abbildung 2.6.: Aufbau der Keil-Steifen-Anode [Rei10].

Trifft ein Elektronenschauer auf die Anode, so geben die Signale A, B und C Aufschluss über den Auftreffpunkt. Trifft die Schauer oben links auf die Anode, so sind die Signale A und B stark relativ zu C. Trifft Sie unten rechts auf, so ist C stark relativ zu A oder B. Die x- bzw. y-Positionen können also aus den Signalen berechnet werden [Bur11]

$$x \propto \frac{B}{A + B + C} \quad (2.2)$$

$$y \propto \frac{A}{A + B + C} \quad (2.3)$$

Der Detektor wird in Verbindung mit einem Gitter der Anzahl  $g$  der Spalte des Gitters pro mm und Blazewellenlänge  $\lambda$ :

$$g = 2400 \frac{1}{\text{mm}} \quad (2.4)$$

$$\lambda = 800 \text{ Å} \quad (2.5)$$

## 2. Experimentelle Grundlagen

verwendet.

### 2.2.2. Photek PMT240 FUV Detektor

Der Hexagonal-CsTe-Detektor ist sensibel für Photonen im Wellenlängenbereich 110-310 nm. Dieser Bereich liegt im VUV (100-200 nm) [Nor84].

Um Störsignale durch auftreffende Ionen zu verhindern und die Kathode vorm Verdampfen zu schützen ist ein Fenster aus MgF vorhanden [Sch13]. Die Photokathode besteht aus CsTe. Sie ist auf das Fenster aufgedampft und durch dieses geschützt. Die MCPs sind im Z-Stack angeordnet (Abb.2.3). Diese Anordnung besteht aus drei MCPs, deren Tunnel z-förmig angeordnet sind [Sch13]. Die Funktionsweise der Anode ist vergleichbar mit einer Anode aus drei Leiterebenen (Abb.2.7). Sie sind um einen hexagonalen Rahmen gewickelt.

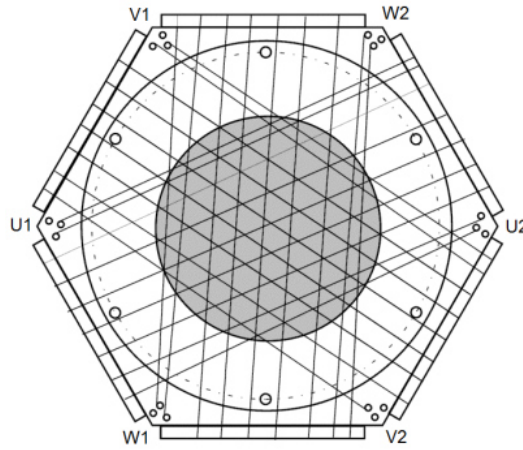


Abbildung 2.7.: Die dargestellte, hexagonale Anode weist die gleiche Funktionsweise auf wie die tatsächlich verwendete Anode [Jag02].

Trifft die Elektronschauer auf die Anode, so fließt in den Leitern ein Strom. Aus den Laufzeiten der Elektronen in den Drähten können dann die Ortskomponenten bestimmt werden. Diese Rechnung kann in [Jag02] nachvollzogen werden.

In Verbindung mit diesem Detektor wird ein Gitter der Anzahl  $g$  der Spalte des Gitters pro mm und einer Blazewellenlänge  $\lambda$ :

$$g = 1200 \frac{1}{\text{mm}} \quad (2.6)$$

$$\lambda = 1500 \text{ Å} \quad (2.7)$$

verwendet.

## 3. Theoretische Grundlagen

Die ersten drei Abschnitte dieses Kapitels sind allgemeiner Art. Es werden die Entstehung elektronischer Zustände in Atomen und Molekülen, Fluoreszenz und Auswahlregeln erklärt. Die Inhalte diesen Abschnittes stammen aus [Nol04] und [Her45].

Anschließend wird spezieller auf Auswirkungen des Elektronenstoßes mit Methanmolekülen eingegangen.

### 3.1. Elektronenstoßanregung von Atomen und Molekülen

Während Atome nur elektronische Energieniveaus aufweisen, können Moleküle auf unterschiedliche Arten Energie aufnehmen. Durch ihre räumliche Struktur können sie neben elektronischer Anregung auch vibratorische und rotatorische Anregungen erfahren.

#### 3.1.1. Elektronische Zustände in Atomen

Die elektronische Anregung in Atomen kann quantenmechanisch beschrieben werden. Dabei werden elektronische Zustände durch Quantenzahlen beschrieben. Hierbei wird zwischen Quantenzahlen, die den Zustand eines Elektrons angeben und Quantenzahlen, die durch Kombination mehrerer Elektronenzustände entstehen, unterschieden.

Die Zustände einzelner Elektronen werden durch die Hauptquantenzahl  $n$ , die Bahndrehimpulsquantenzahl  $l$ , die magnetische Quantenzahl  $m_l$  und durch die Spinquantenzahl  $s$  beschrieben. Dies wird am H-Atom demonstriert: Es wird dazu angenommen, dass die Elektronen sich in einem Raum um den Atomkern befinden, der das Potential

$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r} \quad (3.1)$$

einer homogen geladenen Kugel aufweist, wobei  $Z$  die Kernladungszahl,  $e$  die Elementarladung und  $r$  den Kernabstand bezeichnen. Für das H-Atom gilt  $Z = 1$ . Elektronenzustände können aus den möglichen Wellenfunktionen eines Teilchens bestimmt werden. Diese Wellenfunktionen  $\psi$  müssen die Schrödinger-Gleichung erfüllen. Da es sich bei  $V(r)$  um ein Zentralpotential handelt eignet sich, für das H-Atom, die stationäre Form in Kugelkoordinaten [Nol04]

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{L^2}{2mr^2} + V(r) \right] \psi(r, \theta, \phi) = E\psi(r, \theta, \phi) \quad (3.2)$$

### 3. Theoretische Grundlagen

mit der Elektronenmasse  $m$ , dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  und der Energie  $E$  des zu  $\psi$  gehörenden Elektronenzustandes. Zur Lösung werden also die Polarkoordinaten  $\theta$ , der Winkel zwischen z-Achse und  $r$ , und  $\phi$  als azimuthaler Winkel verwendet. Über einen Produktansatz

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r)Y(\theta, \phi) \quad (3.3)$$

wird die Lösung ermittelt. Es stellt sich heraus, dass

$$R(r) = R_{nl}(r) \text{ und } Y(\theta, \phi) = Y_{lm_l}(\theta, \phi), \text{ sodass} \quad (3.4)$$

$$\psi(r, \theta, \phi) = \psi_{nlm_l}(r, \theta, \phi). \quad (3.5)$$

Die Lösung  $\psi$  ist abhängig von den Quantenzahlen  $n$ ,  $l$  und  $m_l$ , mit [Her45, Nol04]

$$n \in \mathbb{N} \quad (3.6)$$

$$0 \leq l \leq n, \text{ mit } l \in \mathbb{N}_0 \quad (3.7)$$

$$-l \leq m_l \leq l, \text{ mit } m_l \in \mathbb{Z} \quad (3.8)$$

wobei

$$l = 0 \text{ als s-Zustand,} \quad (3.9)$$

$$l = 1 \text{ als p-Zustand,} \quad (3.10)$$

$$l = 2 \text{ als d-Zustand,} \quad (3.11)$$

$$l = 3 \text{ als f-Zustand,} \quad (3.12)$$

$$\text{etc.} \quad (3.13)$$

bezeichnet werden.

Jedes Elektron weist außerdem die Eigenschaft eines Spins auf. Dieser wird durch die Spinquantenzahl  $s$  beschrieben und ist nicht Teil der oben beschriebenen Lösung (3.5). Diese beträgt für Elektronen

$$s = \pm \frac{1}{2} \quad (3.14)$$

Das H-Atom besitzt nur ein Elektron. Für ein Atom mit mehreren Elektronen wird davon ausgegangen, dass jedes Elektron durch Quantenzahlen  $n$ ,  $l$ ,  $m_l$  und  $s$  beschrieben werden kann.

Allerdings besteht eine Wechselwirkung zwischen den einzelnen Elektronen. Es gibt unterschiedliche sogenannte Kopplungsfälle. Im Folgenden wird nur die LS-Kopplung thematisiert, da im Experiment nur Übergänge beobachtet werden, bei denen die LS-Kopplung auftritt.

### 3.1.2. Die LS-Kopplung

Ein Kopplungsfall, die LS-Kopplung, zeichnet sich dadurch aus, dass die Wechselwirkung zwischen den Bahndrehimpulsen, die durch die Quantenzahlen  $l_i$  ( $1 < i < N$ ) der  $N$  Elektronen beschrieben werden, größer ist, als die Wechselwirkung zwischen  $l_i$  und  $s_i$  eines  $i$ -ten Elektrons. Die Folge ist, dass zunächst die  $l_i$  miteinander bzw. die  $s_i$  untereinander koppeln, sodass neue Quantenzahlen  $L$ ,  $S$  und  $J$  von Bedeutung werden. Hier wird am Beispiel eines zwei-Elektronen-Systems gezeigt, wie Gesamt-Drehimpuls-Quantenzahl  $L$  und Gesamt-Spin-Quantenzahl  $S$  sich im Kopplungsfall ergeben ( $l_1 \geq l_2$ ,  $s_1 \geq s_2$ )

$$L = (l_1 + l_2), (l_1 + l_2 - 1), \dots, |l_1 - l_2| \quad (3.15)$$

$$S = (s_1 + s_2), (s_1 + s_2 - 1), \dots, |s_1 - s_2| . \quad (3.16)$$

Der Quantenzahl  $L$  werden Termsymbole in folgender Weise zugeordnet:

$$L = 0 , \text{ Termsymbol: } S \quad (3.17)$$

$$L = 1 , \text{ Termsymbol: } P \quad (3.18)$$

$$L = 2 , \text{ Termsymbol: } D \quad (3.19)$$

$$\text{etc. .} \quad (3.20)$$

Die Quantenzahlen  $L$  und  $S$  koppeln zu der Gesamtdrehimpulsquantenzahl  $J$

$$J = (L + S), (L + S - 1), \dots, |L - S| . \quad (3.21)$$

Die Anzahl der möglichen Zustände  $M$  bei gegebenem  $J$  heißt Multiplizität und kann aus der Gesamt-spinquantenzahl  $S$  berechnet werden

$$M = 2S + 1 . \quad (3.22)$$

Die Informationen über einen elektronischen Zustand im Falle der LS-Kopplung werden durch Gesamt-Bahndrehimpuls-Quantenzahl  $L$ , Multiplizität  $M$  und Gesamt-Drehimpuls-Quantenzahl  $J$  in Form des Termsymbols [Her45]

$$^M L_J \quad (3.23)$$

ausgedrückt.

### 3.1.3. Elektronische Zustände in Molekülen

Verursacht durch die räumliche Struktur der Moleküle ergeben sich einige Unterschiede zwischen elektronischen Zuständen von Atomen und Molekülen. Bindungen zwischen Kernen können durch die Molekülorbital-Theorie erklärt werden. Dabei entstehen durch Linearkombination der atomaren elektronischen Niveaus, Orbitale des Moleküls. An der Bindung haben nur die Valenzelektronen teil. Im



### 3. Theoretische Grundlagen

zweiatomigen Molekül werden die Orbitale durch die Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl

$$\Lambda \in \mathbb{N}_0 \quad (3.24)$$

und weitere Quantenzahlen (s.u.) beschrieben. In Analogie zur Nomenklatur atomarer Zustände mit der Gesamt-Bahndrehimpuls-Quantenzahl  $L$ , existiert die Gesamt-Bahndrehimpuls-Quantenzahl  $\Lambda$  für Moleküle. Es werden verschiedenen  $\Lambda$  Termsymbole in folgender Weise zugeordnet:

$$\Lambda = 0, \text{ Termsymbol: } \Sigma \quad (3.25)$$

$$\Lambda = 1, \text{ Termsymbol: } \Pi \quad (3.26)$$

$$\Lambda = 2, \text{ Termsymbol: } \Delta \quad (3.27)$$

$$\Lambda = 3, \text{ Termsymbol: } \Phi \quad (3.28)$$

$$\text{etc. .} \quad (3.29)$$

Die Gesamtspin-Quantenzahl wird bei Molekülen mit  $\Sigma$  bezeichnet. Diese entsteht, wie bei Atomen, durch die Kopplung der Spinquantenzahlen  $s_i$  der Bindungselektronen zu  $S$

$$\Sigma = S, S - 1, \dots, -S. \quad (3.30)$$

Ähnlich, wie bei Atomen, setzen sich  $\Lambda$  und  $\Sigma$  zur Gesamt-Drehimpuls-Quantenzahl  $\Omega$  zusammen

$$\Omega = |\Lambda + \Sigma|. \quad (3.31)$$

Bei gegebenem  $\Lambda$  gibt es auch hier eine Anzahl  $M$  an möglichen Elektronenzuständen von

$$M = 2S + 1. \quad (3.32)$$

Auch in Molekülen wird jedes Elektron durch eine Wellenfunktion beschrieben. Wegen der räumlichen Ausdehnung der Moleküle können diese Symmetrie-Eigenschaften aufweisen, die bei der Betrachtung von Atomen keine Rolle spielen.

Es werde die Spiegelung an einer Ebene, die die Kernverbindungsachse beinhaltet, betrachtet. Bei der Spiegelung der Wellenfunktion eines  $\Sigma$ -Terms an dieser Ebene kann sich das Vorzeichen ändern. Dann wird der Term als negativ bezeichnet, anderenfalls wird er als positiv bezeichnet. Die Kennzeichnung erfolgt im ersten Fall durch ein „-“ und im zweiten Fall durch ein „+“.

Es werde nun die Spiegelung an einem weiteren Symmetriezentrum betrachtet. Das durch die Kerne entstandene E-Feld ist symmetrisch und weist eine Symmetrieebene auf. Diese liegt senkrecht zur Kernverbindungsachse. Die Spiegelung der Wellenfunktion an dieser Ebene kann achsen- oder punktsymmetrisch sein. Im Falle der Achsensymmetrie spricht man von gerader und im anderen Falle von ungerader Parität, was mit „g“ bzw. „u“ gekennzeichnet wird [Her39].

Zusammengefasst werden all diese Informationen, über die Multiplizität  $M$ , die Gesamt-Bahndrehimpuls-

Quantenzahl  $\Lambda$  und die Gesamt-Drehimpuls-Quantenzahl  $J$  im Termsymbol der Form

$$^M \Lambda_{P,\Omega}^{\text{Symmetrie}} \quad (3.33)$$

mit der Parität  $P = u, g$  und der Symmetrie  $+$  oder  $-$ .

### 3.1.4. Anregung durch Elektronenstoß

Der Stoß zwischen beschleunigten Elektronen und den Molekülen im Wechselwirkungsvolumen kann aus Sicht der Moleküle in folgender Weise betrachtet werden. Das Molekül befinde sich zum Zeitpunkt  $t = 0$  im Eigenzustand  $|E_a^{(0)}\rangle$  des Hamilton-Operators  $H_0$ . Dann befindet es sich zu einem späteren Zeitpunkt  $t$  im Zustand [Nol04]

$$|\psi(t)\rangle = U(t, 0)|E_a^{(0)}\rangle, \quad (3.34)$$

wobei  $U(t, 0)$  der Zeitentwicklungs-Operator ist. Aus Sicht des Moleküls kann das Vorbeifliegen des Elektrons als Störung der Dauer  $t_s$  aufgefasst werden. Diese Störung kann bewirken, dass das Molekül in einen anderen Energiezustand  $|E_e^{(0)}\rangle$  übergeht. Die Übergangswahrscheinlichkeit ist gegeben durch [Nol04]

$$w_{ae}(t) = \left| \langle E_e^{(0)} | \psi(t) \rangle \right|^2. \quad (3.35)$$

Für den Messvorgang zum Zeitpunkt  $t > t_s$  befindet sich das Molekül stets im gleichen Zustand [Nol04]. Es zeigt sich, dass bestimmte Übergänge bevorzugt, also mit besonders hoher Intensität, auftreten. Ist das Übergangs-Matrix-Element

$$\langle E_e^{(0)} | \hat{m} | E_a^{(0)} \rangle \quad (3.36)$$

eines Dipolmoments  $\hat{m}$  gleich Null, so ist dieser Übergang dipol-verboten, andernfalls dipol-erlaubt. Welche Übergänge erlaubt sind, wird durch Auswahlregeln angegeben (Abschnitt 3.3).

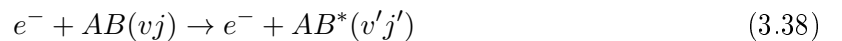
Tritt ein zweiatomiges Molekül  $AB$  mit Elektronen  $e^-$  in Wechselwirkung, so sind diverse Prozesse denkbar:

- Rotations- und Vibrationsanregungen



mit Vibrationsquantenzahl  $v$  und Rotationsquantenzahl  $j$ .

- Elektronische Anregungen



mit oder ohne gleichzeitiger Rotations- und Vibrationsanregung.

### 3. Theoretische Grundlagen

- Dissoziative Prozesse der Formen



- Ionisation



- Dissoziation



## 3.2. Fluoreszenz

Der Begriff Lumineszenz bezeichnet allgemein die Emission von Licht basierend auf Übergängen zwischen elektronischen Energieniveaus [Lan06]. Die Fluoreszenz ist ein Spezialfall der Lumineszenz. Lumineszenzen werden häufig nach den ursächlichen Anregungsprozessen benannt. Ein Beispiel dafür ist die Photolumineszenz. Dabei wird die Anregungsenergie des lumineszierenden Stoffes durch Photon-Absorption zur Verfügung gestellt. Die üblichere Bezeichnung von Photolumineszenz ist Fluoreszenz [Kni12]. Fluoreszierende Stoffe werden Fluorophore genannt.

Fluoreszenz ist also definitionsgemäß photonen-induzierte Emission von Licht. Photonen wechselwirken mit Fluorophoren gemäß der Auswahlregeln elektrischer Dipole und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit

$$c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.43)$$

fort. Die Wechselwirkungsdauer ist daher relativ kurz, sodass magnetische Wechselwirkungen in erster Näherung ausgeschlossen werden können [Kni14].

Im durchgeführten Experiment wird die Anregungsenergie nicht durch Photonen, sondern durch Elektronen zur Verfügung gestellt. Diese Elektronen weisen kinetische Energien der Größenordnung

$$E_{kin} = 3500 \text{ eV} \quad (3.44)$$

auf, was einer Geschwindigkeit von

$$v = \sqrt{2 \frac{E_{kin}}{m_e}} \approx 0.1170 \cdot c \quad (3.45)$$

mit  $m_e = 510998.928 \text{ eVc}^{-2}$ , entspricht also etwa 11.70 % der Lichtgeschwindigkeit. Das ist ein relativ hoher Prozentsatz, sodass angenommen werden kann, dass die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Fluorophoren denselben Auswahlregeln folgt wie bei der Fluoreszenz [Kni14]. Daher wird hier von elektronen-induzierter Fluoreszenz gesprochen [Kni12].

Vibratorische Übergänge desselben elektronischen Zustandes können nicht beobachtet werden, da sie im Infraroten-Spektralbereich liegen [Kni14]. Da die Energiedifferenzen der Rotations-Übergänge kleiner sind als die der vibratorischen Übergänge, können diese somit auch nicht beobachtet werden.

### 3.3. Elektrische Dipol-Auswahlregeln

Übergänge, welche die elektrischen Dipol-Auswahlregeln erfüllen sind elektrisch dipol-erlaubt. Betrachtet man ein Elektron und das elektrische Dipolmoment (semiklassisches Modell), dann lautet die Auswahlregel [Her45]

$$\Delta l = \pm 1 . \quad (3.46)$$

Bei der Betrachtung von Atomen mit mehreren Elektronen ergeben sich die Auswahlregeln [Her45]

$$\Delta J = 0, \pm 1, \text{ mit der Ausnahme } J = 0 \nrightarrow J = 0, \text{ sowie} \quad (3.47)$$

$$\Delta m_J = 0, \pm 1, \text{ mit der Ausnahme } m_J = 0 \nrightarrow m_J = 0 \text{ bei } \Delta J = 0 . \quad (3.48)$$

Im Falle der LS-Kopplung ergeben sich noch zusätzlich die Auswahlregeln [Her45]

$$\Delta L = 0, \pm 1 \text{ und} \quad (3.49)$$

$$\Delta S = 0 . \quad (3.50)$$

Aus Regel (3.50) folgt, dass nur Übergänge zwischen Zuständen gleicher Multiplizität erlaubt sind. Für das Elektron, das den Übergang erfährt muss, auch im Falle mehrerer Elektronen, die Regel (3.46) erfüllt sein [Her45].

Bei der Betrachtung von Molekülen gibt es die Auswahlregeln [Her39]

$$\Delta J = 0, \pm 1, \text{ mit der Ausnahme } J = 0 \nrightarrow J = 0 \quad (3.51)$$

$$+ \leftrightarrow +, \text{ sowie } - \leftrightarrow - \text{ und} \quad (3.52)$$

$$g \leftrightarrow u . \quad (3.53)$$

Damit ist gemeint, dass Übergänge zwischen Niveaus gleicher Symmetrie bzw. unterschiedlicher Parität dipol-erlaubt sind. Im Falle der LS-Kopplung gelten noch zusätzlich [Her39]

$$\Delta \Lambda = 0, \pm 1 \text{ und} \quad (3.54)$$

$$\Delta S = 0 . \quad (3.55)$$

Auch hier sind nur Übergänge unter denen die Multiplizität gleich bleibt dipol-erlaubt.

Wird nicht das elektrische Dipolmoment betrachtet, sondern ein anderes Moment (z.B. elektrisches Quadrupolmoment), so sind die Auswahlregeln andere. Es können also weitere Übergänge auftreten, die elektrisch dipol-verboten sind. Die elektrische Quadrupol-Übergangswahrscheinlichkeit, z.B., ist um das  $10^8$ -fache kleiner als jene des Dipols. Daher treten elektrisch dipol-erlaubte Übergänge mit höherer Intensität auf als quadrupol-erlaubte Übergänge [Her39].

### 3.4. Methan und elektron-induzierte Prozesse

Methan ist ein Kohlenwasserstoff und besteht aus einem zentralen C-Atom und vier H-Atomen mit folgender Strukturformel: CH<sub>4</sub>. Die Bindung der Atome kann mit Hilfe der Molekül-Orbital-Theorie erklärt werden.

Das C-Atom weist im Grundzustand die Konfiguration

$$2s^2p^2 \quad (3.56)$$

auf. Nach der Molekülorbital-Theorie kombinieren die vier *s*-Orbitale der H-Atome mit dem *s*-Orbital, sowie den *p<sub>i</sub>*-Orbitalen (i=x,y,z) des Kohlenstoffs zu vier Orbitalen der Konfiguration

$$sp^3. \quad (3.57)$$

So entstehen vier gleichartige Bindungen. Dieser Vorgang wird Hybridisierung der Orbitale genannt. Mit dieser Theorie kann auch die Struktur des Moleküls angegeben werden. Es ist ein tetraedrisches Molekül (Abb. 3.1) mit Bindungswinkeln von 109.5° und einer Bindungslänge von 110 pm [Pet11]. Bei Zimmertemperatur ist es gasförmig. Es ist farb- und geruchlos sowie brennbar.

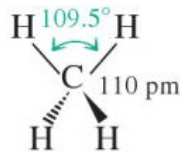


Abbildung 3.1.: Tetraedrische Struktur Methans [Pet11].

Überträgt man die Prozesse aus dem Abschnitt 3.1.4 auf Methan, ist es plausibel bei der Kollision mit Elektronen statt nur CH<sub>4</sub>, auch Fragmente von Methan oder Methan-Ionen vorzufinden.

Im Anschluss wird die Lyman-Serie des Wasserstoffs kurz erläutert, da sie im Hinblick auf die Beobachtungen des Experiments von besonderer Bedeutung ist.

### 3.5. Lyman-Serie des Wasserstoffspektrums

Nachdem die BALMER-Serie ( $n_1 = 2 \leftarrow n_2$ ) durch die Rydbergformel [Her45]

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R_H \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (3.58)$$

erklärt wurde, konnten durch Einsetzen anderer  $n_1$  aus  $\mathbb{N}$  weitere Übergänge vorausgesagt werden. Als erster beobachtete LYMAN so vorhergesagte Übergänge im H-Atom [Her45]. Die Wellenlängen der von ihm beobachteten Übergänge liegen im EUV, sowie im VUV und sind in Abb. 3.2 abzulesen. Sie entsprechen den Übergängen

$$1 \leftarrow n_2, \text{ mit } n_2 > 1 \quad (3.59)$$

für die Hauptquantenzahl  $n_2$ . Der Term des Grundzustandes des H-Atoms lautet

$$^2S_{1/2}. \quad (3.60)$$

Die Wellenlängen der Übergänge können durch die Formel [Her45]

$$\lambda = \frac{c}{R_H \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (3.61)$$

mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und der Rydberg-Konstante  $R_H$  berechnet werden. Die Intensität konvergiert zu kleinen Wellenlängen [Her45]. Je höher die Energiedifferenz des Übergangs, umso geringer ist die Intensität.

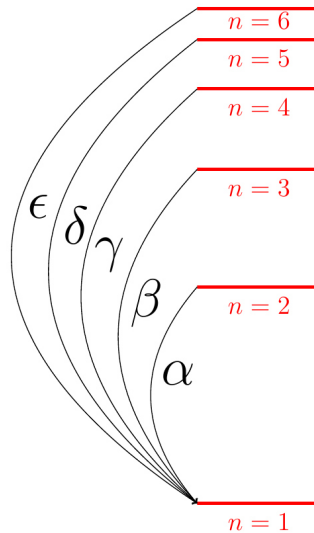


Abbildung 3.2.: Übergänge der Lymanserie mit  $\lambda_\alpha = 121,566 \text{ nm}$ ,  $\lambda_\beta = 102,583 \text{ nm}$ ,  $\lambda_\gamma = 97,254 \text{ nm}$ ,  $\lambda_\delta = 93,782 \text{ nm}$  [Her45].

## 4. Aufnahme der Fluoreszenzspektren

### Inbetriebnahme der Fernfokuselektronenquelle

Es erfolgt das Einschalten des Heizstromes, der Wehneltspannung, der Spannungsregelung sowie des Spulenstromes. Erst im Anschluss wird die Hochspannung von 3,5 kV zwischen Draht und Anode eingestellt. Dann wird der Strom im Faradaybecher gemessen.

Die Gasflasche wird an einen Druckminderer angeschlossen. Der daran anschließende Metallschlauch ist nach dem Abpumpen mit Restluft gefüllt und wird deshalb mit Methan gespült. Dazu wird der Druckminderer bei geschlossenem Magnetventil geöffnet, sodass der Schlauch mit Methan gefüllt ist. Der Druckminderer wird wieder geschlossen. Nun wird das Magnetventil über den Controller geöffnet bis der Druck in der Zelle wieder auf dem Anfangswert ist. Das Magnetventil wird geschlossen und anschließend der Druckminderer geöffnet. Jetzt wird das Magnetventil so eingestellt, dass sich ein konstanter Druck in der Zelle einstellt.

Die Gitterstellung wird am Monochromator in 200 Å Schritten von unterschiedlichen Startwerten aus (s.u.) erhöht bis auf 6000 Å. Diese Angaben gelten für den Einsatz eines Gitters mit der Anzahl  $g = 600 \frac{1}{\text{mm}}$ . Pro Stellung wird mit der Software  $\mu\epsilon\tau\rho$  [Sch14] eine Aufnahme der Dauer  $t$  getätigt. Es wird die der Anzahl der eingefallenen Photonen gemäß Abschnitt 2.2 gemessen. Diese Daten werden im folgenden als Rohdaten bezeichnet.

### 4.1. Messungen im Spektralbereich 30 bis 130 nm

Es werden zwei Spektren aufgenommen, ein Referenzspektrum und das Methanspektrum. Das Referenzspektrum wird zur Kalibrierung des Methanspektrums verwendet. Bei der Messung des Hintergrundes stellt sich heraus, dass die Intensitäten der Übergänge von Luft und Methan ähnliche Größenordnungen aufweisen. Daher wird Luft als Referenzmedium verwendet.

#### Messung des Referenzspektrums

Es herrschte im Monochromator ein Druck von  $p_{\text{mono}} = 2,9 \cdot 10^{-6}$  mbar und im Wechselwirkungsvolumen ein Druck von  $p_{\text{zelle}} = 5,284$  mTorr. Der Heizstrom betrug  $I_{\text{heiz}} = 2,1$  A, die Wehneltspannung  $U_{\text{wehnelt}} = 215$  V und der Spulenstrom  $I_{\text{spule}} = 1,322$  A. Die Messungen wurden bei einer Gitterstellung von 0000 Å gestartet. Die Dauer der Aufnahmen pro Gitterstellung von 0000 Å bis 2400 Å betrug  $t = 60$  s und die von 2500 Å bis 6000 Å  $t = 600$  s.



##### Messung des Methanspektrums

Es herrschte im Monochromator ein Druck von  $p_{mono} = 4,3 \cdot 10^{-6}$  mbar und im Wechselwirkungsvolumen ein Druck von  $p_{zelle} = 5,154$  mTorr. Der Heizstrom betrug  $I_{heiz} = 2,2$  A, die Wehneltspannung  $U_{wehnelt} = 210$  V und der Spulenstrom  $I_{spule} = 1,3327$  A. Die Messungen wurden bei einer Gitterstellung von  $1400 \text{ \AA}$  gestartet. Die Dauer der Aufnahmen pro Gitterstellung von  $1400 \text{ \AA}$  bis  $2400 \text{ \AA}$  betrug  $t = 60$  s und die von  $2600 \text{ \AA}$  bis  $6000 \text{ \AA}$   $t = 600$  s. Die Aufnahme erfolgte hier erst ab  $1400 \text{ \AA}$ , da nach der Messung des Referenzspektrums deutlich geworden ist, dass erst ab  $1400 \text{ \AA}$  ein Signal beobachtet werden kann.

## 4.2. Messungen im Spektralbereich 110 bis 310 nm

Auch hier ist eine Kalibrierung erforderlich.

##### Messung des Referenzspektrums

Es herrschte im Monochromator ein Druck von  $p_{mono} = 1,3 \cdot 10^{-6}$  mbar und im Wechselwirkungsvolumen ein Druck von  $p_{zelle} = 1,039$  mTorr. Der Heizstrom betrug  $I_{heiz} = 2$  A, die Wehneltspannung  $U_{wehnelt} = 247$  V und der Spulenstrom  $I_{spule} = 1,3836$  A. Daraus ergibt sich ein Strom  $I_{faraday} = 71,2 \text{ \mu A}$  im Faradaybecher. Die Messungen wurden bei einer Gitterstellung von  $0000 \text{ \AA}$  gestartet. Die Dauer der Aufnahmen pro Gitterstellung betrug  $t = 300$  s.

##### Messung des Methanspektrums

Es herrschte im Monochromator ein Druck von  $p_{mono} = 5,7 \cdot 10^{-6}$  mbar und im Wechselwirkungsvolumen ein Druck von  $p_{zelle} = 5,153$  mTorr. Der Heizstrom betrug  $I_{heiz} = 2,1$  A, die Wehneltspannung  $U_{wehnelt} = 252$  V und der Spulenstrom  $I_{spule} = 1,3288$  A. Daraus ergibt sich ein Strom  $I_{faraday} = 119,35 \text{ \mu A}$  im Faradaybecher. Die Messungen wurden bei einer Gitterstellung von  $0000 \text{ \AA}$  gestartet. Die Dauer der Aufnahmen pro Gitterstellung betrug  $t = 600$  s.

## 5. Auswertung und Diskussion der Messungen von 30 - 130 nm

Mit Hilfe eines Matlabprogramms [Ozg14] werden Methan-, sowie Referenzspektrum erstellt. Für diesen Prozess werden die Rohdaten verwendet. Dabei wird ein Bereich im Zentrum der Detektoroberfläche ausgewählt mit

$$x_1 = 170 \text{ Kanäle} \qquad x_2 = 350 \text{ Kanäle} \qquad (5.1)$$

$$y_1 = 210 \text{ Kanäle} \qquad y_2 = 290 \text{ Kanäle} . \qquad (5.2)$$

Das Programm verwendet für die folgenden Prozesse nur die Daten dieses Bereiches. Dann wird ein Abstand

$$d = 111 \text{ Kanäle} \qquad (5.3)$$

gewählt, indem die Aufnahmen der unterschiedlichen Gitterstellungen zusammengesetzt werden sollen. Anschließend wird über Mittelungsverfahren das Summenspektrum erstellt. Es ergibt sich ein Spektrum, indem auf der x-Achse Kanäle aufgetragen sind. Zur Kalibrierung wird also eine Umrechnung der Wellenlängen  $x$  in Kanälen in die Wellenlänge  $\lambda$  in nm benötigt.

### 5.1. Kalibrierung der Referenzspektrums

Die Kalibrierungsgerade wird mit Hilfe der Linien 1 bis 6 (Bezeichnung aus [Bur11]) des Stickstoffspektrums aus [Bur11] erstellt. Für das Referenzspektrum erfolgt eine lineare Umrechnung der Wellenlängenskala nach der Gleichung

$$\lambda(x) = \lambda_0 + mx \qquad (5.4)$$

$$\text{mit } \lambda_0 = (-3,6 \pm 0,3) \text{ nm}, \qquad (5.5)$$

$$\text{und } m = (0,04539 \pm 0,00014) \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} . \qquad (5.6)$$

Die Kalibrierungspunkte sind in Tab. 5.1 zu finden. Die Gerade ist in Abb. 5.1 und das so erstellte Referenzspektrum in Abb. 5.2 dargestellt. Die Wellenlängenskala beginnt bei 50 nm, da unter 50 nm nur Rauschen zu beobachten ist.

Da das Methanspektrum ab einer Gitterstellung von 1400 Å und das Referenzspektrum ab einer Stellung von 0000 Å aufgenommen wurde, unterscheiden sich die Kanäle derselben Übergänge stark. Daher

## 5. Auswertung und Diskussion der Messungen von 30 - 130 nm

wird das Methanspektrum im folgenden Abschnitt kalibriert.

Tabelle 5.1.: Kalibrierungs-Punkte des Referenzspektrums.

$x$ [Kanal]	$\lambda$ [nm]
1556,91	67,1
1725,3	74,6
1788,21	77,6
1985,66	86,5
2098,09	91,7
2191,12	95,8

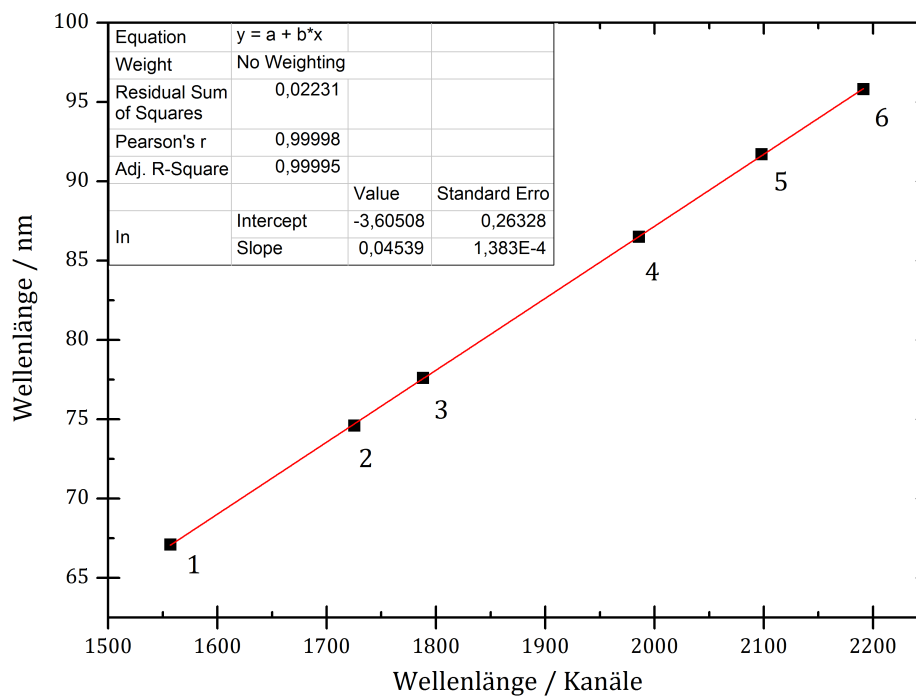


Abbildung 5.1.: Regressionsgerade des Referenzspektrums.

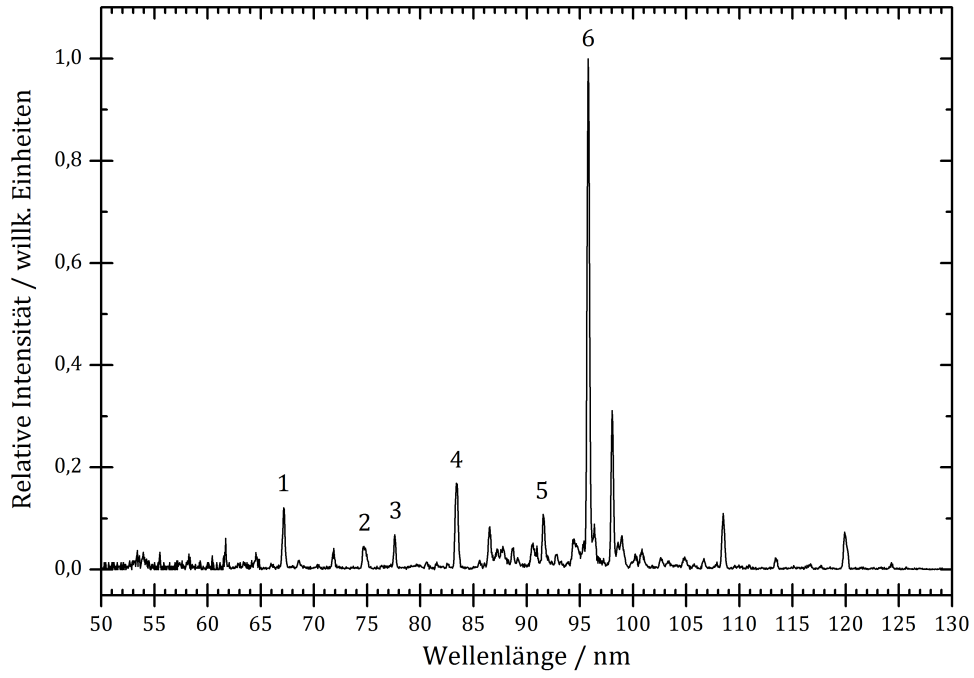


Abbildung 5.2.: Kalibriertes Referenzspektrum.

## 5.2. Kalibrierung des Methanspektrums

Da sich neben Methan auch Luft in der Zelle befindet, können die gleichen Übergänge genutzt werden wie beim Referenzspektrum. Es werden also die gleichen Wellenlängen (Abb. 5.3 (b)) des Stickstoffspektrums [Bur11], wie beim Referenzspektrumspektrum genutzt (Tab. 5.2). Die zugehörige Regressionsgerade (Abb. 5.3) hat die Form

$$\lambda(x) = \lambda_0 + mx \quad (5.7)$$

$$\text{mit } \lambda_0 = (31,27 \pm 0,05) \text{ nm}, \quad (5.8)$$

$$\text{und } m = (0,07513 \pm 0,00008) \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}}. \quad (5.9)$$

Das kalibrierte Spektrum ist in Abb. 5.4 (a) gezeigt. In Abb. 5.4 (b) ist die Anzahl an Übergängen in den jeweiligen Bereichen relativer Intensität abzulesen. Der Bereich niedrigster relativer Intensität reicht von 0,05 bis 0,1, da unterhalb von 0,05 das Rauschen von echten Übergängen nicht unterschieden werden kann. Es werden alle Übergänge ausgewertet, deren relative Intensität größer als 0,05 ist.

## 5. Auswertung und Diskussion der Messungen von 30 - 130 nm

Tabelle 5.2.: Kalibrierungs-Punkte des Methanspektrums.

$x$ [Kanal]	$\lambda$ [nm]
477,06	67,1
576,88	74,6
616,58	77,6
735,00	86,5
803,98	91,7
859,42	95,8

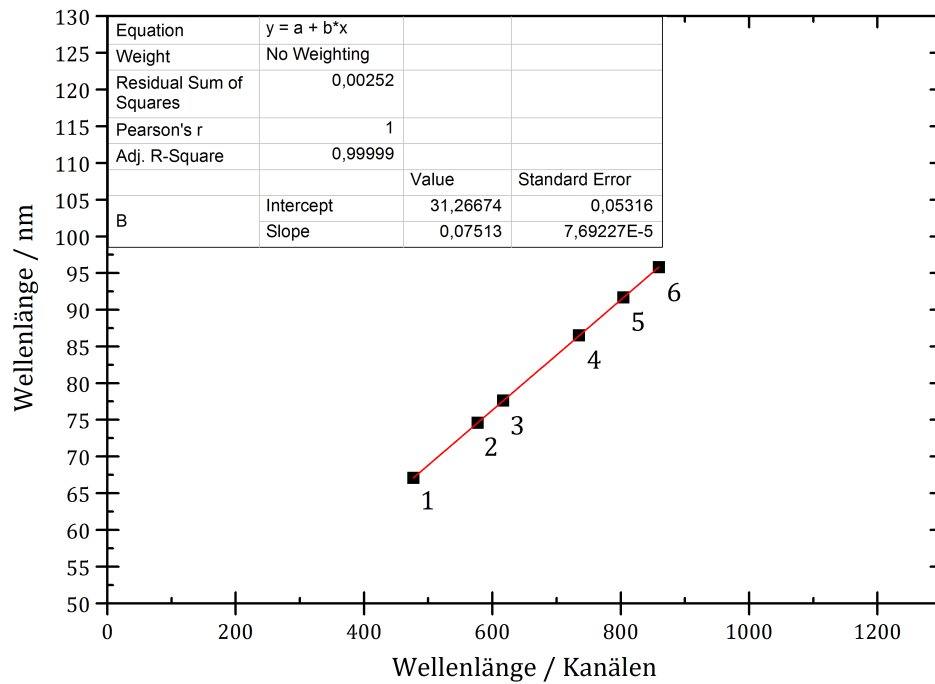


Abbildung 5.3.: Regressionsgerade des Methanspektrums.

### 5.3. Identifizierung der Fluoreszenzübergänge

Die auszuwertenden Übergänge werden durch eine Gauß-Funktion der Form

$$I(x) = y_0 + A e^{-0,5((x-x_c)/w)^2} \quad (5.10)$$

approximiert. Die Parameter und deren Ungenauigkeiten sind Tab. 5.3 zu entnehmen.

Der Übergang größter Intensität befindet sich bei 95,84 nm. Die relativen Intensitäten werden folgendermaßen bestimmt:

$$I_{rel} = \frac{y_0 + A}{y_0(95,84 \text{ nm}) + A(95,84 \text{ nm})} \quad (5.11)$$

Die Zuordnung der Übergänge erfolgt mit Hilfe der Datenbank des AMERICAN NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). Die Ergebnisse sind in Tab. 5.4 katalogisiert.

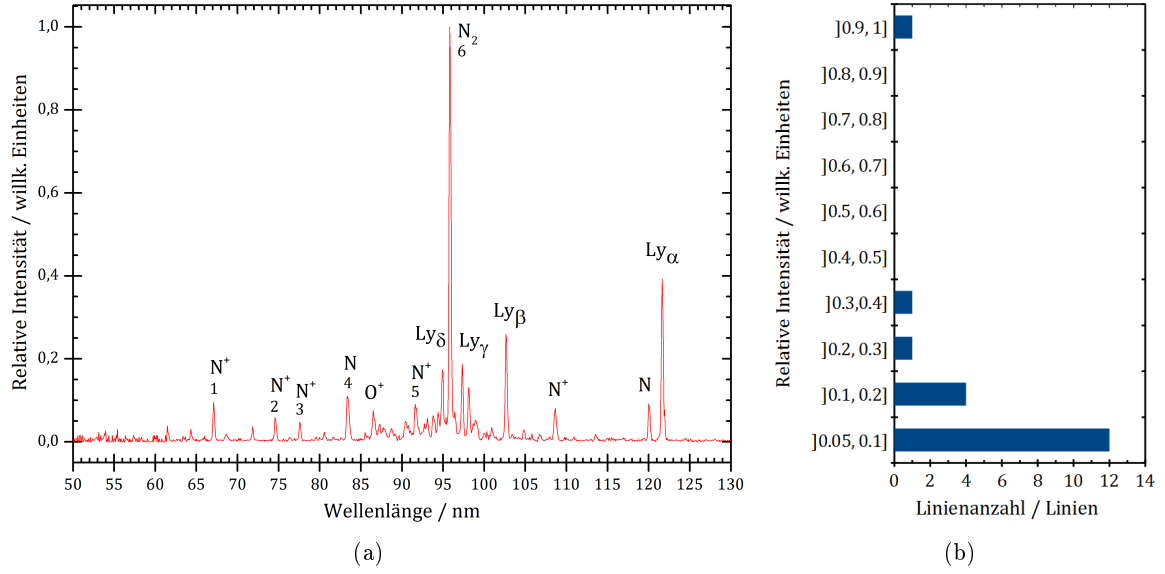


Abbildung 5.4.: (a) Kalibriertes Methanspektrum. (b) Anzahl der Linien in bestimmten Intensitätsbereichen.

Tabelle 5.3.: Gaußparameter und Ungenauigkeiten der ausgewerteten Linien.

$\lambda = x_c$ [nm]	$\delta x_c$ [nm]	$y_0$	$\delta y_0$	$A$	$\delta A$	$w$ [nm]	$\delta w$ [nm]
67,11	0,002	0,004	0,0005	0,0882	0,0016	0,099	0,002
74,61	0,005	0,0034	0,0005	0,055	0,002	0,114	0,005
77,59	0,005	0,0046	0,0004	0,046	0,002	0,098	0,005
83,42	0,006	0,005	0,002	0,107	0,004	0,149	0,008
86,56	0,019	0,052	0,01	0,0145	0,01	0,15	0,04
91,67	0,014	0,019	0,003	0,071	0,006	0,147	0,018
94,92	0,006	0,038	0,007	0,145	0,009	0,096	0,009
95,84	0,004	0,04	0,02	0,98	0,03	0,112	0,005
97,33	0,002	0,04	0,02	0,175	0,003	0,111	0,002
98,12	0,005	0,017	0,003	0,117	0,005	0,11	0,006
102,67	0,0017	0,0095	0,0008	0,261	0,004	0,117	0,0018
108,63	0,005	0,0061	0,0006	0,074	0,002	0,142	0,005
120,06	0,003	0,0042	0,0005	0,09	0,002	0,111	0,004
121,66	0,002	0,0048	0,001	0,382	0,006	0,101	0,002

Tabelle 5.4.: Identifizierte Übergänge. Die Berechnung von  $\delta I_{rel}$  und  $\delta\lambda$  erfolgt in den beiden folgenden Abschnitten. Unter Referenz wird angegeben, ob sich der Übergang auch im Referenzspektrum beobachten lässt.

$\lambda$ [nm]	$\delta\lambda$ [nm]	$\lambda_{lit}$ [nm]	$I_{rel}$	$\delta I_{rel}$	Referenz	Spezies	Unterer Zustand	Oberer Zustand	Quelle
67,11	0,09	67,1	0,090	0,002	x=ja	N <sup>+</sup>	$g \quad {}^3P$	${}^3P^o$	[Bur11]
74,61	0,10	74,6	0,057	0,003		N <sup>+</sup>	${}^1S, {}^1D$	${}^1P^o$	[Bur11]
77,59	0,10	77,6	0,050	0,002		N <sup>+</sup>	${}^1D$	${}^1D^o$	[Bur11]
83,42	0,11	83,44655	0,110	0,006		O <sup>+</sup>	$2s^2 2p^3 \quad {}^4S^o$	$2s^2 p^4 \quad {}^4P$	[Dat84]
86,56	0,11	86,54	0,07	0,02		N	$g \quad {}^4S^o$	${}^4D, {}^4P$	[Bur11]
91,67	0,12	91,7	0,088	0,009		N <sup>+</sup>	$g \quad {}^3P$	${}^3P^o$	[Bur11]
94,92	0,12	94,9742	0,179	0,016		H	$1s \quad {}^2S$	${}^2P^o$	[Dat84]
95,84	0,12	95,8	1,00	0,05		N <sub>2</sub>	$c'_4(0,0)$	$5p$	[Bur11]
97,33	0,12	97,2541	0,21	0,02		H	$1s \quad {}^2S$	$4p$	[Dat84]
98,12	0,12		0,131	0,008					
102,67	0,13	102,5728	0,265	0,005		H	$1s \quad {}^2S$	$3p$	[Dat84]
108,63	0,14	108,5701	0,079	0,003		N <sup>+</sup>	$2s^2 2p^2 \quad {}^3P$	$2s^2 p^3 \quad {}^3D^o$	[Dat84]
120,06	0,15	120,0701	0,092	0,003		N	$2s^2 2p^3 \quad {}^4S^o$	$2s^2 2p^2 ({}^3P) 3s \quad {}^4P$	[Dat84]
121,66	0,15	121,5669	0,379	0,007		H	$1s \quad {}^2S$	$2p$	[Dat84]

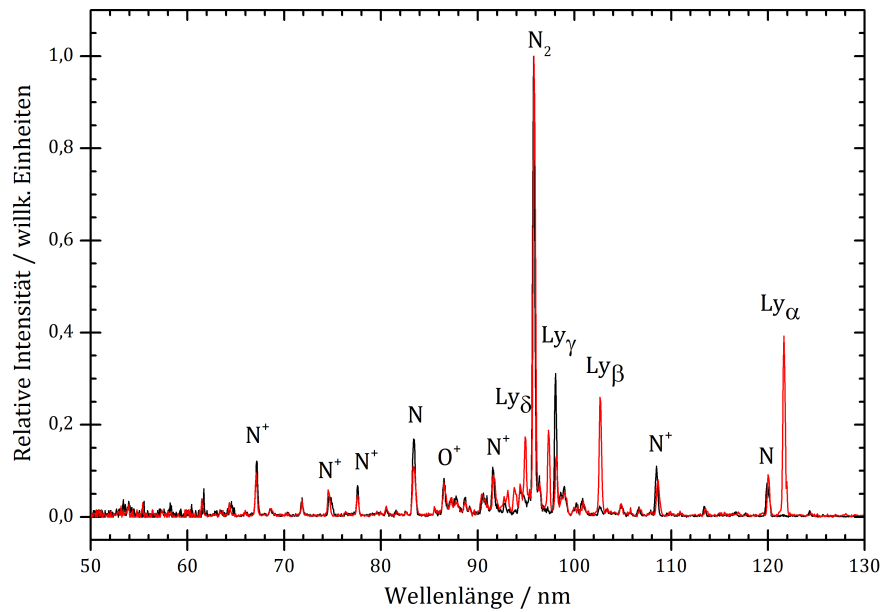


Abbildung 5.5.: Vergleich von Methan- (rot) und Referenzspektrum (schwarz).

Im Spektralbereich von 90-130 nm kann die LYMAN-Serie beobachtet werden. Der Vergleich von Methan- und Referenzspektrum (Abb. 5.5) zeigt, dass die Fragmente  $N^+$ ,  $N$ ,  $O^+$  und  $N_2$  eindeutig aus dem Hintergrund stammen. Die LYMAN-Linien stammen eindeutig aus dem Methanfragment H. Es wird also kein weiteres Methanfragment erzeugt, dass in diesem Spektralbereich fluoresziert. In Abb. 5.6 sind die Intensitäten der beobachteten LYMAN-Übergänge aufgetragen. Deren erwartete Intensitätsabnahme ist dabei deutlich zu erkennen.

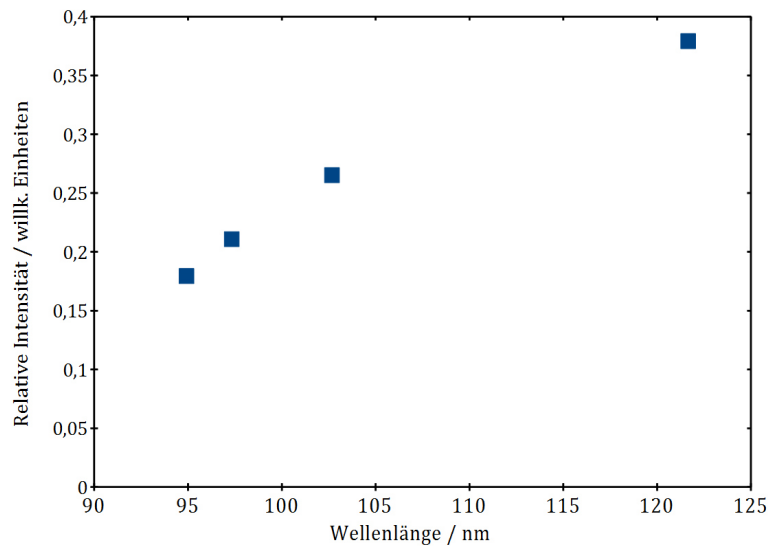


Abbildung 5.6.: Intensitäten der ersten vier Übergänge der LYMAN-Serie in Abhängigkeit der Wellenlänge.

Abb. 5.7 zeigt die aufsummierten Intensitäten der aus Methan und dem Referenzgas stammenden Linien in Abhängigkeit der Spektralbereiche. Es sind keine Methanfragmente unterhalb von 90 nm be-



## 5. Auswertung und Diskussion der Messungen von 30 - 130 nm

obachtbar. Im Bereich von 90-100 nm überwiegt die aufsummierte Intensität der Referenzübergänge. Trotzdem sind die relativen Intensitäten aller Übergänge in diesem Bereich von ähnlicher Größenordnung, sodass bei technisch höherem Aufwand, z.B. bei Verringerung des Hintergrunddruckes, das Verhältnis der aufsummierten relativen Intensitäten zu Gunsten der LYMAN-Übergänge verschoben werden kann. Dann kann z.B. für Kalibrierungszwecke Methan als Referenzmedium genutzt werden. Bei der Untersuchung von Halomethan, könnten die beobachteten LYMAN-Übergänge auch auftreten. Da würde es sich anbieten, diese Übergänge zur Kalibrierung zu benutzen. Allerdings kann es auch sein, dass deren Intensitäten sehr niedrig sind, da in einem Molekül nur ein H-Atom enthalten ist. Dann bieten sich aber die im nächsten Kapitel identifizierten Übergänge im Spektralbereich von 110-310 nm an.

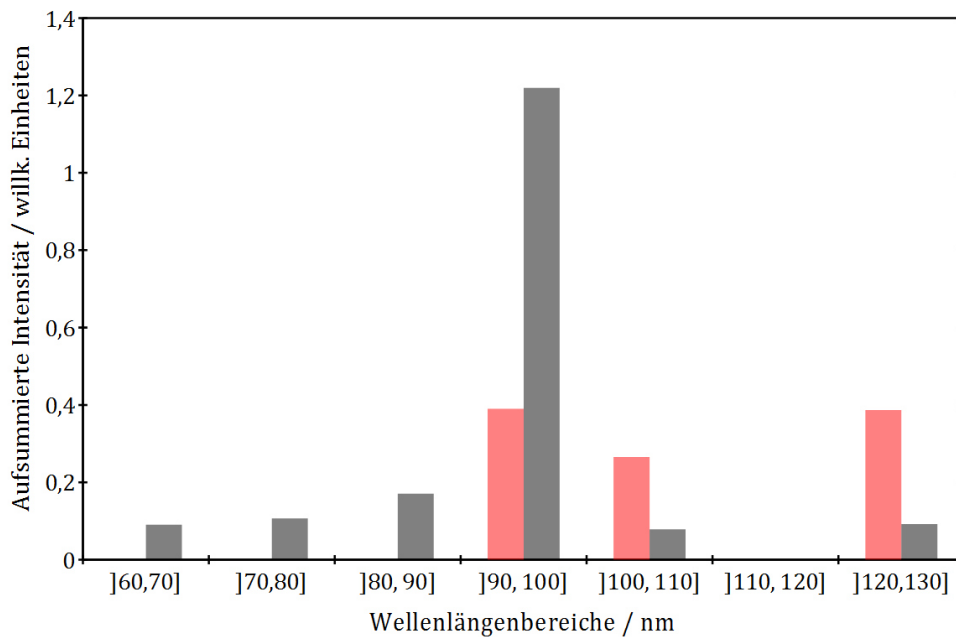


Abbildung 5.7.: Aufsummierte Intensitäten der Emissionen von Restgas (schwarz) und Methanfragmenten (rot) für unterschiedliche Spektralbereiche.

### 5.4. Unsicherheiten der Wellenlängenkalibrierung des Methanspektrums

Aus der Gleichung

$$\lambda(x) = \lambda_0 + m \cdot x \quad (5.12)$$

für die Wellenlängenkalibrierung folgt die Unsicherheit

$$\delta\lambda = \delta\lambda_0 + x\delta m + m\delta x \quad (5.13)$$

$$= 0,05 \text{ nm} + x \cdot 0,00008 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} + 0,07513 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \cdot 0,5 \text{ Kanal} \quad (5.14)$$

mit

$$\delta\lambda_0 = 0,05 \text{ nm} \quad (5.15)$$

$$\delta m = 0,00008 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \quad (5.16)$$

$$\delta x = 0,5 \text{ Kanal} . \quad (5.17)$$

Die Unsicherheiten  $\delta\lambda$  sind in Tab. 5.5 abzulesen. Es zeigt sich (vgl. Tab. 5.3), dass  $\delta\lambda \gg \delta x_c$ . Daher wird  $\delta x_c$  vernachlässigt.

Tabelle 5.5.: Unsicherheiten  $\delta\lambda$ .

$x$ [Kanal]	$\lambda$ [nm]	$\delta\lambda$ [nm]
477,05	67,11	0,09
576,88	74,61	0,10
616,58	77,59	0,10
694,16	83,42	0,11
735,92	86,56	0,11
803,99	91,67	0,12
847,17	94,92	0,12
859,42	95,84	0,12
879,28	97,33	0,12
889,83	98,12	0,12
950,37	102,67	0,13
1029,70	108,63	0,14
1181,78	120,06	0,15
1203,07	121,66	0,15

## 5.5. Unsicherheiten $\delta I_{rel}$ der relativen Intensitäten

Die relative Intensitäten wurden mit der Formel

$$I_{rel} = \frac{y_0 + A}{y_0(95,84 \text{ nm}) + A(95,84 \text{ nm})} \quad (5.18)$$

berechnet. Die Ungenauigkeit  $\delta(y_0(95,84 \text{ nm}) + A(95,84 \text{ nm}))$  kann vernachlässigt werden, da der resultierende absolute Beitrag an  $\delta I_{rel}$  maximal 0,0010 beträgt. Unter Vernachlässigung von  $\delta(y_0(95,84 \text{ nm}) + A(95,84 \text{ nm}))$  lassen sich die Ungenauigkeiten  $\delta I_{rel}$  folgendermaßen berechnen:

$$\delta I_{rel} = \frac{\delta y_0 + \delta A}{y_0(95,84 \text{ nm}) + A(95,84 \text{ nm})} = \frac{\delta y_0 + \delta A}{0,04 + 0,98} . \quad (5.19)$$

Die Ergebnisse sind in Tab. 5.4 abzulesen.

## 6. Auswertung und Diskussion der Messungen von 110 - 310 nm

Auch hier werden mit Hilfe eines Matlabprogramms [Ozg14] Methan-, sowie Referenzspektrum erstellt. Für diesen Prozess werden wieder Rohdaten verwendet. Diese werden auf eine Fläche von  $512 \times 512$  Kanälen projiziert. Dabei wird ein Bereich im Zentrum der Detektoroberfläche ausgewählt mit

$$x_1 = 180 \text{ Kanäle} \qquad x_2 = 380 \text{ Kanäle} \qquad (6.1)$$

$$y_1 = 210 \text{ Kanäle} \qquad y_2 = 300 \text{ Kanäle} . \qquad (6.2)$$

Das Programm verwendet für die folgenden Prozesse nur die Daten dieses Bereiches. Dann wird ein Abstand von

$$d = 124 \text{ Kanäle} \qquad (6.3)$$

gewählt, indem die Aufnahmen der unterschiedlichen Gitterstellungen zusammen gesetzt werden. Anschließend wird über Mittelungsverfahren das Summenspektrum erstellt. Es ergibt sich ein Spektrum, indem auf der x-Achse Kanäle aufgetragen sind. Zur Kalibrierung wird also eine Umrechnung der Wellenlängen  $x$  in Kanälen in die Wellenlänge  $\lambda$  in nm benötigt. Da die Messungen des Referenz und des Methanspektrums beide bei einer Gitterstellung von 0000 Å starten, wird nur die Kalibrierung des Methanspektrums durchgeführt. Diese kann auch für das Referenzspektrum genutzt werden.

### 6.1. Kalibrierung des Methanspektrums

Als Kalibrierungs-Punkte werden die 0. Ordnung, die LYMAN- $\alpha$ -Linie, die auch im Spektralbereich von 30 bis 130 nm beobachtet wurde, und zwei CO<sub>2</sub>-Übergänge aus [Bur11] genutzt (Tab. 6.1). Die CO<sub>2</sub>-Übergänge stammen aus dem Restgas [Bur11]. Für die Methanmessung ergeben sich

$$\lambda(x) = \lambda_0 + mx \qquad (6.4)$$

$$\text{mit } \lambda_0 = (-8,30 \pm 0,06) \text{ nm}, \qquad (6.5)$$

$$\text{und } m = (0,08060 \pm 0,00005) \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} . \qquad (6.6)$$

Die Regressionsgerade ist in Abb. 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1.: Kalibrierungs-Punkte des Methanspektrums.

$x$ [Kanal]	$\lambda$ [nm]
103,445	0
1610,95	121,6
3679,60	288,2
3695,81	289,6

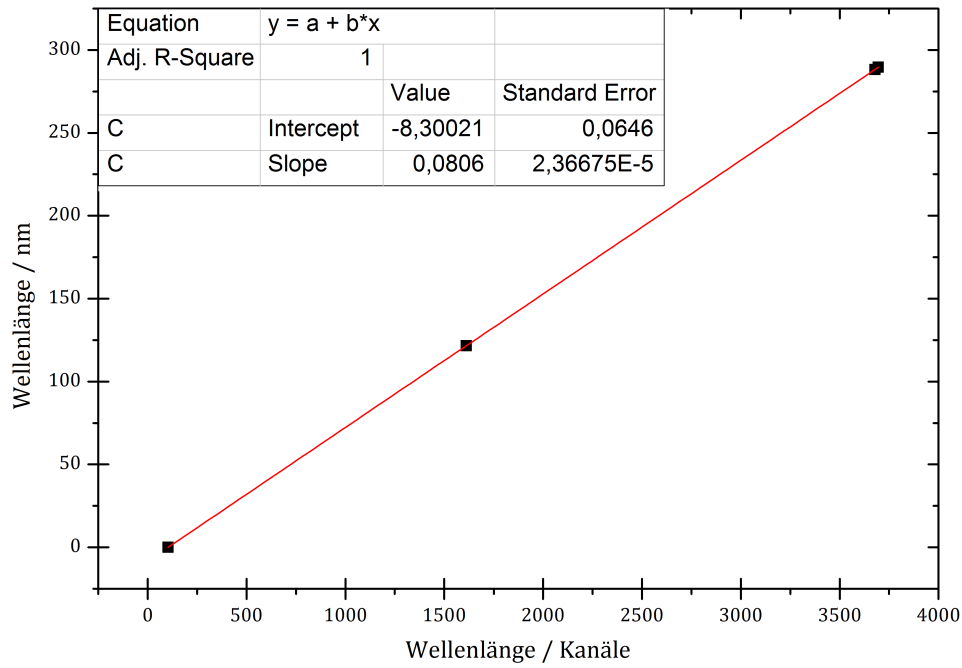


Abbildung 6.1.: Regressiongerade des Methanspektrums.

Die Übergänge werden angenähert gemäß

$$I(x) = y_0 + Ae^{-0,5((x-x_c)/w)^2}. \quad (6.7)$$

Die Ergebnisse sind aus der Tab. 6.2 zu entnehmen. Anschließend wird auf die relative Intensität des LYMAN- $\alpha$ -Übergangs bei 121,55 nm normiert. Die relative Intensität  $I_{rel}$  wird mit

$$I_{rel} = \frac{y_0 + A}{y_0(121,554 \text{ nm}) + A(121,554 \text{ nm})} \quad (6.8)$$

berechnet. Das kalibrierte Spektrum ist in Abb. 6.2 (a) dargestellt. Abb. 6.2 (b) zeigt ein Histogramm, welches die Anzahl an Übergängen in bestimmten Spektralbereichen angibt. Auch hier werden nur Übergänge  $I_{rel} > 0,05$  betrachtet, da das Rauschen des Detektors sich in dieser Größenordnung befindet.

## 6. Auswertung und Diskussion der Messungen von 110 - 310 nm

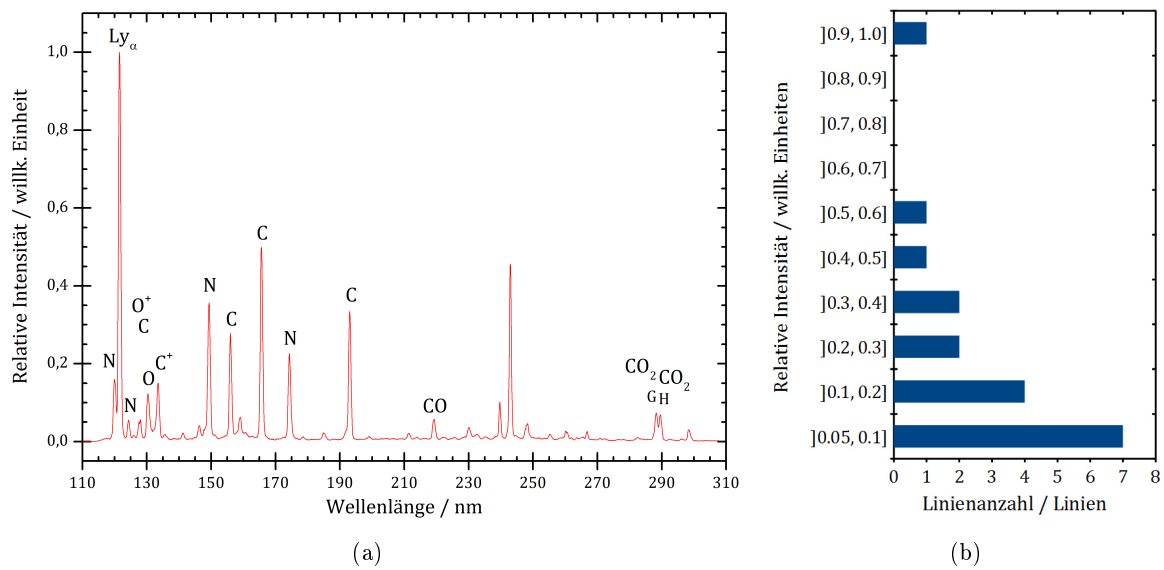


Abbildung 6.2.: (a) Kalibriertes Methanspektrum. G und H sind Bezeichnungen aus [Bur11]. (b) Anzahl an Übergängen in verschiedenen Spektralbereichen.

## 6.2. Kalibrierung des Referenzspektrums

Zur Kalibrierung des Referenzspektrums wird dieselbe Umrechnung verwendet, wie beim Methanspektrum. Dies ist möglich, da die Messung von dem Methan- und dem Referenzspektrum beide ab der Gitterstellung 0000 Å erfolgte. Das kalibrierte Spektrum ist in Abb.6.3 dargestellt.

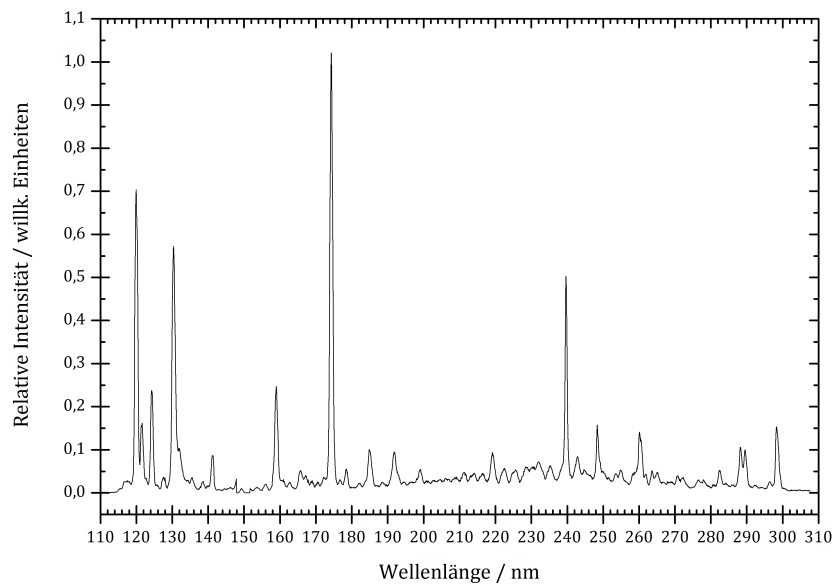


Abbildung 6.3.: Kalibriertes Referenzspektrum.

Tabelle 6.2.: Gaußparameter der ausgewerteten Übergänge.

$\lambda = x_c$ [nm]	$\delta x_c$	$y_0$	$\delta y_0$	$A$	$\delta A$	$w$ [nm]	$\delta w$
120,047	0,006	0,0042	0,0005	0,16	0,002	0,42	0,006
121,554	0,004	0,013	0,006	1,00	0,01	0,35	0,005
124,342	0,004	0,0084	0,0005	0,0475	0,0006	0,339	0,006
127,47	0,05	0,0109	0,0006	0,0191	0,0003	0,49	0,05
128,04	0,03	0,0109	0,0006	0,026	0,003	0,51	0,04
130,421	0,014	0,0147	0,001	0,113	0,004	0,84	0,03
133,470	0,011	0,0147	0,001	0,134	0,004	0,8	0,02
149,337	0,004	0,0185	0,001	0,342	0,003	0,368	0,004
156,008	0,003	0,0164	0,0008	0,026	0,002	0,345	0,004
158,975	0,007	0,0212	0,0003	0,0424	0,0008	0,368	0,008
165,636	0,002	0,0096	0,007	0,494	0,003	0,356	0,002
174,339	0,003	0,0089	0,0005	0,2155	0,0016	0,384	0,004
193,046	0,003	0,008	0,0005	0,326	0,002	0,349	0,003
219,187	0,006	0,00757	0,00017	0,0507	0,0007	0,407	0,007
239,678	0,005	0,0105	0,0005	0,0892	0,0014	0,273	0,005
242,9368	0,0018	0,0138	0,0007	0,445	0,002	0,2971	0,0019
288,277	0,007	0,0052	0,0003	0,0708	0,001	0,842	0,014
289,580	0,006	0,0052	0,0003	0,0594	0,001	0,746	0,013

### 6.3. Identifizierung der Fluoreszenzübergänge

Zum Vergleich von Referenz- und Methanspektrum wird die relative Intensität auf den N-Übergang bei 174,34 nm normiert. Der Vergleich (Abb. 6.4) zeigt auch hier eine starke Übereinstimmung zwischen dem Referenz- und dem Methanspektrum. Die Übergänge werden mit Hilfe von NIST identifiziert (Tab. 6.3). Beim N-Übergang von 149,34 nm ist eine hohe Diskrepanz zwischen den Spektren sichtbar. Die Messung in dieser Gitterstellung wurde früher gestoppt als im Programm angegeben. Die genaue Dauer der Messung ist daher nicht bekannt. Trotzdem ist ein Übergang zu beobachten, dessen Statistik aber nicht ausreicht, um die Existenz des Überganges zu beweisen. Der Übergang konnte keiner anderen Spezies zugeordnet werden. Das spricht dafür, dass die Linie von Stickstoff stammt.

Die beiden intensivsten Übergänge im Bereich von 240 nm sind die N- und die LYMAN- $\alpha$ -Übergänge 2. Ordnung. Da diese der 2. Ordnung angehören, ist an der halbierten relativen Intensität im Vergleich zu den Übergängen 1. Ordnung bei 120,05 bzw. 121,55 nm und der Verdoppelung des Abstandes zwischen den beiden Übergängen erkennbar. Die Übergänge der Spezies H-, C- und C<sup>+</sup> kommen im Referenzspektrum nicht oder mit erheblich anderen Intensitäten vor. Dies verdeutlicht, dass die H-, C- und C<sup>+</sup>-Fragmente aus Methan stammen und die restlichen aus dem Hintergrund. Der Übergang bei 158,98 nm zwischen den beiden C-Übergängen konnte nicht identifiziert werden. Sicher ist, dass er nicht von Methan stammt.

## 6. Auswertung und Diskussion der Messungen von 110 - 310 nm

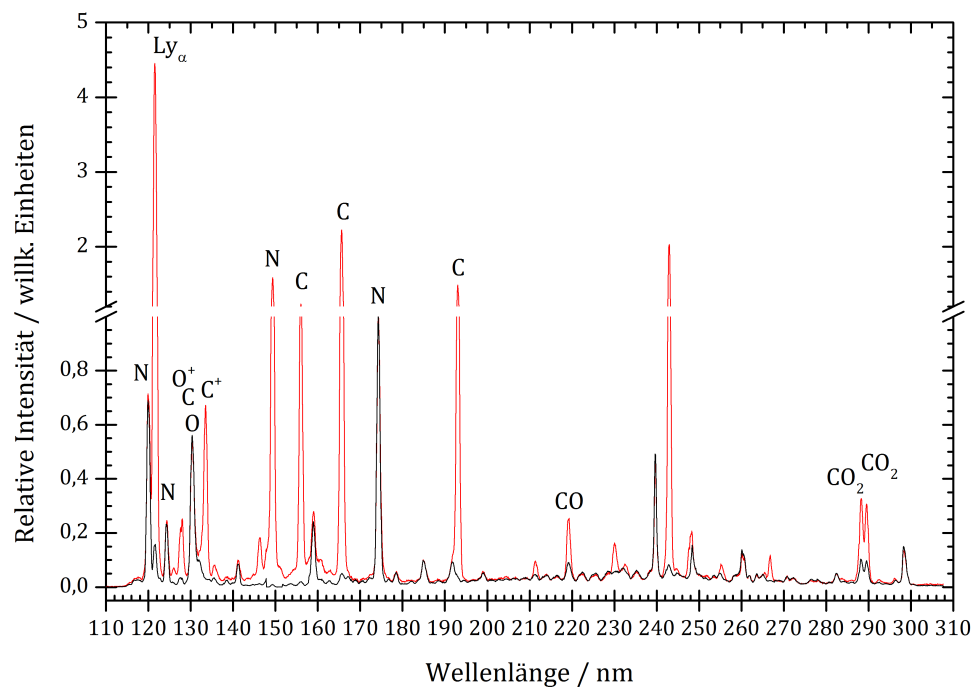


Abbildung 6.4.: Vergleich von Referenz- (schwarz) und Methanspektrum (rot).

Tabelle 6.3.: Linienkatalog für den Spektralbereich. Unter Referenz wird angegeben, ob die Übergänge im Referenzspektrum zu sehen sind.

$\lambda$ [nm]	$\delta\lambda$ [nm]	$\lambda_{lit}$ [nm]	$I_{rel}$	$\delta I_{rel}$	Referenz	Spezies	Unterer Zustand	Oberer Zustand	Quelle
120,05	0,13	120,0223	0,162	0,002	x=ja	N	$2s^2 2p^3 \quad 4S^o$	$2s^2 2p^2(^3P)3s \quad 4P$	[Dat84]
121,55	0,13	121,566	1,000	0,016		H	$1s \quad 2S$	$2p \quad 2P^o$	[Dat84]
124,34	0,13	124,3306	0,0552	0,0011		N	$2s^2 2p^3 \quad 2D^o$	$2s^2 2p^2(^1D)3s \quad 2D$	[Dat84]
127,47	0,13	127,5143	0,0296	0,0009		O <sup>+</sup>	$2s^2 2p^2(^3P)3s \quad 2P$	$2s^2 2p^2(^1D)4p \quad 2P^o$	[Dat84]
128,04	0,13	128,0333	0,036	0,004		C	$2s^2 2p^2 \quad 3P^o$	$2s^2 2p4s \quad 3P^o$	[Dat84]
130,42	0,13	130,4858	0,126	0,005		O	$2s^2 2p^4 \quad 3P$	$2s^2 2p^3(^4S^o)3s \quad 3S^o$	[Dat84]
133,47	0,14	133,4532	0,147	0,005		C <sup>+</sup>	$2s^2 2p \quad 2P^o$	$2s2p \quad 2D$	[Dat84]
149,34	0,14	149,282	0,356	0,004		N	$2s^2 2p^3 \quad 2D^o$	$2s^2 2p(^3P)3s \quad 2P$	[Dat84]
156,01	0,14	156,031	0,042	0,003		C	$2s^2 2p^2 \quad 3P$	$2s2p^3 \quad 3D^o$	[Dat84]
158,98	0,14		0,0628	0,0011					
165,64	0,14	165,7008	0,497	0,010		C	$2s^2 2p^2 \quad 3P$	$2s^2 2p3s \quad 3P^o$	[Dat84]
174,34	0,15	174,2729	0,222	0,002	x	N	$2s^2 2p^3 \quad 2P^o$	$2s^2 2p^2(^3P)3s \quad 2P$	[Dat84]
193,05	0,15	193,0905	0,330	0,002		C	$2s^2 2p^2 \quad 1D$	$2s^2 2p3s \quad 1P^o$	[Dat84]
219,19	0,16	219,05	0,0575	0,0009	x	CO	$X \quad 2\Sigma^+$	$B \quad 2\Sigma_u^+$	[Bur11]
239,68	0,16		0,0984	0,0019	x				
242,94	0,16		0,453	0,003					
288,28	0,17	288,2	0,0750	0,0013	x	CO <sub>2</sub>	$X \quad 2\Pi_{g^{3/2}}$	$B \quad 2\Sigma_u^+$	[Bur11]
289,58	0,17	289,6	0,0638	0,0013	x	CO <sub>2</sub>	$X \quad 2\Pi_{g^{1/2}}$	$B \quad 2\Sigma_u^+$	[Bur11]



## 6. Auswertung und Diskussion der Messungen von 110 - 310 nm

In Abb. 6.5 sind die aufsummierten Intensitäten für verschiedene Spektralbereiche abgebildet. Es ist deutlich, dass Methanfragmente zwischen 120 und 200 nm zu beobachten sind. Im Bereich 140-160 nm überwiegt jedoch die aufsummierte Intensität der Referenz-Übergänge. Das Verhältnis der aufsummierten Intensitäten kann aber durch Reduktion des Restgases zu Gunsten der Methanfragmente verschoben werden. Um das Methanspektrum detaillierter zu beobachten, ist es (im Spektralbereich von 110-310 nm) sinnvoll sich auf den Bereich von 120-200 nm zu beschränken, da oberhalb keine Übergänge von Methanfragmenten auftreten.

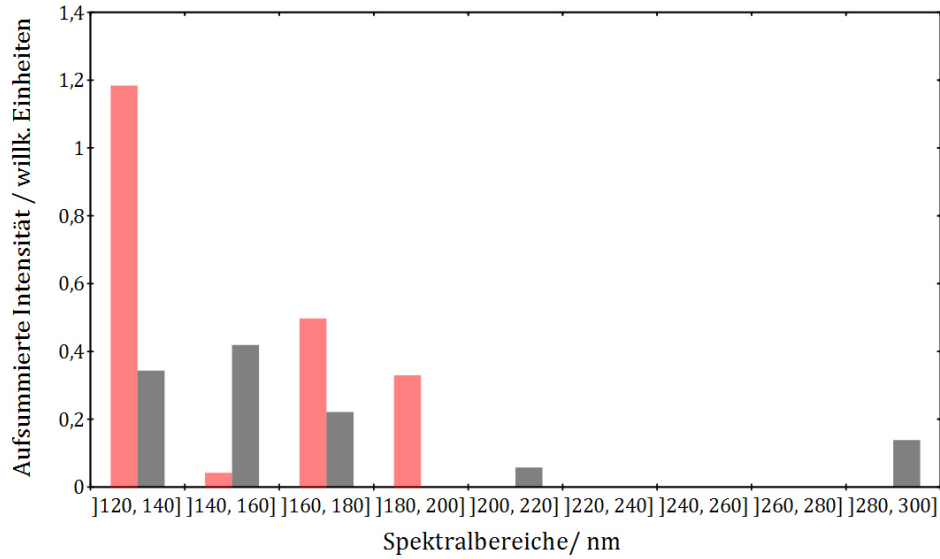
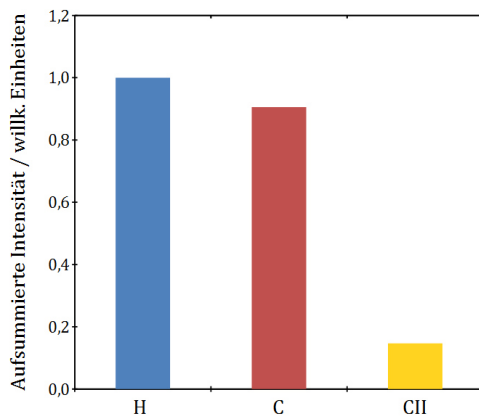
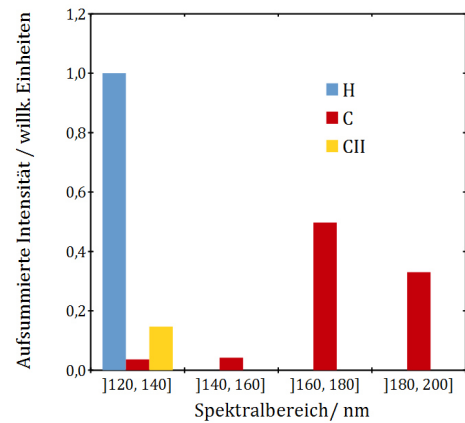


Abbildung 6.5.: Aufsummierte Intensitäten der Spektralbereiche.



(a)



(b)

Abbildung 6.6.: (a) Aufsummierte Intensitäten der Methan-Fragmente. (b) Aufsummierte Intensitäten der Spektralbereiche.

In Abb. 6.6 (a) sind die aufsummierten Intensitäten der Methan-Fragmente H, C<sup>+</sup> und C aufgetragen. Die Intensität des LYMAN-Überganges ist höher, als die aufsummierte Intensität der C-Übergänge, die

wiederum größer ist, als die Intensität des einzigen C<sup>+</sup>-Übergangs. Außerdem sind alle drei Fragmente zwischen 120 und 140 nm beobachtbar (Abb. 6.6 (b)), während von 140-200 nm nur C-Übergänge auftreten. Zur Beobachtung aller hier identifizierten Methanfragmente eignet sich also der Bereich 120-140 nm, während C-Übergänge im gesamten Spektralbereich von 120 bis 200 nm beobachtet werden können.

## 6.4. Unsicherheiten $\delta\lambda$ der Wellenlängenkalibrierung

Aus der Gleichung

$$\lambda(x) = \lambda_0 + m \cdot x \quad (6.9)$$

folgt die Unsicherheit der Wellenlänge

$$\delta\lambda = \delta\lambda_0 + x\delta m + m\delta x \quad (6.10)$$

$$= 0,06 \text{ nm} + x \cdot 0,00002 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} + 0,08060 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \cdot 0,5 \text{ Kanal} \quad (6.11)$$

mit

$$\delta\lambda_0 = 0,06 \text{ nm} \quad (6.12)$$

$$\delta m = 0,00002 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \quad (6.13)$$

$$\delta x = 0,5 \text{ Kanal} . \quad (6.14)$$

Die Ergebnisse sind in Tab. 6.4 abzulesen. Auch hier kann  $\delta x_c$  vernachlässigt werden.

## 6. Auswertung und Diskussion der Messungen von 110 - 310 nm

Tabelle 6.4.: Umrechnung der Wellenlänge  $x$  in  $\lambda$  für die ausgewerteten Übergänge und die zugehörigen Unsicherheiten  $\delta\lambda$ .

$x$ [Kanal]	$\lambda$ [nm]	$\delta\lambda$ [nm]
1592,4	120,05	0,13
1611,1	121,55	0,13
1645,7	124,34	0,13
1684,5	127,47	0,13
1691,6	128,04	0,13
1721,1	130,42	0,13
1758,9	133,47	0,14
1955,8	149,34	0,14
2038,6	156,01	0,14
2075,4	158,98	0,14
2158,0	165,64	0,14
2266,0	174,34	0,15
2498,1	193,05	0,15
2822,4	219,19	0,16
3076,7	239,68	0,16
3117,1	242,94	0,16
3679,6	288,28	0,17
3695,8	289,58	0,17

### 6.5. Unsicherheiten $\delta I_{rel}$ der relativen Intensitäten

Die relative Intensitäten wurden mit der Formel

$$I_{rel} = \frac{y_0 + A}{y_0(121,55 \text{ nm}) + A(121,55 \text{ nm})} \quad (6.15)$$

berechnet. Deren Unsicherheiten lassen sich also so berechnen:

$$\delta I_{rel} = \frac{\delta y_0 + \delta A}{y_0(121,55 \text{ nm}) + A(121,55 \text{ nm})} = \frac{\delta y_0 + \delta A}{0,013 + 1} . \quad (6.16)$$

Die Ergebnisse sind in Tab.6.3 abzulesen. Auch hier können  $\delta y_0$  und  $\delta A$  vernachlässigt werden.

## 6.6. Alternative Kalibrierungsmethode

Neben der verwendeten Kalibrierungsmethode existiert eine weitere Möglichkeit der Kalibrierung. Dazu werden nur zwei Aufnahmen in unterschiedlichen Gitterstellungen und ein bekannter Übergang oder die 0. Ordnung des Gitters benötigt. Der Versatz  $\Delta x_c$ , den ein Übergang zwischen zwei unterschiedlichen Gitterstellungen erfährt, wird bestimmt. Dieser ist mit  $200 \text{ \AA}$  bekannt. Aus den beiden Werten kann die Steigung der Kalibrierungsgeraden berechnet werden. Der Achsenabschnitt  $\lambda_{2,0}$  wird dann aus der 0. Ordnung ermittelt. Damit ergibt sich eine lineare Umrechnung der Form

$$\lambda_2(x) = \frac{\Delta \lambda_2}{\Delta x_c} \cdot x - \lambda_{2,0} . \quad (6.17)$$

Ziel diesen Abschnittes ist es, die Unsicherheit der Methode zu bestimmen.

Im Folgenden werden die Aufnahmen  $4000 \text{ \AA}$  und  $3800 \text{ \AA}$  verwendet um  $\Delta x_c$  zu bestimmen. Dazu werden die Rohdaten jeder Aufnahme in Abhängigkeit der Kanäle aufgetragen (Abb. 6.7) und der beobachtete Übergang wird durch eine Gauß-Funktion approximiert. Für die Aufnahme  $4000 \text{ \AA}$  gilt:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= f_0 + A e^{-0,5((x-x_{c1})/w)^2} \\ \text{mit } f_0 &= (300 \pm 20) \text{ Ereignisse,} \\ A &= (10670 \pm 80) \text{ Ereignisse,} \\ x_{c1} &= (198,34 \pm 0,04) \text{ Kanäle,} \\ \text{und } w &= (4,45 \pm 0,04) \text{ Kanäle .} \end{aligned} \quad (6.18)$$

Für die Aufnahme  $3800 \text{ \AA}$  gilt:

$$\begin{aligned} f_2(x) &= f_0 + A e^{-0,5((x-x_{c2})/w)^2} \\ \text{mit } f_0 &= (264 \pm 16) \text{ Ereignisse,} \\ A &= (10130 \pm 80) \text{ Ereignisse} \\ x_{c2} &= (320,81 \pm 0,04) \text{ Kanäle,} \\ \text{und } w &= (4,07 \pm 0,04) \text{ Kanäle .} \end{aligned} \quad (6.19)$$

Der Versatz  $\Delta x_c$  kann berechnet werden zu

$$\Delta x_c = x_{c2} - x_{c1} = 320,81 \text{ Kanäle} - 198,34 \text{ Kanäle} = 122,47 \text{ Kanäle} . \quad (6.20)$$

Die Skala der Gitterposition am Monochromator ist auf ein Gitter mit  $g = 600 \frac{1}{\text{mm}}$  bezogen. Der Versatz  $\Delta \lambda_2$  in nm muss halbiert werden, da ein Gitter mit  $1200 \frac{1}{\text{mm}}$  verwendet wurde:

$$\Delta \lambda_2 = \frac{200}{2} \text{ \AA} = 100 \text{ \AA} . \quad (6.21)$$

## 6. Auswertung und Diskussion der Messungen von 110 - 310 nm

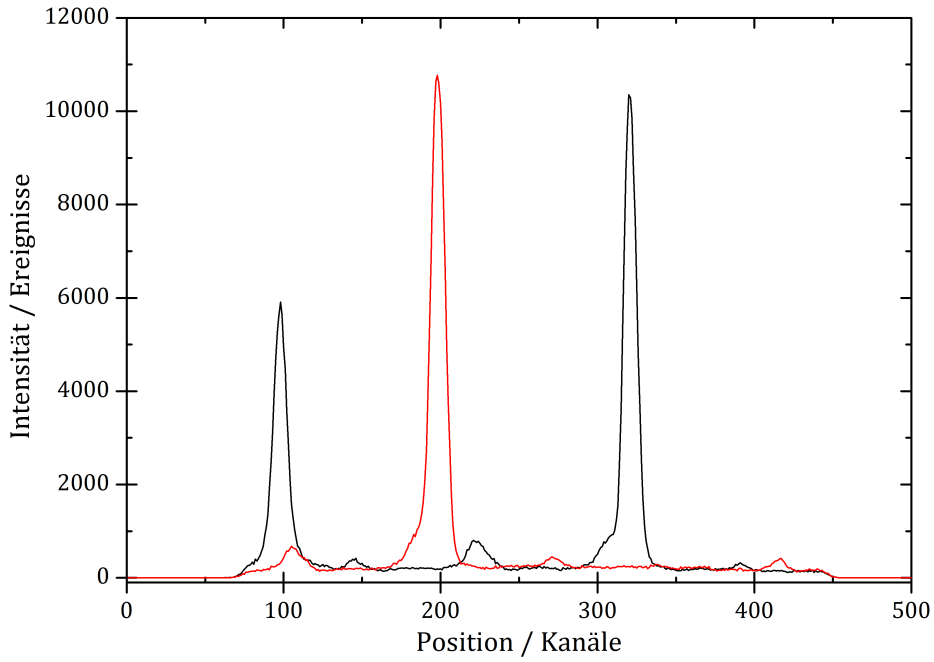


Abbildung 6.7.: Die Aufnahmen eines Übergangs bei den Gitterstellungen 3800 Å (schwarz) und 4000 Å (rot).

Damit ergibt sich die Steigung

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} = \frac{100 \text{ Å}}{122,47 \text{ Kanäle}} = 0,817 \frac{\text{Å}}{\text{Kanal}} . \quad (6.22)$$

Dann wird der Achsenabschnitt aus einem bekannten Punkt, der 0. Ordnung, bestimmt. Diese liegt bei  $x_0 = 102,8$  Kanälen. Dafür gilt

$$\lambda_2(x_0 = 102,8 \text{ Kanäle}) = 0 \quad (6.23)$$

$$\Rightarrow \lambda_{2,0} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} x_0 = 0,817 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \cdot 102,8 \text{ Kanäle} = 8,40 \text{ nm} , \quad (6.24)$$

sodass die Kalibrierungs-Gleichung

$$\lambda_2(x) = 0,817 \frac{\text{nm}}{\text{Kanäle}} \cdot x - 8,40 \text{ nm} \quad (6.25)$$

lautet. Im Vergleich mit der Methode über die lineare Regression der Gleichung

$$\lambda(x) = 0,8060 \frac{\text{nm}}{\text{Kanäle}} \cdot x - 8,30 \text{ nm} \quad (6.26)$$

zeigt sich, dass die Größenordnungen der Steigung und des Achsenabschnittes sehr gut übereinstimmen. Werden die Unsicherheiten

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} = (0,0817 \pm 0,005) \frac{\text{nm}}{\text{Kanäle}} \quad |\lambda_{alt,0}| = (8,40 \pm 0,09) \text{ nm} \quad (6.27)$$

$$m = (0,08060 \pm 0,00005) \frac{\text{nm}}{\text{Kanäle}} \quad |\lambda_0| = (8,30 \pm 0,06) \text{ nm} \quad (6.28)$$

verglichen, so wird deutlich, dass die Steigung der hier vorgestellten Methode um zwei Größenordnungen ungenauer und der Achsenabschnitt eine ähnliche Ungenauigkeit verglichen mit der in der Auswertung genutzten Kalibrierung aufweist. Tab. 6.5 zeigt den Vergleich der Wellenlängen der beiden Kalibrierungsmethoden. Die Ungenauigkeiten der  $\delta\lambda_2$  werden im folgenden Abschnitt berechnet. Die maximale Ungenauigkeit der alternativen Methode von 2 nm unterscheidet sich deutlich von der maximalen Ungenauigkeit 0,17 nm der Regressions-Methode. Allerdings ist eine Genauigkeit von nur 2 nm für die geringen Informationen, die benötigt werden, sehr gut. Die Methode kann verbessert werden, indem die Steigung mehrfach bestimmt wird.

Tabelle 6.5.: Vergleich der Wellenlängen beider Kalibrierungsmethoden.

$x$ [Kanal]	$\lambda_2$ [nm]	$\delta\lambda_2$ [nm]	$\lambda$ [nm]	$\delta\lambda$ [nm]	$\lambda_{lit}$ [nm]
1592,4	121,7	0,9	120,05	0,13	120,0223
1611,1	123,2	0,9	121,55	0,13	121,566
1645,7	126,1	1,0	124,34	0,13	124,3306
1684,5	129,2	1,0	127,47	0,13	127,5143
1691,6	129,8	1,0	128,04	0,13	128,0333
1721,1	132,2	1,0	130,42	0,13	130,4858
1758,9	135,3	1,0	133,47	0,14	133,4532
1955,8	151,4	1,1	149,34	0,14	149,282
2038,6	158,2	1,2	156,01	0,14	156,031
2075,4	161,2	1,2	158,98	0,14	
2158,0	167,9	1,2	165,64	0,14	165,7008
2266,0	176,7	1,3	174,34	0,15	174,2729
2498,1	195,7	1,4	193,05	0,15	193,0905
2822,4	222,2	1,5	219,19	0,16	219,05
3076,7	243,0	1,7	239,68	0,16	
3117,1	246,3	1,7	242,94	0,16	
3679,6	292	2	288,28	0,17	288,2
3695,8	294	2	289,58	0,17	289,6

### 6.6.1. Unsicherheiten der alternativen Kalibrierung

Die Wellenlängen  $\lambda_2$  ergeben sich aus

$$\lambda_2(x) = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} \cdot x - \lambda_{alt,0} = 0,0817 \frac{\text{nm}}{\text{Kanäle}} \cdot x - 8,40 \text{ nm} . \quad (6.29)$$

Die Unsicherheit der Steigung wird folgendermaßen berechnet

$$\delta \left( \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} \right) = \left| \frac{\partial \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c}}{\partial \Delta\lambda_2} \delta(\Delta\lambda_2) \right| + \left| \frac{\partial \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c}}{\partial \Delta x_c} \delta(\Delta x_c) \right| \quad (6.30)$$

$$= \frac{1}{\Delta x_c} \delta(\Delta\lambda_2) + \frac{\Delta\lambda_{alt}}{(\Delta x_c)^2} \delta(\Delta x_c) \quad (6.31)$$

$$= \frac{1}{122,47 \text{ Kanäle}} \frac{1}{2} \text{ Å} + \frac{100 \text{ Å}}{(122,47 \text{ Kanäle})^2} 0,08 \text{ Kanäle} \quad (6.32)$$

$$= 0,005 \frac{\text{Å}}{\text{Kanäle}} = 0,0005 \frac{\text{nm}}{\text{Kanäle}} , \quad (6.33)$$

wobei  $\delta(\Delta\lambda_2) = \frac{1}{2} \text{ Å}$  und  $\delta(\Delta x_c) = \delta x_{c1} + \delta x_{c2} = 0,04 \text{ Kanäle} + 0,04 \text{ Kanäle} = 0,08 \text{ Kanäle}$  betragen. Aus dem Fit der 0. Ordnung folgt, wegen  $\lambda_{2,0} = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} x_0$ ,

$$\delta\lambda_{2,0} = \delta \left( \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} \right) \cdot x_0 + \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} \delta x_0 \quad (6.34)$$

$$= 0,0005 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \cdot 102,8 \text{ Kanal} + 0,0817 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \cdot 0,5 \text{ Kanäle} \quad (6.35)$$

$$= 0,09 \text{ nm} , \quad (6.36)$$

wobei  $\delta x_0 = 0,5 \text{ Kanäle}$ . Damit kann die Ungenauigkeit der Wellenlängen folgendermaßen

$$\delta\lambda_2 = x \delta \left( \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} \right) + \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta x_c} \delta x + \delta\lambda_{2,0} \quad (6.37)$$

$$= x \cdot 0,0005 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} + 0,0817 \frac{\text{nm}}{\text{Kanal}} \cdot 0,5 \text{ Kanäle} + 0,09 \text{ nm} \quad (6.38)$$

berechnet werden. Die Ungenauigkeiten können in Tab.6.5 abgelesen werden.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Die Messergebnisse werden im Folgenden kurz angegeben. Im EUV/VUV-Spektralbereich sind nur Übergänge der Spezies H beobachtbar (Abb. 7.1). Speziell handelt es sich um die Übergänge  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  und  $\delta$  der LYMAN-Serie bei 94,92 nm, 97,33 nm, 102,67 nm, 121,66 nm.

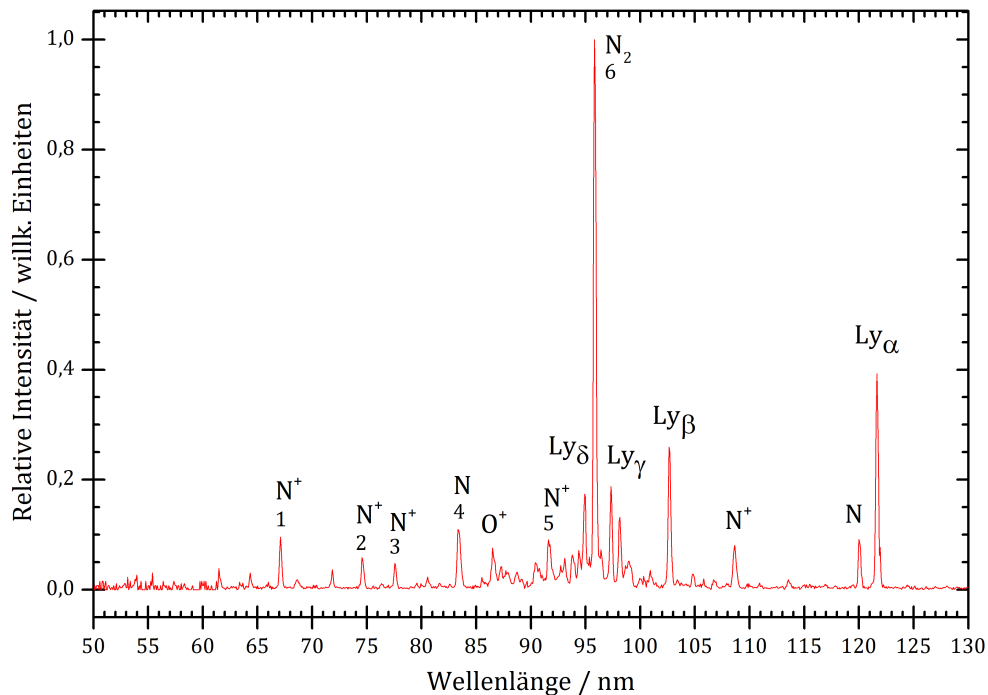


Abbildung 7.1.: Methanspektrum mit Hintergrund. Zur Kalibrierung wurden die Übergänge 1 bis 6 genutzt.

Im FUV-Spektralbereich werden Übergänge der Methan-Fragmente C und  $C^+$  nachgewiesen (Abb. 7.2). Dabei handelt es sich um die C-Übergänge 128,04 nm, 156,01 nm, 165,64 nm, 193,05 nm und einen  $C^+$ -Übergang bei 133,47 nm. Es ist möglich, durch Verringerung des Restgasdruckes noch weitere Übergänge oder sogar weitere Spezies zu identifizieren. Die Intensität dieser Übergänge ist dann niedriger als 13 % der Intensität des LYMAN- $\alpha$ -Übergangs.

Molekulare, von Methan stammende, Übergänge wurden nicht beobachtet. Dies kann unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen kann es sein, dass deren Intensitäten sehr klein sind. Zum anderen ist die Anregungsenergie von 3,5 keV groß, sodass nur atomare Fragmente entstehen. Bei energieabhängigen Messungen können gegebenenfalls molekulare Fragmente beobachtet werden.

Im Hinblick auf die Untersuchung chiraler Moleküle kann der beobachtete Spektralbereich von 30 bis 310 nm zu niedrigeren Wellenlängen oder in den sichtbaren Bereich erweitert werden, damit das Spek-



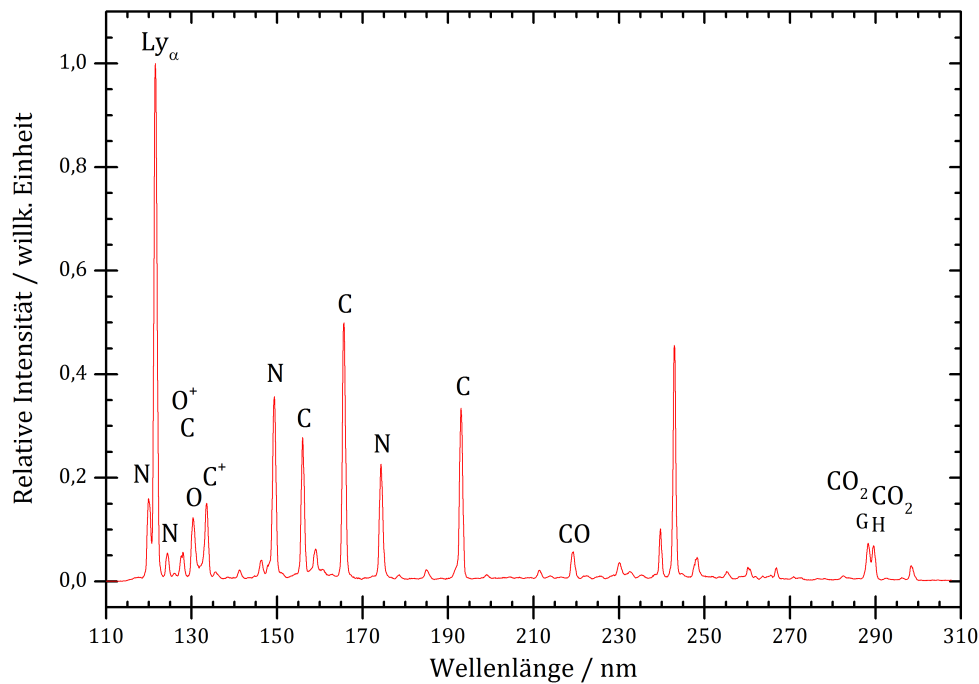


Abbildung 7.2.: Methanspektrum mit Hintergrund. Zur Kalibrierung wurden der LYMAN- $\alpha$ -Übergang und die Übergänge G und H genutzt, sowie die 0. Ordnung, die hier nicht zu sehen ist.

trum auch in anderen Berichen als Referenz dienen kann.

Es sind zwei Kalibrierungsmethoden verwendet worden. Bei der einfacheren Methode wird ein Übergang bei verschiedenen Gitterstellungen beobachtet. Aus dieser Information und mit der 0. Ordnung wird eine Regressionsgerade erstellt.

Diese einfache und schnelle Kalibrierungsmethode ist erstaunlich genau mit einer relativen Ungenauigkeit von 0,7 %. Sie eignet sich daher besonders gut für Tests zur Orientierung auf der Wellenlängenskala. Bei der anderen Methode werden Referenzübergänge verwendet. Sie ist zwar aufwendiger, aber dafür mit einer relativen Ungenauigkeit von 0,1 % und somit um einen Faktor 7 genauer. Daher empfiehlt sie sich weiterhin für Spektren hoher Präzision.

# Literaturverzeichnis

- [Bur11] Burbank, N. *Elektronenstoßinduzierte Fluoreszenzspektroskopie*. Diplomarbeit, Universität Kassel (2011).
- [Dat84] Datenbank. *Atomic Database*. National Institute of Standards and Technology (1984).
- [Han13] Hans, A. *Zerfallsuntersuchungen an Edelgasclustern und Aufbau eines Detektor für Strahlung von 40 bis 120 nm und Charakterisierung durch Messung elektronenstoßangeregter Fluoreszenz*. Diplomarbeit, Universität Kassel (2013).
- [Her39] Herzberg, G. *Molekülspektren und -struktur*. Dover Publications (1939).
- [Her45] Herzberg, G. *Atomic Spectra and atomic Structure*. Theodor Steinkopff (1945).
- [Jag02] Jagutzki, O. *Multiple Hit Readout of a Micro Channel Plate with a Three-Layer Delay-Line Anode*. IEEE Transactions on Nuclear Science, 49, 2477 (2002).
- [Kni12] Knie, A. *Photon-induced inner-shell excitation processes of nitrous oxide probed by angle resolved fluorescence and Auger-electron spectrometry*. Dissertation, Universität Kassel (2012).
- [Kni14] Knie, A. *Private Kommunikation* (2014).
- [Lan06] Lankowicz, J. *Principles of fluorescence spectroscopy*. Springer (2006).
- [Nol04] Nolting, W. *Grundkurs Theoretische Physik 5/2*. Diplomarbeit (2004).
- [Nor84] Norm. *DIN 5031 Teil 7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche*. Deutsches Institut für Normung (1984).
- [Ozg14] Ozga, C. *Private Kommunikation*. Matlab-Programm (2014).
- [Pet11] Peter, C. K. *Organische Chemie*. John Wiley & Sons (2011).
- [Rei10] Reiß, P. *Interferenzeffekte lebensdauerbreiter Zustände der  $CO\ 1s^{-1}\pi^*$ -Resonanz beobachtet durch den  $CO^+A\ ^2\pi \rightarrow X^2\Sigma^+$ -Fluoreszenzzerfall*. Diplomarbeit, Universität Kassel (2010).
- [Sch13] Schmidt, P. *Lyman- $\alpha$  Koinzidenz nach neutraler Dissoziation von Wasserstoffmolekulan aus superexcited states in neutrale Fragmente*. Diplomarbeit, Universität Kassel (2013).
- [Sch14] Schmidt, P. *Private Kommunikation*. Software  $\mu\epsilon\tau\rho$  (2014).

# A. Auswertungsscript des Matlab-Programmes

Alle zur Auswertung verwendeten Matlab-Files wurde von [Ozg14] programmiert.

## A.1. Auswertungs-Script

```
1 %Laden der Rohdaten über eine entsprechende Funktion (loadvuvdata).
2 %Name ist historisch bedingt. Dieses liest lediglich die Einträge in den
3 %Rohdaten zeilenweise aus und speichert sie unter Feldern entsprechend ihrer
4 %Dateinamen in einem struct.
5 vuvdata=loadvuvdata;
6 %Das struct wird kopiert, in ein cellarray umgewandelt und die Feldnamen
7 %des eigentlichen structs extrahiert
8 a=struct2cell(vuvdata);
9 b=fieldnames(vuvdata);
10 %Die Feldnamen werden gekürzt und ein struct "data" mit den gekürzten
11 %Feldnamen erstellt... Das geht insgesamt bestimmt auch einfacher!
12 b=cellfun(@(x) x(1:12), b, 'UniformOutput',0);
13 data.raw=cell2struct(a,b,1);
14
15 %Das Feld "meastime" wird initialisiert
16 data.meastime=structfun(@(x) 1,data.raw, 'UniformOutput',false);
17
18 %Manuelles Setzen der Messzeit jeder Datei. Diese kann entweder global für
19 %alle geladenen Daten gesetzt werden (Option 1) oder manuell für jede
20 %Datei einzeln (Option 2). Bei Option 2 muss die Länge des meastimes-Vektors
21 %mindestens der Anzahl an geladenenen Dateien entsprechen. Sonst: FEHLER
22 %Die nicht genutzte Option ist auszukommentieren.
23 datanames=fieldnames(data.meastime);
24 %Option 1
25 %meastimes=ones(size(datanames,1),1)*600;
26 %Option 2
27 meastimes=[60 60 60 60 60 60 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600 600
            600 600 600 600]
28 for i=1:size(fieldnames(data.meastime),1)
29     data.meastime.(datanames{i})=meastimes(i);
30 end
31
32 %Hier werden die Parameter für den Detektor in ein struct geschrieben,
33 %welche so kompakt an verschiedene Funktionen übergeben werden können.
34 %Der nicht verwendete Detektor ist auszukommentieren! Mit (%)
```

```

35
36 % WSA Parameter
37 detector='vuv';
38 parameter=[];
39 parameter.channels=512;
40 parameter.xscale=2.7;
41 parameter.xoffset = 0.06;
42 parameter.yscale = 2.7;
43 parameter.yoffset = 0.04;
44 parameter.ascale = 0.95;
45 parameter.aoffset = 0;
46 parameter.bscale = 0.65;
47 parameter.boffset = 0;
48 parameter.cscale = 1.5;
49 parameter.coffset = 0;
50 parameter.angle= 5;
51
52 % DLD Parameter
53 detector='dld4';
54 parameter=[];
55 parameter.channels=512;
56 parameter.xscale=0.0005;
57 parameter.xoffset=-1024;
58 parameter.yoffset=-1024;
59 parameter.yscale=0.0005;
60 parameter.angle=-14;
61
62 %Festlegen des Detektorbereichs, welcher für die Bestimmung der
63 %Summenspektren genutzt werden soll
64 roi=[x_1 x_2 y_1 y_2];
65 %Immer auf "No" lassen. Ist eingeführt, falls Skript
66 %auf Energyscans erweitert werden soll...
67 stepsensitive='no';
68 %Berechnung der Fluoreszenzmatrizen aller Rohdaten, welche in der struct
69 % "data" im Feld "raw" gespeichert sind. Die Matrizen werden in data.matrix
70 %gespeichert
71 data=computefluomatrices(data,parameter,detector,stepsensitive);
72 %Erzeugen der Summenspektren mit Hilfe des oben gesetzten roi:
73 %Zunächst Summation entlang der y-Achse summiert wird und so eine Darstellung der
    Ereignisse
74 %pro x-Kanal (ein Summenspektrum) erhalten wird.
75 data.summenspektrum=structfun(@(x) sum((x{1}([roi(3):roi(4)], [roi(1):roi(2)])),1),data.
    matrix, 'UniformOutput', false);
76 %Abrufen der Feldnamen, welche in data.matrix liegen. Hierdurch werden
77 %im nächsten Schritt alle für die Zusammensetzung der Summenspektren
78 %relevanten Summenspektren genutzt. Nötig, da zwei unterschiedliche
79 %Felder von data genutzt werden müssen und mir zu dem Zeitpunkt noch nicht
80 %klar ist wie das über eine cellfun gehen soll....

```

## A. Auswertungsscript des Matlab-Programmes

```
81 datanames=fieldnames(data.matrix);
82 %Die Summenspektren werden durch die Messzeiten geteilt, welche im Feld
83 %meastime eingetragen sind. Dies wird für jedes Summenspektrum mit Hilfe
84 %der Schleife durchgeführt
85 for i=1:size(datanames,1)
86     data.summenspektrum.(datanames{i})= data.summenspektrum.(datanames{i})/data.
        meastime.(datanames{i});
87 end
88 %Erzeugen einer Zeile in der die Koordinaten 1 bis channels stehen.
89 %Dies wird benötigt um Verschiebung der einzelnen Detektorbilder und damit
90 %ein Zusammensetzen zu ermöglichen. Erscheint mir momentan am einfachsten
91 %es so zu machen
92 data.summenspektrum=structfun(@(x) [1:size(x,2);x], data.summenspektrum, 'UniformOutput',
        false);
93 %Festlegen um wie viele Kanäle ein Bild bezüglich des Vorgängers verschoben werden soll
94 shift_val=124;
95 %Erneut Abrufen der Namen aller relevanten Felder um sicherzugehen, dass
96 %nur mögliche Feldnamen abgerufen werden
97 summen_namen=fieldnames(data.summenspektrum);
98 %Festlegen einer Farbkodierung der aufeinanderfolgenden Spektren um
99 %in einer Darstellung, bei der alle Spektren gleichzeitig dargestellt
100 %werden den Überblick zu behalten. Diese wird so oft wiederholt, wie es
101 %notwendig ist, das heißt die Minimalzahl der Wiederholungen wird über
102 %die "ceil" Funktion bestimmt.
103 color={'black','blue','red'};
104 color= repmat(color,1,ceil(size(summen_namen,1)/3));
105 %Falls weniger Spektren als Farben in "color" vorhanden sind, werden die
106 %übrigen Farben gelöscht
107 if size(summen_namen,1)<size(color,2)
108     color([size(summen_namen,1)+1:end])=[];
109 end
110 %Bestimmung der Verschiebung der einzelnen Bilder. Hierbei wird die
111 %Verschiebung so bestimmt, dass die Position in der Struktur die
112 %Weite der Verschiebung beeinflusst. Das erste Feld wird hierbei nicht
113 %verschoben, da es an der "0"-Position ist, die restlichen Spektren werden
114 %um (n-1)*Kanalzahl verschoben, wobei n die Position in
115 %data.summenspektrum ist
116 shifts=[1:size(summen_namen,1)];
117 shifts=(shifts-1)*shift_val;
118
119 %Plot der Einzelspektren in den vorher definierten Farben.
120 %Da nur lines gezeichnet werden muss die vorher definierte "summen_ax"
121 %Achse geleert werden, da sonst alte Linien mitdargestellt werden.
122 %Schleife notwendig um die x-Achse des line-Befehls zu definieren,
123 %ohne es nochmal speichern zu müssen
124 cla(summen_ax);
125 for i=1:size(summen_namen,1)
```

```

126     line(data.summenspektrum.(summen_namen{i})(1,:)+shifts(i),data.summenspektrum.(
      summen_namen{i})(2,:), 'Color',color{i}, 'Parent',summen_ax)
127 end
128 clear summen_namen color
129
130 %Im folgenden wird das Summenspektrum durch Addition und Mittelung
131 %der Einzelspektren erstellt. Dies ist alternativ zu der obigen Darstellung
132 %weswegen viele der vorher definierten Variablen erneut definiert werden
133
134 %Wie zuvor erneut Abrufen der Namen aller relevanten Felder um sicherzugehen, dass
135 %nur mögliche Feldnamen abgerufen werden
136 summen_namen=fieldnames(data.summenspektrum);
137 %Wie zuvor Bestimmung der Verschiebung der einzelnen Bilder. Hierbei wird die
138 %Verschiebung so bestimmt, dass die Position in der Struktur die
139 %Weite der Verschiebung beeinflusst. Das erste Feld wird hierbei nicht
140 %verschoben, da es an der "0"-Position ist, die restlichen Spektren werden
141 %um (n-1)*Kanalzahl verschoben, wobei n die Position in
142 %data.summenspektrum ist
143 shifts=[1:size(summen_namen,1)];
144 shifts=(shifts-1)*shift_val;
145
146 %Erneut Erzeugung der Summenspektrum, aber Speichern unter alternativen
147 %Feld welches nachher weiterbearbeitet wird um das Spektrum zusammenzusetzen
148 %ohne die oben erstellten Einzelspektren zu beeinflussen. Interessant,
149 %wenn nachtragliche beide Darstellungen genutzt werden möchten, ohne alles
150 %neu machen zu müssen
151 data.summenspektrum_padded=structfun(@(x) sum((x{1}([roi(3):roi(4)],[roi(1):roi(2)]))
      ,1),data.matrix, 'UniformOutput',false);
152 %Zeitliche Normierung der Spektren, wie zuvor Schleife nötig, da es über
153 %cellfun nicht funktioniert hat
154 for i=1:size(datanames,1)
155     data.summenspektrum_padded.(summen_namen{i})= data.summenspektrum_padded.(
      summen_namen{i})/data.meastime.(summen_namen{i});
156 end
157 %Eintragen der Kanäle. Zahl geht hier von 1 bis zu der gewählten Kanalanzahl,
158 %welche sich aus der für die Detektorbilder gewählten Kanalanzahl und der Größe der roi
      ergibt.
159 data.summenspektrum_padded=structfun(@(x) [1:size(x,2);x],data.summenspektrum_padded, '
      UniformOutput',false);
160 %Hier wird nun ein wenig umständlich die Kanalzahl vor und nach der Verschiebung in die
      Daten geschrieben. Die Daten haben daher folgendes Format:
161
162 for i=size(summen_namen):-1:1
163 %1. Zeile: Kanalnummer vor der Verschiebung
164 %2. Zeile: Kanalnummer nach der Verschiebung
165 %3. Zeile: Ereignisse in diesem Kanal
166     data.summenspektrum_padded.(summen_namen{i})=[data.summenspektrum_padded.(
      summen_namen{i})(1,:); data.summenspektrum_padded.(summen_namen{i})(1,:)+shifts(i);

```

```

165     data.summenspektrum_padded.(summen_namen{i})(2,:)];
166 %Hier wird ein Zeropadding erstellt. Der Sinn davon ist, dass alle
167 %Summenspektren die maximale Kanalanzahl haben. Diese ergibt sich aus der
168 %Anzahl der Spektren, der Kanalanzahl pro Spektrum und der Verschiebung
169 %zeropad_front sind die nötigen Nullen vor dem eigentlichen Spektrum und
170 %zeropad_end die nötigen Nullen nach dem Spektrum. Der "flipud" Befehl ist
171 %an sich überflüssig, macht es aber auch nicht unübersichtlicher,
172 %daher wird er beibehalten
173 %Die "-1" in der dritten Zeile wird später für die Mittelung benötigt
174
175
176     zeropad_front=[1:(i-1)*shift_val];
177     zeropad_front(2,:)=0;
178     zeropad_front=flipud(zeropad_front);
179     zeropad_front(3,:)=-1;
180
181     zeropad_end=[data.summenspektrum_padded.(summen_namen{i})(2,end)+1:shift_val*(size(
182     summen_namen,1)-1)+size(data.summenspektrum_padded.(summen_namen{1}),2)];
183     zeropad_end(2,:)=0;
184     zeropad_end=flipud(zeropad_end);
185     zeropad_end(3,:)=-1;
186     data.summenspektrum_padded.(summen_namen{i})=[zeropad_front data.
187     summenspektrum_padded.(summen_namen{i}) zeropad_end];
188 %     zeropad_end=[];
189 %     zeropad_front=[];
190 end
191
192 %Hier werden die Summenspektren zusammengesetzt und, falls ein überlapp
193 %vorhanden ist, gemittelt.
194 %Zunächst werden alle Summenspektren untereinander gesetzt indem aus dem
195 %struct ein cellarray und dann eine Matrix erstellt wird. Hierdurch stehen
196 %die dreizeiligen Spektren untereinander. Dies geht so nur wegen dem
197 %vorher durchgeführten zeropaddings, da sonst die durchgeführte Verschiebung
198 %verloren gehen würde.
199 createsum.data=cell2mat(struct2cell(data.summenspektrum_padded));
200 %Die Zeilen mit den Ereignissen werden extrahiert. Diese Zeilen enthalten
201 %die Ereignisse in dem jeweiligen Channel oder den Eintrag -1, wenn wir uns
202 %in einem der zeropadding Bereiche befinden.
203 createsum.data=createsum.data([1:size(summen_namen,1)]*3,:);
204 %Es wird getestet ob ein echter Messwert vorliegt. Echte Messwerte sind
205 %entweder 0 oder eine positive Zahl. Nur durch zeropadding erzeugte Werte
206 %können per Definition eines Summenspektrums negativ sein.
207 createsum.realval_true=createsum.data>-1;
208 %Für jeden Kanal des Gesamtspektrums wird ermittelt, wie viele Einzelspektren
209 %einen echten Beittag zu diesem Kanal liefern.
210 createsum.num_overlaps=sum(createsum.realval_true,1);
211 %Die "-1"-Werte werden mit "0" überschrieben. Möglich da das Feld
212 %"realval_true" eine 1 enthält, wenn es ein echter Wert ist und "0" bei
213 %einem falschen. Durch elementweise Multiplikation (.* ) bleiben echte

```

```

212 %Ereignisse daher erhalten und "-1" Einträge sind danach 0. Wäre auch
213 %anders zu implementieren, fand ich hier aber am einfachsten, da die
214 %Variablen schon initialisiert waren.
215 createsum.data=createsum.data.*createsum.realval_true;
216 %Aufsummieren aller Einzelspektren. Diese werden danach elementweise
217 %durch die Anzahl der zu dem jeweiligen Kanal beitragenden Einzelspektren
218 %geteilt um so keine Kanäle mehrfach zu zählen.
219 createsum.summed=sum(createsum.data,1);
220 data.spektrum_done=createsum.summed./createsum.num_overlaps;
221 %Erstellen der Variable, welche das Spektrum mit den Kanalnummern enthält
222 data.spektrum_done=[1:size(data.spektrum_done,2);data.spektrum_done];
223 %Ende der Summenspektrenerstellung

```

## A.2. Erstellung der Fluoreszenzmatrizen

```

1 %Auswahl des Detektortyps und ob für jeden Schritt eines Scans eine
2 %Fluoreszenzmatrix erstellt werden muss oder nicht
3 function data=computefluomatrixes(data,parameter,detector,stepsensitive)
4 %Auswahl ob Scan oder nicht
5 switch stepsensitive
6     case 'yes'
7         data.stepmatrices=structfun(@(x) compmatrix_s(x,parameter,detector),data.raw.
            stepdata,'UniformOutput',false);
8     case 'no'
9         data.matrix=structfun(@(x) compmatrix_s({x},parameter,detector),data.raw,'
            UniformOutput',false);
10 end
11
12
13 function stepmatrices=compmatrix_s(stepdata,parameter,detector)
14 %Auswahl des Detektortyps. Momentan Vierkanal-DLD, Sechskanal-DLD und
15 %WSA-VUV Detektor möglich. Diese Funktionen bestimmen die Koordinaten der
16 %jeweiligen Ereignisse und erstellen eine zweispalte Matrix, deren
17 %Zeilenzahl der Anzahl an detektierten Ereignissen entspricht
18 switch detector
19
20     case 'dld4'
21         stepcoordinates=cellfun(@(x) compdld4matrixfcn(x,parameter),stepdata,'UniformOutput
            ',false);
22     case 'dld6'
23         stepcoordinates=cellfun(@(x) compdld6matrixfcn(x,parameter),stepdata,'UniformOutput
            ',false);
24     case 'vuv'
25         stepcoordinates=cellfun(@(x) compvuvmatrixfcn(x,parameter),stepdata,'UniformOutput
            ',false);
26 end
27 %Bestimmung der Fluoreszenzmatrix aus den Koordinaten

```



## A. Auswertungsscript des Matlab-Programmes

```
28     stepmatrices=cellfun(@(x) compmatrixhistfcn(x,parameter), stepcoordinates, '  
    UniformOutput', false);  
29  
30 %Bestimmt aus einer Matrix mit zwei Spalten und N einträgen eine Matrix,  
31 %deren Wert am Ort (X,Y) gleich der Anzahl aller Zeilen ist, die dieses  
32 %Zahlentupel enthält. Stellt somit die Fluoreszenzmatrix, auch  
33 %Detektorbild genannt, dar.  
34 function matrix= compmatrixhistfcn(coordinates,parameter)  
35 %Auslesen der benötigten Parameter aus dem struct parameter  
36 channels=parameter.channels;  
37 %Initialisierung einer channels*channels großen Matrix, deren Einträge überall  
38 %0 ist  
39 matrix=zeros(channels);  
40 %Geht jede Zeile der Koordinatenmatrix durch und erhöht im Matricelement  
41 %m(X,Y) den Zähler jeweils um 1  
42 for i=1:size(coordinates,1)  
43     matrix(coordinates(i,1),coordinates(i,2))= matrix(coordinates(i,1),coordinates(i,2))  
        +1;  
44 end  
45 %Da Metro ein Koordinatensystem verwendet in dem der Eintrag (1,1) unten  
46 %links ist, Matlab aber den Punkt (1,1) oben links setzt, wird die Matrix  
47 %an der X Achse gespiegelt um so ein zu Metro konsistentes Koordinaten-  
48 %system zu verwenden  
49 matrix=flipud(matrix);
```

### A.3. Bestimmung der Koordinaten für Delay-Line-Anoden

```
1 %Funktion zur Berechnung der X,Y Koordinaten der Ereignisse bei Nutzung  
2 %eines Vierkanal-Delay-Line-Anode Detektors  
3 function coordinates=compdld4matrixfcn(raw,parameter)  
4 %Auslesen der Parameter des Detektors, welche in der struct parameter  
5 %gespeichert sind  
6 channels=parameter.channels;  
7 xscale=parameter.xscale;  
8 xoffset=parameter.xoffset;  
9 yscale=parameter.yscale;  
10 yoffset=parameter.yoffset;  
11 angle=parameter.angle;  
12 %Zuordnung der Spalten der Rohdaten zu den verschiedenen "Delay-Lines"  
13 U1=raw(:,1);  
14 U2=raw(:,2);  
15 V1=raw(:,3);  
16 V2=raw(:,4);  
17 %Differenzbildung und damit "Positionssuche" auf der jeweiligen Delayline  
18 u=U1-U2;  
19 v=V1-V2;  
20
```

```

21 %Umrechnung des Winkels der besser vorstellbaren Winkelangabe in Radiant ,
22 %da Matlab nur in Radiant rechnet
23 angle=angle*pi/180;
24
25 %Suche von Ereignissen die Oberhalb bzw. Unterhalb eines Schwellwertes liegen
26 %Dieser ist hier manuell festgelegt , könnte aber auch in die Parameter
27 %inkludiert werden
28 [row,col]=find([ u v]>2000);
29 u(row,:)=[];
30 v(row,:)=[];
31 [row,col]=find([ u v]<-2000);
32 u(row,:)=[];
33 v(row,:)=[];
34
35 %Bestimmung der x- und y- Werte aus obigen Werten für u und v gemäß der
36 %bekannten Umrechnungsvorschriften
37 ytemp=u;
38 xtemp=(u+2*v)/sqrt(3);
39
40 %Schreiben der Rotationsmatrix , mit welcher das Bild gedreht wird
41 %Wurde der vorliegenden Metroversion nachempfunden
42 rot_mat=...
43     [xscale*cos(angle) -yscale*sin(angle);...
44     xscale*sin(angle)  yscale*cos(angle)];
45 %Festlegung des Offsets analog zu der Metroversion
46 offset=[xoffset+0.5/xscale;yoffset+0.5/yscale];
47
48 %Schreiben der Koordinaten in eine zweispaltige Matrix
49 coordinates=[xtemp';ytemp'];
50 %Jede Zeile wird in eine Zelle umgewandelt, um über cellfun diese verschieben
51 %und danach drehen zu können
52 coordinates=mat2cell(coordinates,2,ones(size(coordinates,2),1));
53 coordinates=cellfun(@(x) x-offset ,coordinates , 'UniformOutput' ,false);
54 coordinates=cellfun(@(x) rot_mat*x+0.5 ,coordinates , 'UniformOutput' ,false);
55 %Rückumwandlung in eine zweispaltige Matrix
56 coordinates=cell2mat(coordinates)';
57 %Abrundung aller Ereignisse. Hier KEINE Interpolation , daher Artefakte
58 %im Detektorbild möglich
59 coordinates=floor(coordinates*channels);
60 %Rauswerfen negativer Koordinaten , falls vorhanden
61 [row, col]= find(coordinates<1);
62 coordinates(row,:)=[];
63 %Rauswerfen zu großer Koordinaten , falls vorhanden
64 %Koordinaten dürfen hierbei nicht größer als die Channelzahl sein.
65 [row, col]= find(coordinates>channels);
66 coordinates(row,:)=[];
67 %Ergebnis sind die (X,Y) Koordinaten. Die dem Detektorbild entsprechende
68 %Matrix wird in der Funktion compmatrixhistfcn(coordinates ,parameter)

```

69 %erstellt

## A.4. Bestimmung der Koordinaten für Keil-und-Streifen-Anoden

```

1 %Funktion zur Berechnung der (X,Y) Koordinaten der Ereignisse bei Nutzung
2 %eines WSA Detektors
3 function vuvcoords= compvuvmatrixfcn(rawdata,parameter)
4 %Auslesen der Parameter des Detektors, welche in der struct parameter
5 %gespeichert sind
6 xscale=parameter.xscale;
7 xoffset = parameter.xoffset;
8 yscale = parameter.yscale;
9 yoffset = parameter.yoffset;
10 ascale = parameter.ascale;
11 aoffset = parameter.aoffset;
12 bscale = parameter.bscale;
13 boffset = parameter.boffset;
14 cscale = parameter.cscale;
15 coffset = parameter.coffset;
16 channels= parameter.channels;
17 angle= parameter.angle;
18 %Umrechnung des Winkels der besser vorstellbaren Winkelangabe in Radiant,
19 %da Matlab nur in Radiant rechnet
20 angle= angle/180*pi;
21 %Auslesen der A,B,C Einträge aus den Rohdaten und Skalierung, sowie
22 %Verschiebung der Werte mit Hilfe der aus Parameter bekannten Korrektur-
23 %faktoren
24 data(:,1) = rawdata(:,1)*ascale + aoffset;
25 data(:,2) = rawdata(:,2)*bscale + boffset;
26 data(:,3) = rawdata(:,3)*cscale + coffset;
27 %Berechnung der x- und y-Koordinate aus den A,B,C Koordinaten,
28 %entsprechend den Ausführungen von Andreas Hans in seiner Diplomarbeit
29 %2013
30 xtemp=(data(:,1)./(data(:,1)+data(:,2)+data(:,3)));
31 x=xtemp*xscale-0.5;%+xoffset;
32 ytemp=data(:,2)./(data(:,1)+data(:,2)+data(:,3)));
33 y=ytemp*yscale-0.5;%+yoffset;
34 % x und y Koordinate werden mit Hilfe einer Rotationsmatrix gedreht und
35 % mit Hilfe weiterer Korrekturfaktoren variiert, sowie auf die Anzahl
36 % der Channels projiziert. Die Werte werden hier zu dem nächstgelegenen
37 % Integer gerundet, was dazu führen kann, dass Tupel um einen Pixel nach
38 % oben/unten bzw. links/rechts verschoben werden, was zu leichten Fehlern
39 % in dem Detektorbild führt. Da die Summenrahmen immer ausreichen groß sind
40 % sollten die Effekte im Rahmen bleiben. Es bleibt zu überlegen konsistent
41 % mit den anderen Detektoren zu sein und die Ereignisse alle abzurunden.
42 %führen
43 Xe = round(( x*cos(-angle) - y*sin(-angle) + 0.5 +xoffset)*channels);

```

#### A.4. Bestimmung der Koordinaten für Keil-und-Streifen-Anoden

```
44 Ye = round(( x*sin(-angle) + y*cos(-angle) + 0.5 +yoffset)*channels);
45 %Schreiben der zweispalten Koordinatenmatrix und löschen nicht möglichen
46 %Koordinaten X oder Y sind kleiner als 1 oder größer als die angegebenen
47 %Channels
48 coordinates=[Xe Ye];
49 [row, col]= find( coordinates<1);
50 coordinates=[Xe Ye];
51 [row, col]= find( coordinates>channels);
52 coordinates(row,:)=[];
53 vuvcoords=coordinates;
```

# Selbständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe und ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Zitationen, Tabellen und Bilder aus fremden Quellen sind als solche mit Quellenangaben markiert.

Huda Otto

# Danksagung

Ich habe den Eindruck, dass ich an dieser Stelle ein paar Worte darüber verlieren darf, was ich noch während der Erstellung dieser Arbeit gelernt habe. Ich habe gelernt, dass die Arbeitsgruppe sich glücklich schätzen darf einen Leiter zu haben, der sich für die Mitarbeiter interessiert und sich gleichermaßen ernsthaft mit ihrer fachlichen Qualifizierung befasst. **Prof. Dr. Ehresmann**, ich finde es bemerkenswert, wie engagiert Sie sich für die Forschungsprojekte der Arbeitsgruppe einsetzen und dass Sie auch kreativen Ideen einen Raum bieten. Außerdem habe ich gelernt, mit welcher Hingabe **Dr. André Knie**, die Aufgaben in der Spektroskopie-Arbeitsgruppe organisiert und trotz eines vollen Terminkalenders stets freundlich ist und für jeden ein offenes Ohr hat. Für diese Erfahrungen und für die Betreuung der Arbeit bedanke ich mich bei Ihnen, Prof. Dr. Ehresmann, und bei Dir, André.

Im Büro und im Labor mit **Andreas Hans**, **Philipp Schmidt**, **Christian Ozga** und **Ltaief Ben Ltaief** habe ich gelernt, wie viel Spaß man beim Arbeiten haben kann. Herzlichen Dank für die stets freundliche und hilfsbereite Unterstützung. In der Arbeitsgruppe habe ich gelernt, dass auch in großen und teilweise räumlich getrennten Arbeitsgruppen eine freundliche Atmosphäre herrschen kann. In diesem Sinne bedanke ich mich bei der gesamten Arbeitsgruppe für die gute Atmosphäre.

Dann habe ich gelernt, dass man auch im Alter von 77 Jahren noch Freude daran haben kann Neues zu lernen. An dieser Stelle bedanke ich mich bei meiner Großmutter **Hertha Otto** dafür, dass Sie sich die Proben meines Bachelorvortrages angehört hat. Daran anschließend bedanke ich mich bei meiner Mutter **Christiane Otto**, für die Verbesserungsvorschläge zu diesem Vortrag und Ihre unerbittliche Unterstützung. Ich habe gelernt, dass auch Väter denken, man verhungert auf Messzeit bei BESSY im HELMHOLZ-ZENTRUM BERLIN. Daher danke ich meinem Vater **Aziz Alredda**, für den Proviant und seine schonungslose Fürsorge. Meine Freundin Irina Belenova hat mir gezeigt, wie schwer es ist, neben dem Physik-Studium den eigenen Unterhalt verdienen zu müssen. Daher bin ich voller Dankbarkeit an meine Tante **Sabine Otto** für die finanzielle Unterstützung meines Studiums.

Mein Bruder **Salah Otto** hat mir wiederum gezeigt, dass er mich zum Lachen bringen kann, wie kein Zweiter. Daher bedanke ich mich dafür, dass er mich zum Lachen gebracht hat, wenn ich Mal gezweifelt habe. Außerdem bedanke ich mich herzlich bei meinem Freund **Hannes Rosen**, der mich immer wieder gelehrt hat, dass „nichts so produktiv ist, wie eine Pause“<sup>a</sup> und so für den gesunden Ausgleich, nicht nur, während meiner Bachelorarbeit gesorgt hat. Meine Freundinnen **Mandy Gundlach** und **Irina Belenova** haben mir gezeigt, wie gut es mir tut mit Ihnen zusammen zu sein und zu lernen. Ich danke Ihnen von ganzem Herzen dafür, dass Sie mich während des gesamten Bachelor-Studiums begleitet haben, selbst beim letzten Korrekturlesen.

---

<sup>a</sup>Elizabeth Barrett-Browning (1806-1861)