Sebastian Korff

Wie das Knacken in den Geigerzähler kam

Wissenschaftshistorische Analyse und fachdidaktische Aspekte des Geiger-Müller Zählrohrs

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr. phil. der Universität Flensburg

Betreuer: Prof. Dr. Peter Heering, Flensburg Gutachter: Prof. Dr. Falk Rieß i.R., Oldenburg

Drittgutachterin: Profn. Dr. Gudrun Wolfschmidt, Hamburg

Tag der Disputation: 10.11.2014

Inhaltsverzeichnis

Inhalt	tsverzeichnis	2
Vorw	ort	5
Kapi	tel I	
Über (1. 2.	die Struktur und den Gegenstand dieser Arbeit Die Struktur, oder: Das Ziel dieser Arbeit Der Gegenstand, oder: Physikalische Grundlagen zu Radioaktivität u zum Zählrohr	7 ınd
Kapi	tel II	
Wisse	enschaftshistorische Analyse	33
1.	Der Status quo der wissenschaftshistorischen Forschung	
2.	Walt(h)er Müller	
2.1	Die Jugendjahre	
	Die Studienjahre	
2.3	Die Assistentenjahre	49
2.4	Die Jahre nach Geiger in Deutschland	50
2.5	Die , nach Australien	52
2.6	Das Leben in den Vereinigten Staaten	54
3.	Hans Geiger	56
3.1	Die Jugend- und Studienjahre	5 <i>6</i>
3.2	Geiger & Rutherford	5 <i>6</i>
	Geiger in Berlin an der PTR	
	Geiger in Kiel	
	Geiger in Tübingen	
	Geiger in Berlin an der TH Berlin-Charlottenburg	
4.	Die Analyse der Entwicklung des Elektronenzählrohrs mit dem Ziel	
4.1	Nachbaus	
	Müller und Geiger in Kiel	
	Das Laborbuch als paraphrasierende Informationsquelle	
4.3	Exkurs: Die Zählrohre Plön I und Plön II im Spiegel der Laborbücher und	
1.1	Müllers Korrespondenz Die fünf Publikationen zum Zählrohr	
	Alles nur geklaut? – Hess & Lawson	
	Das Zählrohr unter Plagiatsverdacht. Myssowsky & Nesturch	
	Darstellung der Funktionsweise des Zählrohrs in den fünf Publikationen.	
	Technische Aspekte des Geiger'schen Spitzenzählers	
	Auf der Suche nach einem Zählrohr	
	0 Das Zählrohr Artefakt N-10015	

4.1	1 Die Zählrohr-Generationen	150
4.1	2 Hinweise auf Peripheriegeräte in Primärquellen	154
5.	Der Nachbau und der Nachvollzug	
6.	Interpretationen	179
Kapi	tel III	
Fachd	idaktische Aspekte des Geiger-Müller Zählrohrs	199
1.	Das Zählrohr und Unterricht über Radioaktivität	202
2.	Der Begriff Nature of Science im Kontext des Zählrohrs	210
	Fakt oder Artefakt?	
2.2	Geigers Werk und Müllers Beitrag?	214
3.	Die Fortbildung	218
3.1	Das Konzept	218
3.2	Die Ergebnisse	219
4.	Die empirische Studie	
	Die Randbedingungen und das Forschungsdesign	
	Die Interviewstudie	
	Der Fragebogen	
	Die Analysewerkzeuge	
4.5	Ergebnisse der Studie	
5.	Bewertung, Interpretation und fachdidaktischer Ausblick	242
Kapi	tel IV	
Reflel	ktionen	247
Abbil	dungsverzeichnis	253
Litera	turverzeichnis	259
Anhai	ng	
	A – Transkripte der geführten Interviews	
	B – Rohdaten und Analyse zum Post-Fragebogen	
	, and the second	
	C – INA114 Verstärker	
	D – Redigiertes Quellenmaterial für den Unterricht	
	E – Liste von analysierten Schulbüchern	

Vorwort

Im Jahr 2000 beklagte Falk Rieß:

Identitätsprobleme waren und sind unvermeidlich: PhysikerInnen betrachten uns eher als HistorikerInnen, WissenschaftshistorikerInnen aus anderen Institution schätzen unsere Physikkenntnisse, Didaktiker-KollegInnen bedauern, dass wir unsere interessanten Ansätze nicht empirisch evaluieren. Positiv interpretiert, ist dies der schmale Grat, auf dem sich interdisziplinäre Forschung immer bewegt. Es bleibt jedoch die Gefahr, in vielen Bereichen nur als Dilettant handeln zu können – und auch so angesehen zu werden. (Rieß 2000b, 7)

Knapp 13 Jahre später und im 300km von der Heimstadt der Replikationsmethode Oldenburg entfernten Flensburg, widmet sich ein kleiner Kreis von solchen im Rieß'schen Sinne "mit eine[r] besondere[n] Art von Besessenheit" (Rieß 2000b, 5) infizierten Wissenschaftshistorikern mit einem ausgeprägten Interesse an Physikdidaktik (oder auch: Physikdidaktiker mit einem ausgeprägtem Interesse an Wissenschaftsgeschichte) weiterhin dieser Gradwanderung mit Identitätskrise – mittlerweile in der zweiten Forschungsgeneration. Jüngstes Zeugnis dieser Bemühungen ist die vorliegende Arbeit, die sich im Gegensatz zu dessen Vorgängern explizit mit einem Gegenstand der Wissenschaftsgeschichte, dessen Nutzbarkeit im Physikunterricht sowie mit der Evaluation dieses Unterrichtskonzepts auseinandersetzt. Ob ich mich trotzdem dem Vorwurf des Dilettantismus entziehen kann, sollte der Leser oder die Leserin dieser dreiköpfigen, gebändigten Chimäre selber entscheiden.

Besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinem Doktorvater Peter Heering, der mir von Beginn meiner Promotionsphase im Oktober 2010 und der Auswahl des Themas, über insgesamt sechs nationale und vier internationale Fachvorträge, sieben Vorträge in unserem Arbeitsgruppenkolloquium sowie acht Publikationen und schließlich bis zum letzten Satzzeichen dieser Arbeit im Mai 2014 stets mit viel Rat, Tat und Geduld zur Seite gestanden hat. Falk Rieß möchte ich ganz herzlich für die Zeit und Mühe danken, die er trotz Übernahme seines wohlverdienten Ruhestandes für die der Zweitbegutachtung dieser Arbeit aufbringt. Der Flensburger Doktorierendenbelegschaft Martin Panusch, Timo Engels, Christiane Blum und Paula Paz nach Dienstalter sortiert - möchte ich für die intensiven, hitzigen,

produktiven, teils verregneten oder mit Sonnenschein verwöhnten Kaffeepausen und Wortgefechte meinen herzlichsten Dank ebenso aussprechen, wie meinem Kollegen und ehrenamtlichen Privatdetektiv Andreas Junk, der vermutlich jeden Grammatik-, Satzzeichen- und Satzbaufehler, jeden strukturellen *fauxpas* und jedes inhaltliche Fettnäpfchen in früheren Versionen dieser Arbeit aufgespürt und angeprangert hat. Für die vielen Stunden Arbeit, die wertvollen Bleistift-Ratschläge und Diskussionen schulde ich ihm wohl mehr als ein großes Dankeschön.

Sebastian Korff

Flensburg, im Mai 2014

KAPITEL I

Über die Struktur und den Gegenstand dieser Arbeit

Das Geiger-Müller Zählrohr ist im zweiten Drittel des 20. Jahrhunderts zu einem etablierten und wichtigen Messinstrument der physikalischen Forschung geworden. Daneben hat es auch im zivilen Bereich besonders in der Zeit des Kalten Krieges eine zentrale Rolle bei der Beurteilung von persönlicher Sicherheit im Kontext einer möglichen atomaren Bedrohung in der Zivilbevölkerung gespielt. Nach dem Reaktorunfall im japanischen Fukushima im Frühjahr 2011 flammte das Interesse am Besitz des im Volksmund Geigerzähler genannten Gerätes erneut auf. Die Frankfurter Allgemeine Zeitung titelte kurz nach dem GAU in Fukushima am 23. März 2011 "Geigerzähler ausverkauft". Sogenannte Volks-Geigerzähler veränderten die Wahrnehmung von Radioaktivität und physikalischer Forschung in der Öffentlichkeit der Nachkriegszeit (Abele 2002). Der Begriff Geigerzähler und das charakteristische Knacken lösen auch nach dem Zenit der frühen Radioaktivitäts-, Höhenstrahlungs- und kernphysikalischen Forschung viele Assoziationen auch in nicht naturwissenschaftlich vorgebildeten Teilen der Bevölkerung aus.

Diese Arbeit untersucht die Entstehungs- und Etablierungsgeschichte dieses zunächst Elektronenzählrohr genannten Instrumentes in den Jahren 1928 und 1929. Es handelt sich dabei um die letzten zwei Jahre der gemeinsamen Arbeit von Hans Geiger und Walter Müller, aus denen das später zum Geiger-Müller Zählrohr umgetaufte Messinstrument hervorging. Die Ergebnisse dieser wissenschaftshistorischen Fallstudie werden im zweiten Teil der Arbeit didaktisch bearbeitet und für den Physikunterricht in der Schule nutzbar gemacht.

1. Die Struktur, oder: Das Ziel dieser Arbeit

Im Vergleich zu anderen Arbeiten in der Wissenschaftsgeschichte oder der Physikdidaktik ist diese Arbeit ein Versuch zentrale Aspekte beider Disziplinen gemeinsam in nur einer Arbeit zu bearbeiten. Vorangestellt ist daher eine für beide Teile der Arbeit notwendige fachwissenschaftliche Klärung des physikalischen Konzepts Radioaktivität, von dessen Messung insbesondere mit dem Geiger-Müller Zählrohr sowie eine kurze historische Darstellung von der Erforschung der Radioaktivität in den ersten 20 Jahren nach Becquerels Entdeckung (Kapitel I). Die wissenschaftshistorische Analyse des Geiger-Müller Zählrohrs (Kapitel II) beginnt mit einer Darstellung der aktuellen Forschungslage um Geiger, Müller und deren Zählrohr sowie einer methodischen Einführung zur Replikationsmethode (Abschnitt II.1). Neben einer "klassischen" Quellenexegese mit drei Schwerpunkten (Abschnitte II.2, II.3 und II.4) werden instrumentelle und performative Faktoren des Zählrohrs die zentrale Rolle spielen. Letztere sind Ergebnisse aus der Anwendung der Replikationsmethode. In diesem Kontext wurden Nachbauten von frühen Zählrohren auf Basis der Quellenanalyse angefertigt. Der Prozess des quellengetreuen Nachbaus sowie der Nachvollzug von Messungen mit den Instrumenten werden dabei analysiert (Abschnitt II.5) und reflektiert (Abschnitt II.6)¹.

Der physikdidaktische Teil dieser Arbeit (Kapitel III) untersucht den potentiellen Einsatz der Ergebnisse der wissenschaftshistorischen Studie im Physikunterricht der Sekundarstufe I und II². Im ersten Abschnitt wird die aktuelle fachdidaktische Forschungslage zum Zählrohr und zum Unterricht über Radioaktivität in Beziehung zum historisch-genetischen Unterrichtsverfahren und anderen historisch orientierten Vermittlungsansätzen gesetzt (Abschnitt III.1). Im zweiten Abschnitt wird der Begriff und das Konzept der Nature of Science (NoS) geklärt, dessen Nutzbarkeit für den Physikunterricht im Sinne des Kompetenzmodells erläutert (Abschnitt III.2) und anhand von zwei zentralen Ergebnisse der wissenschaftshistorischen Studie kontextualisiert (Abschnitt III.2.1 und 2.2). Mithilfe dieses Konzepts wurden in einer Fortbildung unterrichtlich nutzbare Episoden durch praktizierende Lehrkräfte ausgearbeitet (Abschnitt III.3). Die Ergebnisse einer zugehörigen Evaluationsstudie sowie deren Diskussion bilden den letzten Abschnitt des dritten Kapitels (Abschnitt III.4)3.

Im letzten Kapitel IV wird die symbiotische Beziehung von wissenschaftshistorischer Analyse (Kapitel II) und fachdidaktischer Wendung (Kapitel III) aus einer Meta-Perspektive dargestellt, analysiert und reflektiert.

¹ Einige Fragmente der wissenschaftshistorischen Analyse sind bereits veröffentlicht: Korff 2011, Korff 2012a, Korff 2013b, Korff 2013b.

² Wann und wie das Zählrohr im Physikunterricht in der Schule gemäß Kerncurricula ein Rolle spielen soll ist auf Länderebene sehr verschieden. Ich beziehe mich auf die (nicht äquivalenten) Vorgaben der Kultusministerien in Schleswig-Holstein (SH) und Niedersachsen (Nds). In aller Kürze: Nds, Sek I und SH, Sek II nein; Nds, Sek II und SH Sek I, ja. Details dazu folgen in Kapitel III an entsprechender Stelle.

³ Einige Aspekte rund um die Nutzbarkeit von *Nature of Science* im Kontext meiner Fallstudie sind bereits veröffentlicht: Korff 2012b, Korff 2013a, Korff 2014a.

2. Der Gegenstand, oder: Physikalische Grundlagen zu Radioaktivität und zum Zählrohr

Die Entwicklungsgeschichte des Geiger-Müller Zählrohrs als Nachweisinstrument für radioaktive Strahlung ist der zentrale Gegenstand dieser Arbeit. Unabhängig davon, welcher Aspekt dieses Gerätes im weiteren Verlauf dieser Arbeit behandelt wird, ist es unumgänglich die aus heutiger Sicht zentralen und für die Arbeit relevanten Stationen der frühen Radioaktivitätsforschung zu kennen. Daneben ist auf Grund der experimentell orientierten Methode und dem fachdidaktischen Anteil dieser Arbeit das Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien der Funktionsweise des Zählrohrs notwendig. Beide Punkte werden im Folgenden geklärt.

Historischer Abriss der frühen Radioaktivitätsforschung

Der Beginn der Forschung zum später Radioaktivität genannten Phänomen liegt am Ende des 19. Jahrhunderts. Als zentrales Ereignis kann man Antoine-Henri Becquerels Entdeckung der natürlichen Radioaktivität von Uran ansehen, die er 1896/7 in mehreren Aufsätzen in den Comptes Rendus de l'Académie des sciences publiziert hat⁴. Es folgten Marie und Pierre Curie, die 1898 gemeinsam mit ihrem Laborassistenten Gustave Bémont⁵ in der gleichen Zeitschrift die Entdeckung von Polonium und Radium bekannt gaben (Curie et al. 1898). Alle drei Elemente sind in dem Mineral Pechblende enthalten. Deren zunächst nicht näher definierte Emission verursachte die Schwärzung von photographischen Platten oder die Ionisierung von Luft in einer Ionisationskammer, die zur Entladung eines angeschlossenen Elektrometers führte. Ionisierung von Luft bedeutet in diesem Kontext, dass die elektrisch neutralen Moleküle der Luft durch den Einfluss von radioaktiver Strahlung Hüllenelektronen abgeben. Das Molekül gibt damit einen Teil seiner negativen Ladungsträger in Form eines oder mehrerer Elektronen ab oder nimmt diese auf. Das Gasmolekül verbleibt dann als

⁴ Becquerel hat mehrere Artikel zu diesem Thema publiziert, die alle in der selben Zeitschrift veröffentlicht wurden, darunter z.B. Becquerel 1896. Anlass für Becquerels Untersuchungen war Röntgens jüngste Publikationen über eine unbekannte Strahlungsart, die verschiedene Salze zur Fluoreszenz anregt. Röntgens Entdeckung der später nach ihm benannten Strahlen 1895 war Ergebnis seiner Bemühungen das sichtbare Spektrum von Kathodenstrahlen näher zu untersuchen. Das Nachleuchten verschiedener Salze in seinem Labor trotz lichtdichter Abschirmung der Kathodenstrahlröhre auf Grund der noch unbekannten (X-) Strahlung wurde dabei von Röntgen als zunächst zweitrangiges, aber dennoch bemerkenswerte Phänomen angesehen. Seine nächsten Untersuchungen widmeten sich daher explizit dieser bisher nicht untersuchten Fluoreszenzerscheinungen, die er bereits nach einmonatiger Forschungsarbeit im Dezember 1895 veröffentlichte (Röntgen 1895, vgl. Simonyi 2004, 380). Für eine hervoragende historische Analyse über den Ursprung der Angst vor Radioaktivität siehe: Weart 1988 und in einer aktualisierten Auflage: Weart 2012.

⁵ Die Nennung des Laborassistenten in einer wissenschaftlichen Publikation zu dieser Zeit ist höchst ungewöhnlich, vgl. Hentschel 2008, 16.

positiv oder negativ geladenes Ion. Rutherford und seine Mitarbeiter an der kanadischen McGill University in Montreal stellten fest, dass diese zunächst Becquerel-Strahlung genannte Emission aus zwei unterschiedlichen Komponenten bestehen musste: die eine Komponente konnte leicht von Materialien absorbiert werden, hatte aber einen starken Ionisationseffekt. Die zweite Komponente hatte eine viel größere Reichweite, aber eine im Vergleich geringere Ionisationsfähigkeit. Dem griechischen Alphabet folgend benannte Rutherford diese beiden Strahlungssorten α - und β -Strahlung auf Grund ihrer unterschiedlichen Durchdringung von Materie. 1900 wies Paul Villard eine dritte Komponente nach, die sich im Vergleich zu den von Rutherford unterschiedenen Strahlungsarten nicht durch Magnetfelder ablenken ließ oder durch Materie abgeschwächt wurde und eine sehr hohe Reichweite hatte. Villard prägte hier die Bezeichnung γ -Strahlung. Um Herauszufinden, ob diese drei Arten von Strahlung eine generelle Eigenschaft von Materie waren, wurden Experimente mit verschiedenen Elementen durchgeführt. Die meisten Experimente dieser Art hat wohl Marie Curie durchgeführt. Neben Thorium, Uran und deren Zerfallsprodukten wurden aber zunächst keine weiteren radioaktiven Elemente gefunden. Ebenfalls im Jahr 1900 zeigte Henri Becquerel, dass sich β -Strahlung nicht nur im Magnetfeld ablenken ließ, sondern dass es sich bei dieser Strahlung auf Grund der spezifischen Ladung um die kurz zuvor von J. J. Thomson postulierten Elektronen handeln musste (Simonyi 2004, 483). 1903 erfolgten dann die spektroskopischen Experimente von Frederic Soddy und William Ramsay, die zeigten, dass es sich bei α -Strahlung um eine Art Helium handeln musste (Ceranski 2013). Im gleichen Jahr veröffentlichen Rutherford und Soddy ihre Theorie über den radioaktiven Zerfall: Im Vergleich zu stabilen Atomen zerfallen radioaktive Atome spontan unter Emission von α - und β -Partikeln. Sie prägten dabei die Begriffe Mutter- und Tochterkerne, um die verschiedenen Zerfallsprodukte und deren Beziehung untereinander zu charakterisieren (Lieb 2003, 667f.). Soddy und Kasimir Fajans stellten 1913 gleichzeitig das noch heute didaktisch viel genutzte radioaktive Verschiebungsgesetz vor, welches α - und β -Zerfall in Bezug auf die Änderung der Masse- und Kernladungszahl im Kontext des Periodensystems erläuterte. Sie führten auch den Begriff des Isotops ein (Fajans 1913, Soddy 1913).

Nach Max von Laues Versuchen zur Beugung von Röntgenstrahlen an Kristallen im Jahr 1912 publizierten Rutherford und Edward Andrade 1914 zwei Aufsätze über ein ähnliches Experiment, mit dem sie die elektromagnetische Natur der γ -Strahlung demonstriert haben (Rutherford & Andrade 1914a, Rutherford & Andrade 1914b). Die mit dem Nobelpreis für Physik von 1917 ausgezeichnete Charakterisierung der Röntgenstrahlen als elektromagnetische Welle zeigte J.J. Thomsons ehemaliger Mitarbeiter Charles Barkla bereits im Jahr 1904 durch deren Polarisationseigenschaften

(Barkla 1904). Die drei unterschiedlichen Kernstrahlungsarten konnten somit anhand ihrer unterschiedlichen Ablenkung in einem homogenen Magnetfeld unterschieden werden (Abbildung 1)6.

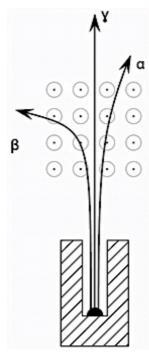


Abbildung 1: Unterscheidungskriterien für α -, β - und γ -Strahlung. Das Magnetfeld tritt aus der Zeichenebene hinaus (nach Simonyi 2004, 484).

Der nun folgende explizit fachphysikalische Teil soll einen kurzen Überblick über die der Radioaktivität zu Grunde liegenden physikalischen Prinzipien und der Funktionsweise eines Geiger-Müller Zählrohrs liefern⁷.

Das Zerfallsgesetz

Alle Zerfallsarten folgen in ihren nicht determinierbaren, aber zeitlichen Abläufen einer Differentialgleichung erster Ordnung. Wir betrachten eine Probe von radioaktivem Material. Abhängig von der Masse und der Art des Radionuklids ist eine bestimmte Anzahl an Atomen in dieser Probe enthalten. Zu einem Zeitpunkt t sind eine festgelegte Anzahl N(t) an instabilen, aber noch nicht zerfallenen Atomkernen vorhanden. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Atomkern unter Emission von radioaktiver Strahlung zerfällt sei λ . Dabei ist diese Zerfallskonstante λ explizit unabhängig von jeglichen äußeren Einflüssen und auch von der Zeit. Zudem beeinflussen einzelne Atome ihren individuellen Zerfall nicht gegenseitig. Die Anzahl der im nächsten

⁶ Für eine wissenschaftshistorische Analyse zur Genese von Rutherfords Klassifikation der drei Strahlungsarten siehe Trenn 1976b.

⁷ Die Nutzung von Fachsprache und mathematischer Formalismen ermöglicht die intendierte Kürze dieser Zusammenfassung auf Basis aktueller Lehrbücher.

Zeitintervall dt zerfallenden Kerne dN(t) ist dann gleich der Anzahl an noch nicht zerfallenden Kernen zum Zeitpunkt t multipliziert mit der negativen Wahrscheinlichkeit eines spontanen Zerfalls λ . Negativ deshalb, weil es sich um eine effektive Abnahme der noch nicht zerfallenen Kerne handelt. Es ergibt sich:

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda \cdot N(t) \stackrel{\text{def}}{=} A(t) \tag{1}$$

Diese Anzahl an Zerfällen pro Zeiteinheit ist die physikalische Größe Aktivität A(t). Sie ist von der Art des radioaktiven Stoffes abhängig. Die Einheit der Aktivität wird zu Ehren von Henri Becquerel mit seinem Namen bezeichnet: Ein Kernzerfall pro Sekunde entspricht 1 *Bq* ⁸.

Bezeichnet N_0 die zum Zeitpunkt t = 0 vorhandene Anzahl an noch nicht zerfallenen Atomkernen, folgt für die zum Zeitpunkt t vorhandenen, noch nicht zerfallenen Atomkerne durch Lösen der Differentialgleichung (1) mit Separationsansatz:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \tag{2}$$

Aus der Zerfallskonstante λ ergeben sich weitere, für einen radioaktiven Stoff charakteristische Größen, wie die Halbwertszeit $t_{1/2}$ und die mittlere Lebensdauer τ . Die Halbwertszeit beschreibt die Zeit nach dessen Ablauf genau 50% aller zum Zeitpunkt t vorhandenen Kerne zerfallen sind:

$$N(t) = \frac{1}{2}N(t) \cdot \exp(-\lambda \cdot t) \Leftrightarrow \frac{\ln(2)}{\lambda} = t \stackrel{\text{def}}{=} t_{1/2}$$
 (3)

Die mittlere Lebensdauer τ bezeichnet den Zeitraum, nachdem N(t) nicht auf 50 %, sondern auf das e^{-1} -fache, also etwa 36,8 % des ursprünglichen Wertes, abgesunken ist. Es ergibt sich analog zur Halbwertszeit folgender Ausdruck:

$$\frac{1}{\lambda} \stackrel{\text{def}}{=} \tau \tag{4}$$

(Halliday et al. 2003, 1266ff.)

Der α-Zerfall

Zerfällt ein Atomkern unter Emission eines α -Partikels, so reduziert sich dessen Kernladungszahl Z und Neutronenzahl N um jeweils 2 und die Massezahl A = Z + N um 4. Ein Heliumkern, bestehend aus 2 Protonen und 2 Neutronen, verlässt den Atomkern. Das so entstehende Tochternuklid Y ergibt sich nach:

$$_{Z}^{A}X_{N} \rightarrow _{Z-2}^{A-4}Y_{N-2} + _{2}^{4}He_{2} + Q$$

Die Gesamtmasse von Tochternuklid und Helium-Kern ist generell kleiner als die des Mutternuklids. Damit sind auch die Massenenergien $E_i = m_i \cdot c^2$ der einzelnen Kerne i unterschiedlich. Die Differenz ist die Zerfallsenergie

⁸ Ein radioaktives Präparat besteht jedoch nicht nur aus einem radioaktiven Stoff, sondern auf Grund von mehreren parallel ablaufenden Zerfallsserien aus einer Vielzahl verschiedenster Stoffe. In der Regel meint A(t) daher die Gesamtaktivität eines Stoffes.

 $Q = E_x - E_y$ und geht auf das α -Teilchen über. Diese Energie ist immer geringer als die der starken Wechselwirkung, die die einzelnen Atome eines Nuklids zusammenhält. Da das α -Teilchen diesen 'Potentialwall' (Abbildung 2) aus einer klassischen Perspektive nicht überwinden kann, lässt sich der α -Zerfall nur quantenmechanisch erklären. Der He-Kern kann dabei den Mutterkern X mit einer nicht unerheblichen Wahrscheinlichkeit durch den Tunneleffekt und unter Energieabgabe Q verlassen.

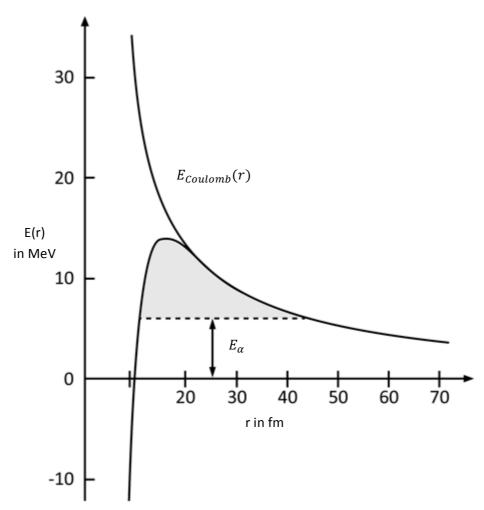


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung einer Einteilchen-Potentialbarriere E(r) in Abhängigkeit zum Abstand r vom Kernmittelpunkt. $E_{Coulomb}(r)$ beschreibt das Coulomb-Potential der elektromagnetischen Wechselwirkung. E_{α} ist die Zerfallsenergie Q, die dem α -Teilchen als kin. Energie zum Verlassen des Kerns zur Verfügung steht. Grau schraffiert ist der energetische Bereich, der aus "klassischer" Sicht von dem α -Teilchen daher nicht überwunden werden (nach:Lieb 2003, 782).

Eine lange Halbwertszeit eines α -Strahlers, wie z.B. U-238 mit $4,5\cdot 10^9$ Jahren, deutet darauf hin, dass der Potentialwall zu breit und damit die Wahrscheinlichkeit für einen Tunneleffekt gering ist (vgl. Halliday et al. 2003,

1270f.). Geiger-Nutall'sche Die Regel liefert den quantitativen Zusammenhang von Halbwertszeit eines α -Strahlers und der Energie E der α -Teilchen in Abhängigkeit von zwei experimentell zu bestimmenden Konstanten A und B (vgl. Grehn & Krause 2007, 506 bzw. Geiger & Nutall 1912a und Geiger & Nutall 1912b):

$$\log t_{1/2} = A \cdot E^{-\frac{1}{2}} + B \tag{5}$$

Nach dem Zerfall verbleibt der Tochterkern unter Umständen in einem angeregten Zustand. Die Energiedifferenz zwischen dem angeregten Zustand und einem niedrigeren Energielevel oder dem Grundzustand steht so nicht als kinetische Energie zur Verfügung. Geht der Tochterkern in seinen Grundzustand über, wird diese Energie in Form von einem oder mehreren y-Quanten abgegeben, deren Energie $E = h \cdot f$ der Differenzenergie der beteiligten Sprünge im Energieniveau entspricht 9 . Ein α -Strahler ist also in der Regel auch ein γ -Strahler. α -Strahlung hat ähnlich wie γ -Strahlung nur diskrete Energieniveaus, aber ist mit etwa 4 bis 9 MeV bei weitem energiereicher als γ -Strahlung mit 0,01 bis 3 MeV ¹⁰.

Der **B-Zerfall**

Ein Nuklid ist ein β -Strahler, wenn er durch einen spontanen Prozess ein Elektron oder Positron aus seinem Kern emittiert. Man differenziert in $\beta^$ und β^+ -Zerfall, bei denen jeweils zusätzlich ein Antineutrino $\bar{\nu}$ bzw. ein Neutrino ν emittiert wird. Ähnlich wie beim α -Zerfall passiert dies mit einer diskreten, kernabhängigen Zerfallsenergie. Durch den Verlust eines Kernelektrons auf Grund der Aufteilung eines Kernneutrons in Proton, Elektron und Antineutrino reduziert sich die Neutronenzahl um 1. Die Kernladungszahl steigt um eins. Beim β^+ -Zerfall bildet sich aus einem Proton ein Neutron. Dabei entsteht neben dem Positron ein Elektron-Neutrino. Es ergibt sich folgendes Termschema:

 ${}_{Z}^{A}X_{N} \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y_{N-1} + \beta^{-} + \bar{\nu} + Q$, bzw. ${}_{Z}^{A}X_{N} \rightarrow {}_{Z-1}^{A}Y_{N+1} + \beta^{+} + \nu + Q$ Durch die ähnlichen und kernabhängigen Annahmen zum β -Zerfall im Vergleich zum α -Zerfall in Bezug auf die Zerfallsenergie Q könnte man auch beim β -Zerfall eine diskrete Energieverteilung erwarten. Experimentell zeigt sich aber eine kontinuierliche Verteilung. Die freiwerdende Zerfallsenergie verteilt sich dabei in einem nicht determinierbaren Verhältnis auf Elektron

und Antineutrino bzw. auf Positron und Neutrino sowie auf den Atomkern¹¹.

 $^{^{9}}$ h ist die Planck-Konstante mit 6,626 · 10⁻³⁴ s und f die Frequenz des zugehörigen Quants. 10 Nach Heinz Helmers: Abstands- und Abschwächungsgesetz für Beta- und Gamma-Strahlung, Skript zum Grundpraktikum, CvO Universität Oldenburg, unveröffentlicht. http://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user_upload/physik/ag/physikpraktika/down load/GPR/Skript_GPR_Physik_SoSe_2013.pdf, letzter Zugriff 13.9.2013.

¹¹ Die kontinuierliche Energieverteilung und die Verletzung der Drehimpulserhaltung veranlassten Wolfgang Pauli 1930 zur Postulierung des Neutrinos, welches das

Verbleibt der Atomkern in einem angeregtem Zustand, kann er über eventuelle Zwischenniveaus in seinen Grundzustand unter Emission von einem oder mehreren γ-Quanten zurückkehren (vgl. Halliday et al. 2003, 1272f.). Ein Positron wird in der Regel kurz nach seiner Entstehung mit seinem Antiteilchen, einem Elektron, annihilieren. Bei diesem Prozess entstehen auf Grund der Impulserhaltung zwei γ -Quanten. Ein β -Strahler ist daher in der Regel auch ein γ -Strahler.

Elektroneneinfang, K-Einfang

Eine Sonderform des β -Zerfalls ist der sogenannte Elektroneneinfang ε . Dabei absorbiert der Atomkern eines seiner Hüllenelektronen aus der K-Schale, bildet zusammen mit einem Proton ein Neutron im Kern und emittiert dabei ein Elektron-Neutrino:

$$^{A}_{Z}X_{N}+e^{-}\rightarrow{}_{Z-1}^{A}Y_{N+1}+\nu+Q$$

Das "Loch' in der K-Schale wird entweder unter Emission einer Röntgenquants oder durch den Auger-Meitner Prozess gefüllt. Bei beiden Vorgängen wechselt ein angeregtes Elektron aus einer höheren Schale in die K-Schale und kann durch die dabei zur Verfügung stehende Energie ein Röntgenquant emittieren oder ein anderes schwach gebundenes Elektron aus der Hülle schlagen. Im Gegensatz zur Röntgenemission handelt es sich bei letzterem also um einen strahlungslosen Übergang. Die Zerfallsenergie Q geht dabei entweder auf das Röntgenquant oder das Auger-Meitner-Elektron über (Lieb 2003, 807f.).

y- und Röntgenstrahlung

 γ -Strahlung ist im Kontext des Kernzerfalls, wie bereits im Kontext des α und β -Zerfalls angedeutet, immer eine sekundäre Strahlung, die durch die Rückkehr von einem extern oder intern angeregten Atom X^* in einen weniger angeregten oder seinen Grundzustand entsteht. Die Anzahl an Protonen und Neutronen im Kern ändert sich dabei nicht. Daher kann man in diesem Fall streng genommen nicht direkt von einem Kernzerfall sprechen.

$${}_{7}^{A}X_{N}^{*} \rightarrow {}_{7}^{A}X_{N} + \gamma$$

Die Energie des γ-Quants ist abhängig vom jeweiligen Radionuklid und diskret verteilt. Die γ -Strahlung ist wie das sichtbare Licht Teil des elektromagnetischen Spektrums im hochfrequenten bzw. kurzwelligen Bereich. Die Wellenlänge λ und Frequenz f von elektromagnetischer Strahlung stehen über die Dispersionsrelation im Zusammenhang mit der Lichtgeschwindigkeit c:

$$c = \lambda \cdot f \tag{6}$$

Energiespektrum erklären konnte sowie den Drehimpulserhaltungssatz erfüllte, vgl. Lieb 2003, 807.

Für die meisten Bereiche des elektromagnetischen Spektrums gibt es vertraute Bezeichnungen, die aber den Bereich der Wellenlänge oder Frequenz nur grob festlegen. So gibt es zum Beispiel keine festgelegte Wellenlänge, bei der ultraviolette Strahlung zu Röntgenstrahlung¹², oder Röntgenstrahlung zu γ -Strahlung wird. Begrenzt sind die Bereiche häufig durch typische Nachweisgeräte oder Strahlungsquellen. Im Gegensatz zu α - und β -Strahlung breiten sich neutral geladenen γ -Quanten mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Wellenlänge λ von γ -Strahlung liegt etwa zwischen 10^{-10} und $10^{-16}m$ und überschneidet sich somit mit dem Bereich der Röntgenstrahlung (Halliday et al. 2003, 968f.; Grehn & Krause 2007, 482). Typische Energien $E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ liegen über 200 keV, wobei das Spektrum nach oben nicht begrenzt ist.

unterscheide zusätzlich zur groben Einteilung durch Spektralbereiche auf Grund der Andersartigkeit der Entstehung zwischen y-Strahlung und Röntgenstrahlung. Röntgenstrahlung wird durch Niveausprünge in der Elektronenhülle und das vorwiegend technisch oder durch Bremsvorgänge von schnellen Elektronen durch das Potentialfeld eines Atomkerns erzeugt, wohingegen die Ursache von γ-Strahlung im Atomkern zu suchen ist. Daher sind die auftretenden Energien von γ-Strahlung in der Regel wesentlich höher als die von Röntgenstrahlung.

Abstands- und Abschwächungsgesetz

Nachweisgeräte für radioaktive Strahlung, wie Ionisationskammern, Nebelund Blasenkammern, das Geiger-Müller Zählrohr oder auch Halbleiterzähler, nutzen die Wechselwirkung von ionisierender Strahlung mit Materie. Im Fall von radioaktiven Teilchen, also der α - und β - Strahlung, führen die geladenen Teilchen entweder Stöße mit Atomen oder Molekülen aus oder Wechselwirken auf Grund ihrer elektrischen Felder miteinander beim Durchgang durch Materie. Dabei spielen Ladung und Energie der Teilchen die Beschaffenheit des zu durchdringenden Materials wesentlichsten Rollen: Je höher die Ladung und die Energie eines radioaktives Teilchens, desto stärker tritt es in Wechselwirkung mit Materie. Je langsamer ein α -Teilchen ist, desto mehr Energie kann es abgeben. Auf Grund der vergleichsweise großen Querschnittsfläche eines α -Teilchens kann es aber nicht sehr tief in Materie eindringen bevor es gänzlich absorbiert wird. Bei Luft unter Normaldruck reichen bereits wenige cm Wegstrecke für den Absorptionsprozess aus. β -Strahlung besteht aus einzelnen freien Elektronen mit konstanter Masse und Ladung. Die auftretenden kinetischen

 $^{^{12}}$ Anfänglich wurden die X-Strahlen oft durch das griechische χ (Chi) abgekürzt. Röntgen verwendete explizit das X um den unbekannten und neuartigen Charakter dieser Strahlung zu verdeutlichen. Im angelsächsischen Raum hat sich die Bezeichnung "X-Ray" gehalten.

Energien sind kontinuierlich verteilt und geringer als die der α -Teilchen. Für die Absorption von Elektronen in Materie ist ebenfalls deren elektromagnetische Wechselwirkung mit der Atomhülle verantwortlich. Auf Grund des deutlich geringeren Wirkungsquerschnitts im Vergleich zum α -Teilchen wird es abgebremst und stärker aus seiner Bahn abgelenkt. Die Abbremsung führt zur Emission eines Röntgenquants, dessen Energie der des Abbremsvorgangs entspricht. Außerdem können elastische und unelastische Stöße mit Atomen des Absorbtionsmaterials erfolgen. Zumindest bei letzterem wird ein Teil der kinetischen Energie der β -Strahlung an den Atomkern oder an die Elektronenhülle des Materials abgegeben. Die genauen Prozesse der Energieabgabe sind stark von der Kernladungszahl des Materials abhängig.

Für die Abschwächung von γ -Strahlung durch Materie gilt das exponentielle Abschwächungsgesetz für elektromagnetische Wellen, welches nur von Abschwächungskoeffizienten μ und der Dicke des Materials abhängig ist. Es gilt:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x) \tag{7}$$

Der Abschwächungskoeffizienten μ ist eine materialabhängige Konstante und ist die Summe aus drei einzelnen Energieabsorptionskoeffizienten für den Photoeffekt, den Compton Effekt und den Paarerzeugungseffekt, deren Anteile von der Energie der monoenergetischen γ -Strahlung abhängt (Abbildung 3 und Abbildung 4).

Die exponentielle Charakteristik der Abschwächung von γ -Strahlung führt dazu, dass die Strahlung niemals zu 100% absorbiert werden kann, aber auf eine genügend kleine Intensität von <1% reduziert werden kann. Die Wechselwirkung von Materie mit der elektrisch neutralen γ -Strahlung ist aber im Vergleich zur Wechselwirkung mit den geladenen α - oder β -Teilchen geringer (vgl. Grehn & Krause 2007, 490ff.).

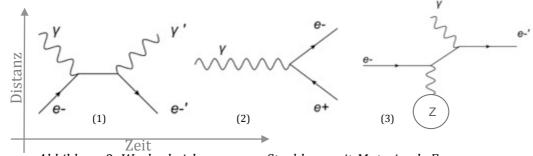


Abbildung 3: Wechselwirkung von γ -Strahlung mit Materie als Feynman-Diagramme. Dargestellt sind der Compton Effekt (1), der Paarerzeugungseffekt (2) und der Photoeffekt (3). e-: Elektron, e+:Positron, Z: Atomkern. (1) und (2) nach Schmüser 1995, 46.

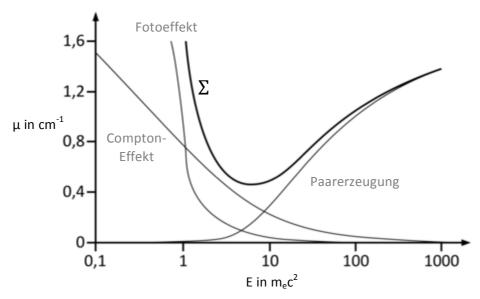


Abbildung 4: Der Absorptionskoeffizient μ von Blei als Funktion der Energie E von Elektronen. Dargestellt sind die Anteile des Compton-Effektes, des Fotoeffektes und der Paarerzeugung sowie die Summe aller drei Wechselwirkungsprozesse (nach Grehn & Krause 2007, 492).

Die Funktion des Geiger-Müller Zählrohrs

Da keines der menschlichen Sinnesorgane für radioaktive Strahlung empfindlich ist, müssen zur Untersuchung dieses Phänomens Instrumente genutzt werden, die jeweils sekundäre Prozesse registrieren, für die radioaktive Strahlung verantwortlich gemacht werden kann. Neben einfachen Spinthariskopen, Ionisationskammern und Diffusions- bzw. Expansionsnebelkammern ist das Geiger-Müller Zählrohr eines der vielseitigsten Geräte für diesen Zweck. Es konnte als erstes Instrument alle drei Strahlungsarten auf Grund von deren Wechselwirkung vergleichbar nachweisen. In diesem Abschnitt sollen daher die physikalischen Grundlagen geklärt werden nach denen die Funktion des Zählrohrs erklärt werden kann. In der Regel werden die folgenden Darstellungen rein qualitativer Natur sein, da eine Modellierung der Funktionsweise mit exemplarischen Daten zu viele Annahmen und Mutmaßungen über Wahrscheinlichkeiten verlangt, die in ihrer Anzahl eine übersichtliche Darstellung der Funktion unmöglich macht. Eine stringente Darstellung von der Anfangsenergie von einstrahlenden γ -Strahlung, über die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen, deren Stoßwahrscheinlichkeit mit Gasmolekülen, die jeweils auch eine bestimmte kinetische Energie besitzen, bis hin zu einem Wert für die Stromfluss zwischen Gehäusekathode und Drahtanode ist im Kontext dieser Arbeit nicht erstrebenswert.

Primär beruht die Funktion eines Geiger-Müller Zählrohrs auf dem Prinzip der sogenannten Gasverstärkung. Heutige, handelsübliche Zählrohre sind in der Regel wenige cm lang, haben ein für radioaktive Strahlung durchlässiges Glimmerfenster und sind Teil von komplexen, aber dennoch handlichen, mobilen Messgeräten¹³. Zählrohre von Lehrmittelfirmen, wie *Phywe* oder *Leybold didactic*, haben ein deutlich größeres Volumen und externe Zählgeräte. Daher sind sie für Anschauungszwecke im schulischen Physikunterricht eher geeignet als ihre zivilen Pendants. Der Zählrohr Prototyp von 1928 ist technisch gesehen ein mit Luft unter geringem Druck gefüllter axialsymmetrischer Kondensator und im Vergleich zu heutiger Bauweise ohne Glimmer-Endfenster (Abbildung 5).

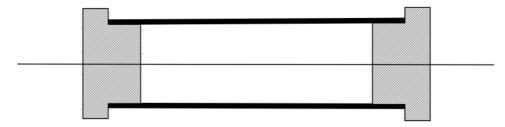


Abbildung 5: Längsschnitt des komplett geschlossenen Zählrohr Prototypen von 1928.

Auslösung von sekundären (δ-) Elektronen

Das Instrument kann in dieser rudimentären Bauform und mit entsprechender Wandung und Gehäusematerial die Passage von β -Teilchen sowie durch Sekundäreffekte auch die von γ -Strahlung feststellen. Mit einem Glimmerfenster können zusätzlich α -Teilchen registriert werden. Zwischen Gehäuse und Zähldraht liegt eine hohe Spannung zwischen 400 und 1400 Volt an, die je nach Gasfüllung und -druck unterschiedlich ist. Die Anzahl der Passagen von radioaktiver Strahlung kann durch einen Spannungsabfall im elektrischen Feld zwischen Draht und Gehäuse elektrisch gezählt werden. Diese Zählung passiert durch einen im Gas entstehenden Verstärkungseffekt, der sogenannten Entladungslawine. Am Anfang dieser Lawine steht entweder ein α -Teilchen in Form eines doppelt positiv geladenen Helium-Kerns¹⁴ oder ein β -Teilchen, die durch ein Glimmerfenster Gehäuseinnere gelangen oder ein durch ein β -Teilchen oder durch γ -Strahlung ausgelöstes δ -Elektron. Dieses Elektron wird durch inelastische Stöße mit den β -Teilchen oder γ -Quanten aus der Hülle von Atomen im Gehäuse oder Zählgas ausgelöst und besitzt genügend kinetische Energie, um weitere Ionisierungsprozesse zu initiieren. Abzüglich einer für das

 14 α -Teilchen können zwar das Gehäuse Material ionisieren, dieses aber nicht durchdringen und ins Innere gelangen. Das ist nur durch den Einbau eines Glimmerfensters möglich, dessen Funktion später in diesem Abschnitt erläutert wird.

 $^{^{\}rm 13}$ Ein Beispiel dafür findet man auf http://www.gamma-scout.com/DE/Home.php (14.04.2014).

charakteristischen Gehäusemetall Auslösearbeit¹⁵ oder einer überwindenden Ionisierungsenergie der Hüllenelektronen geht dabei ein nicht determinierbarer Anteil der Energie des Quants $E_{\nu}=h\cdot \nu$ auf das δ -Elektron über. Geschieht diese Wechselwirkung in genügender Nähe zur Innenseite des Gehäuses kann ein δ -Elektron in das leicht evakuierte Innere des Zählrohrs gelangen. Eine ähnliche Energiebilanz gilt auch für das β -Teilchen. Dessen kinetische Energie nimmt nach der Bethe-Gleichung pro durchquertes Wegelement in Abhängigkeit verschiedener, materialabhängiger Parameter exponentiell ab. Je nach Einfallswinkel, kinetischer Energie und Festkörpermaterial kann ein β -Teilchen ein oder mehrere Elektronen aus dem Metallverbund auslösen (Demtröder 1996, 32f.). Diese Anzahl heißt Sekundäremissionskoeffizient und liegt im Fall von Kupfer bei maximal 1,3 Sekundärelektronen pro einfallendes Elektron (Czichos & Hennecke 2007, 174).

Das freie Elektron im Zähler

Dieses nun auf eine der zwei Arten ausgelöste, sekundäre Elektron besitzt eine gewisse Anfangsenergie E_{kin} und –geschwindigkeit v_0 und befindet sich am äußersten Ende des elektrischen Felds des Zählrohrs. Zwischen Gehäuse und Draht liegt (im Fall des Prototypen) eine Potentialdifferenz U von etwa 1200V an. Das elektrische Feld beschleunigt das freie Elektron in Richtung des positiv geladenen Drahtes. Die Feldstärke E verhält sich dabei, wie die eines Zylinderkondensators nach $E(r) = U \cdot \left[r \cdot \ln\left(\frac{r_K}{r_A}\right)\right]^{-1}$. Dabei beschreiben die indizierten Radien r den Radius des Drahtes und den inneren Radius des Zählrohrs – quasi Anode (A) und Kathode (K) des Kondensators. Es handelt sich um ein radialsymmetrisches Feld, dessen Gradient mit $1/r^2$ zum Draht hin zunimmt. Je näher das freie Elektron am Draht ist, desto höher ist demnach die Feldstärke E und die wirkende Kraft F zwischen Elektron und Draht: $E = \frac{F}{Q}$. Das Elektron mit Ladung $Q = e_0$ und Masse m_e wird auf Grund der zunehmenden Kraft $F=m_e\cdot a$ immer stärker beschleunigt. Dabei nimmt das Elektron eine elektrische Energie von maximal $E_{el} = e_0 \cdot U$ auf und wandelt sie in kinetische Energie um. Die zugehörige Geschwindigkeit steigt so bei zunehmender Beschleunigung und kleiner werdendem Abstand zum zentralen Draht stark exponentiell an. Im mathematischen Modell handelt es sich bei diesem Zusammenhang um eine nicht-lineare Differentialgleichung 2. Ordnung, für die man in diesem speziellen Fall keine analytische, sondern nur eine numerische Lösung finden kann¹⁶. Sie setzt sich aus den beiden

 $^{^{15}}$ Die Zählrohre von Geiger und Müller waren vorwiegend aus der Kupfer-Zink Legierung Messing. Die Auslösearbeit W_A für Kupfer liegt bei 4,3 bis 4,5 eV; die von Zink liegt bei 4,3 eV. 16 Generell sind nicht lineare, homogene DGLs 2. Ordnung natürlich auch analytisch lösbar, aber in diesem Fall wird die Gleichung dadurch unlösbar, da nicht die Ortsfunktion, sondern

Termen für die Feldstärke und dem Kraft-Beschleunigungsterm zusammen. Die Beschleunigung a ist hier ausgedrückt durch die zweite Ableitung der Ortsfunktion r(t).

$$r\ddot{(t)} = \frac{e_0}{m_e} \cdot \frac{U}{r(t) \cdot \ln(\frac{r_K}{r_A})} \iff r\ddot{(t)} - \frac{\omega}{r(t)} = 0, \tag{8}$$

wobei ω das Produkt aller konstanten Parameter ist.

Das Elektron würde auf Grund der Teilchendichte des Füllgases innerhalb des Zählrohrs bei Normaldruck nicht ungehindert bis zum Draht beschleunigen können. Es würde durch elastische Stöße mit Gasmolekülen immer wieder am Vorankommen gehindert werden und dabei Energie und Geschwindigkeit einbüßen. Im Vergleich zum Normaldruck ist die Teilchendichte bei Unterdruck jedoch geringer. Beim Geiger-Müller Zählrohr bewegt man sich hier in Größenordnungen von etwa 15 bis 100mbar – also etwa ein Zehntel und weniger des Normaldrucks. Reduziert man den Druck in den genannten Bereich, so vergrößert sich die mittlere freie Weglänge von 65nm bei Normaldruck von 1013mbar, 20 °C und trockener Luft auf 6,5µm bei 10,13mbar Druck (Jennings 1988). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein freies Elektron auf seinem Weg vom Gehäuse bis zum Draht von einem Gasmolekül am Vorankommen gehindert wird, ist bei Unterdruck somit viel geringer, da es mit deutlich weniger Molekülen in energetische Wechselwirkung treten kann. Ist die zur Verfügung stehende Beschleunigungsstrecke groß genug, kann die kinetische Energie des freien Elektrons auf ein Maß anwachsen, welches dann die Ionisation durch Stoß mit anderen noch verbliebenen Gasmolekülen ermöglicht¹⁷. Der Ionisationsprozess kann dann entweder wenigen inelastischen Stößen mit Gasmolekülen oder entsprechender Anfangsenergie direkt beim ersten Kontakt durch einen unelastischen Stoß ionisieren. Die notwendigen ersten Ionisierungsenergien beträgt für Stickstoff 14,5eV, für Sauerstoff 13,6eV und für Argon 15,8eV. Das Elektron hinterlässt einen einfach initiierende positiv Molekülrumpf¹⁸ ausgelöste das Elektron mit jeweils

dessen reziproke Funktion Teil der DGL ist. Die genaue oder durch numerische Methoden angenäherte Lösung ist aber für das qualitative Verständnis der Funktionsweise des Zählrohrs unerheblich.

¹⁷ Dabei spielt die Gasart - bzw. die Ionisationsenergie der einzelnen Gasmoleküle ebenfalls Rolle. Je kleiner die Masse der Moleküle, desto heterogener ist die Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle. Der Anteil an schnellen Molekülen ist bei ,leichten' Gasen, wie H2 und He entsprechend der Maxwell-Boltzmann Verteilung höher. Bei Helium beträgt die mittlere Geschwindigkeit beispielsweise 1256 m/s, wohingegen N₂ mit 475 m/s oder CO₂ mit 284 m/s im Mittel bei 25°C deutlich langsamer sind (Atkins 1990, 665). Weiteren Einfluss auf die Zusammenstoßwahrscheinlichkeit von Elektron mit Gasmolekül hat natürlich noch der Stoßquerschnitt, der mit der Molekülgröße wächst (vgl. Atkins 1990, 658ff.).

¹⁸ Die Möglichkeit der doppelten oder dreifachen Ionisierung, also dem Auslösen von mehr als einem Elektron aus der Hülle, besteht bei entsprechender Energie des δ -Elektron natürlich auch.

vorhersagbaren Anfangsenergien. Der positiv geladene Rumpf wird vom elektrischen Feld zur Gehäusewand und das erzeugte Ion zusammen mit dem Initial-Elektron zum Draht beschleunigt.

Die Entladungslawine

Die zweite Generation an Ionen kann ebenfalls ausreichend Energie aus dem elektrischen Feld beziehen, sodass weitere sekundäre, tertiäre, quartäre,... Ionisierungsprozesse stattfinden können. Je näher sich die Elektronen dabei am Draht befinden, desto stärker ist deren Beschleunigung und der damit verbundene Energiezuwachs. Befinden sie sich nach Auslösung in der "Lawinen-Zone" nahe dem Draht, reicht eine Strecke kleiner oder gleich der mittleren freien Weglänge aus, um die notwendige Ionisierungsenergie zu erreichen. Der nächste Stoß mit einem Gasmolekül bremst dann nicht das Elektron, sondern führt sofort zu einer Ionisierung. Die dadurch direkt in der Lawinen-Zone entstehende nächste Generationen an Elektronen kann dann ebenfalls bei deren nächsten Stößen mit Molekülen direkt eine Ionisation verursachen. Die Anzahl an Elektronen steigt somit mit maximal 2^n rapide exponentiell an, wobei n die Anzahl der Generationen sind. 2^n ist dabei nur die Obergrenze, da eine gewisse Anzahl an freien Elektronen wieder mit Molekülrümpfen rekombinieren wird. Die bei jeder Rekombination abgegebene Energie wird dabei in Form eines Photons, als Gitterschwingung oder als Dissoziationsenergie wieder umgesetzt.

Die Ionisierungsprozesse verstärken sich kaskadenartig bis der Strom im Gas groß genug ist, um die Spannung und damit auch das elektrische Feld zwischen Gehäuse und Draht zusammenbrechen zu lassen. Die Raumladungszonen um den Draht und die Gehäusewand wachsen, was man als virtuelle Vergrößerung des Drahtradius' bzw. Verkleinerung des Gehäuseradius' ansehen kann. Die Feldstärke verringert sich somit drastisch. Dieser 'Quasi-Kurzschluss' wird durch einen in Reihe geschalteten, geerdeten und absichtlich sehr groß gewählten Widerstand unterbrochen. Das Zählrohr entlädt sich dabei so schnell, dass die Wiederaufladung über den großen Widerstand nicht nachfolgen kann. Die Spannung fällt dann kurzzeitig über diesem Widerstand ab und die Entladung wird gelöscht. Die Spannung liegt danach wieder am Zählrohr an und lädt die Kapazität wieder voll auf bis ein neues durch radioaktive Strahlung erzeugtes Ion eine neue Entladungslawine zündet.

Die Totzeit

Die Zeit, die für diesen gesamten Prozess vom Zusammenbruch des Feldes bis zur vollständigen Wiederaufladung des Kondensators benötigt wird, nennt man Totzeit. Diese wird maßgeblich vom Wert des in Reihe geschalteten Arbeitswiderstandes und der Kapazität des Zählrohrs bestimmt, da diese zusammen ein RC-Glied bilden. Die Kapazität des Zählrohr-Prototypen¹⁹ beträgt nach geometrischer Berechnung etwa 1,1 pF. Bei einem Arbeitswiderstand von 1 $G\Omega$ benötigt das Zählrohr somit etwa $\tau = R \cdot C = 1,1$ ms, um sich auf 36,8% zu laden bzw. zu entladen. In einer Zeitspanne von etwa 5 τ (\approx 99% Aufladung) ist das Zählrohr ,tot', also für weitere Zählereignisse nicht empfänglich. Eine rudimentäre Schaltung, welche die Aufgabe der elektrischen Registrierung der ionisierenden Teilchen erfüllt, sieht man in Abbildung 6 20 .

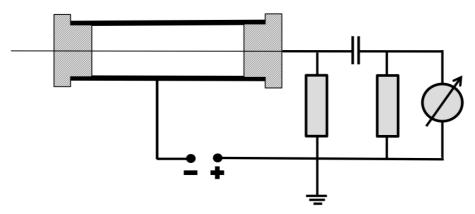


Abbildung 6: einfache Registrierungsschaltung für ein selbstlöschendes Zählrohr. Einer Skizze von Geiger nachempfunden²¹. Widerstände jeweils 1 $\mathbf{G}\Omega$, Kondensator im pF-Bereich.

Der kurzzeitige Stromfluss durch den Arbeitswiderstand resultiert in einen messbaren Spannungsabfall mit einer Amplitude von mehreren Volt. 1928 geschah die Registrierung des kurzzeitigen Spannungsabfalls am Arbeitswiderstand bzw. die Zählung dieser Spannungsimpulse über ein durch einen weiteren Kondensator entkoppeltes Fadenelektrometer. Der 'zweite' Kondensator sorgt zusätzlich dafür, dass nur die Spannungsflanke des Zählereignisses das Fadenelektrometer erreicht. Der Gleichspannungsanteil des Signals wird herausgefiltert.

Moderne Zählrohre

Moderne Zählrohre sind in der Regel mit Argon gefüllt. Dieses Edelgas hat einerseits den Vorteil, dass es günstig und leicht zu beschaffen ist und

 $^{^{19}}$ Wirksame Länge des Zählrohrs 8cm, Radius des Zählrohrs 1cm, Drahtradius 0,15mm, Permittivität ϵ von Luft im Vakuum angenommen.

²⁰ Bei modernen Zählrohren wird dieses Spannungssignal durch komplexe Schaltungen uniformiert, damit eine einfache Zählung der Impulse möglich wird. Die ungleichen Spannungsflanken des Zählrohres werden hinsichtlich Amplitude, Signaldauer und -form vereinheitlicht.

²¹ nach: Briefwechsel Geiger - Behnken, 11.11.1928, Archiv der PTB Braunschweig, Akte 758.2.

andererseits, dass die Einsatzspannung für den Zählrohr-Betrieb je nach Druck etwa die Hälfte im Vergleich zu der von Luft ist (siehe Abbildung 7) ²².

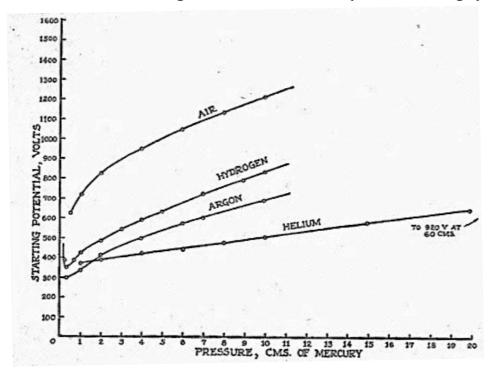


Abbildung 7: Einsatzspannung für den Geiger-Müller Zählbetrieb für Luft, Wasserstoff, Argon und Helium (je 99% rein) bei verschiedenen Drucken und einem Zählrohr mit 1cm Durchmesser und einem Draht mit 3mm Durchmesser. Der übliche Druck im Zählrohr beträgt zwischen 7 und 20 cmHg, also etwa 93 bis 26mbar (Korff 1947, 46) ²³.

Der Entladungsprozess mit einem Argon-Alkohol Gemisch ist im Prinzip dem für reine Luft ähnlich. Die erste Ionisierungsenergie des Edelgases Argon mit 15,7 eV ist im Vergleich zu Sauer- und Stickstoff etwas höher. Der mehratomige Alkohol kann im Zählrohr durch Elektronen nur schwer ionisiert werden. Die Alkoholmoleküle erhalten durch Stöße mit Elektronen vorwiegend höhere Rotations- und Schwingungsenergien. Zudem haben mehratomige Moleküle breite Absorptionsbanden im UV-Bereich, die bei entsprechendem Anteil am Gesamtgasvolumen eine Wechselwirkung von sekundären Photonen mit dem Gehäusematerial weitestgehend verhindern. Wenn das Löschgas eine niedrigere Ionisationsenergie als die

²² Helium hat laut der beschriebenen Abbildung noch geringe Zählspannungen und einen deutlich lineareren Verlauf im Vergleich zu Argon. Zudem wird es auch damals wie heute in ähnlicher Weise leicht und günstig zu beschaffen gewesen sein. Die erste Ionisierungsenergie von Helium ist aber mit 24,6 eV deutlich höher als die von Gasmolekülen der Luft und damit für den Einsatz als Zählgas eher ungeeignet. Ob Geiger, Müller und andere ähnliche Überlegungen gehabt haben, konnte ich anhand der zur Verfügung stehenden Quellen nicht nachvollziehen.

²³ Auch nach intensiven Bemühungen konnte der Rechteinhaber für diese Abbildung nicht ausfindig gemacht werden. Falls ich Urheber- oder Nutzungsrechte mit dem Abdruck dieser Abbildung verletzt haben sollte, bitte ich um Entschuldigung und entsprechende Nachricht.

Grundgasfüllung hat, können in dem hier beschriebenen Fall die Argon-Ionen ihre Ladung an das Alkoholgas übergeben. Nach kurzer Zeit überwiegt dann die Menge an Alkohol-Ionen, die sich an der Gehäusewand neutralisieren. Die dabei freigesetzte Energie führt zur Dissoziation der Moleküle und nicht zur Auslösung weiterer Elektronen (vgl. Kment & Kuhn 1953, 3ff.).

Selbstlöschende Entladung

Auf Grund der internen Unterdrückung einer zweiten Generation von Gehäuseelektronen reißt die Entladung selbstständig ab, ohne dass dies extern durch einen hohen Widerstand oder eine auf Röhren oder Transistoren basierte Lösch-Schaltung passieren muss. Damit dennoch die Spannungsamplitude in einem angenehm messbaren Bereich bleibt, wird der Arbeitswiderstand nur auf etwa 1 $M\Omega$ reduziert. Die Zeitkonstante und damit auch die Totzeit werden dadurch ebenfalls stark verkleinert. Nachteil dieser Art von selbstlöschenden Zählrohren ist ihre Lebensdauer, da bei jedem Zählimpuls eine gewisse Anzahl an Löschgas-Moleküle dissoziiert. Die Molekül-Bruchstücke besitzen dann keine Löschfähigkeit mehr und setzen sich sogar im schlimmsten Fall auf Gehäuse oder Draht ab, wodurch ungewollte Spitzenentladungen begünstigt werden²⁴. Halogene, wie Chlor und Brom können ebenfalls als Löschgase eingesetzt werden. Dissoziiert eines dieser Moleküle in einzelne Atome, gehen diese nach kurzer Zeit eine neutrale Bindung mit anderen Halogen Atomen ein. Die Lebensdauer ist dann praktisch unbegrenzt, wenn die Zählrohrmaterialien gegenüber den Halogenen widerstandsfähig genug sind.

Das Glimmerfenster

Neben dem Löschgas findet man in modernen Zählrohren zusätzlich ein Glimmerfenster. Auch in Müllers Laborbüchern findet man recht früh einen Eintrag, dass er den Zählrohr Prototypen nachträglich mit einem Glimmerfenster ausgestattet hat. Wo genau das Fenster positioniert war, ist nicht dokumentiert. Die im Deutschen Museum ausgestellten Artefakte von Zählrohren aus den frühen 1930iger Jahren aus Geigers Werkstatt in Tübingen haben ihre Glimmerfenster in der Mantelfläche. Moderne Endfensterzählrohre haben ihr Glimmerfenster an einer der Stirnseiten (Abbildung 8).

 $^{^{24}}$ Die durchschnittliche Lebensdauer eines Zählrohrs beträgt in diesem Fall dann bis zu 10^9 Impulse, vgl. Kment & Kuhn 1953, 9.

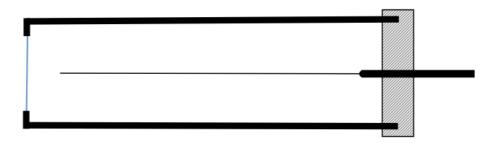


Abbildung 8: Längsschnitt eines modernen Endfensterzählrohrs.

Das nur wenige Mikrometer dünne Glimmerfenster erlaubt neben der Zählung von β -Teilchen und γ -Strahlung auch die von α -Teilchen. Letztere können wegen ihrer hohen Wechselwirkung mit dem Metallgehäuse jenes nicht durchdringen, aber das Mineral Glimmer. Das Material lässt sich in sehr dünnen Blättchen von seinem Mutterkristall ablösen. Die Absorptionsverluste beim Durchgang von α -, β - und γ -Strahlung sind von der jeweiligen Energie und der Dicke des Glimmerfensters abhängig (Abbildung 9, Abbildung 10).

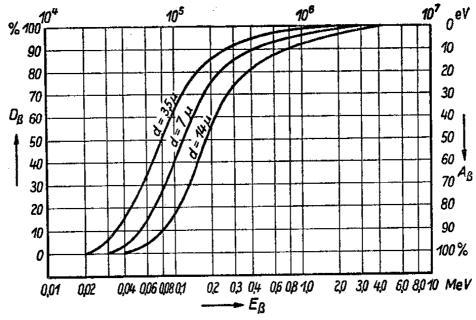


Abbildung 9: Durchlässigkeit D und Absorption A von Glimmer für drei verschiedene Dicken d für monoenergetische β -Strahlung in Abhängigkeit von dessen Energie E (aus Kment & Kuhn 1953, 11) 25 .

²⁵ Siehe Fußnote 23. Für Abbildung 10, Abbildung 11 und Abbildung 12 entsprechend.

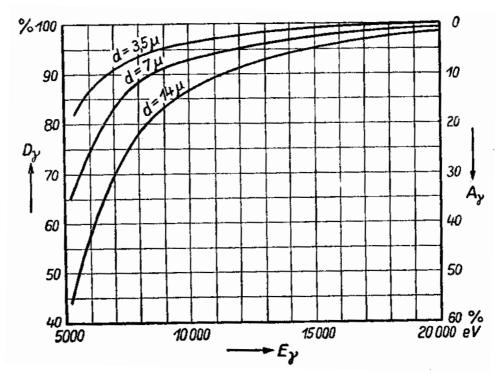


Abbildung 10: Durchlässigkeit D und Absorption A von Glimmer für drei verschiedene Dicken d für γ -Strahlung in Abhängigkeit von dessen Energie E (aus Kment & Kuhn 1953, 12).

Im Vergleich dazu waren die Goldfolien, die Geiger und Marsden für ihre im Juli 1912 beendeten Streuungsexperimente von α -Strahlung verwendet haben und die wenige Jahre später als der zentrale experimentelle Beleg für Rutherfords Atommodell fungierten, laut Rutherford jeweils "about 0.00004 cm" (Rutherford 1911, 669) stark, also mit 0,4 μ m eine Größenordnung dünner als übliche Glimmerfenster²⁶. Man kann aber erwarten, dass Metall auf Grund seiner Festkörperstruktur im Vergleich zu der kristallinen Gitterstruktur von Glimmer bei gleicher Dicke deutlich mehr α -Strahlung absorbiert.

Zählraten und Gasverstärkung

Die Ladungsmenge von jedem radioaktiven Teilchen, dass entweder direkt oder durch Sekundärprozesse in das Innere eines Zählrohrs eintritt, wird durch weitere darauffolgende Stoßionisationen exponentiell verstärkt. Wie groß diese Verstärkung ist, hängt im Wesentlichen von der Feldstärke und der am Gehäuse anliegenden Spannung U ab. Je höher die Spannung, desto höher die Feldstärke und damit auch die Anzahl an Ionen, die im Gas durch

²⁶ Es kann aber davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um eine verkürzte Darstellung handelt und mehrere Goldfolien unterschiedlicher Dicke in den über drei Jahre andauernden Experimenten verwendet wurden. Für eine wissenschaftshistorische Analyse dieser Experimente siehe Trenn 1974.

Stoßprozesse erzeugt werden. Je mehr Ionen, desto größer der Strom, der vom Draht über den Arbeitswiderstand abfließen kann. Je größer dieser Strom ist, desto höher ist die nach dem Ohm'schen Gesetz am Widerstand abfallende Spannung U_R . Abbildung 11 zeigt die Abhängigkeit dieser Spannungsamplitude zur Zählrohrspannung im Kontext der Gasverstärkung durch die primäre Ionisation von α - und β -Strahlung.

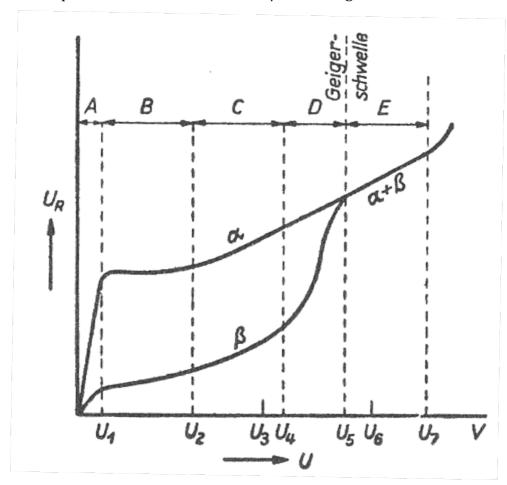


Abbildung 11: Spannungsamplitude U_R am Arbeitswiderstand in qualitativer Abhängigkeit zur Zählrohrspannung U für α - und β -Strahlung (aus Kment & Kuhn 1953, 2).

Die Bereiche A und B zeigen die charakteristischen Spannungsamplituden bei Ionisationskammern. Anhand der deutlich verschiedenen Amplituden können α - und β -Strahlung voneinander unterschieden werden. Bereich A beschreibt dabei die sogenannte ungesättigte Ionisation, da die Geschwindigkeit der Ionen so klein ist, das Rekombinationen zu neutralen Molekülen gehäuft auftreten. Im Bereich B wird der Anteil dieser Ionen vernachlässigbar klein. Die Ionen-Geschwindigkeit ist so groß, dass die Amplitude des Spannungsimpulses der Anzahl der primär erzeugten Ionenpaare entspricht. Sekundäre Ionisation, d.h. ein Strom-verstärkender Effekt finden erst im Bereich C statt. Die Geschwindigkeit der primär

erzeugten Ionen ist nun so groß, dass sie selbst Gasmoleküle durch Stoß ionisieren können. Der so erzielbare Spannungsimpuls ist höher als in den vorigen Bereichen, aber nur noch proportional zur Anzahl der durch die Primärionisation der radioaktiven Teilchen erzeugten Ionen. Auf Grund der doppelten Ladung der α -Teilchen im Vergleich zu den β -Teilchen und der Proportionalität der Spannungsamplitude U_R zur Primärionisation lassen sich beide Strahlungsarten noch unterscheiden. Zählrohre Ionisationskammern, die in diesem Bereich C arbeiten, nennt man auf Grund der beschriebenen Zähl-Charakteristik auch Proportionalzähler. Überschreitet man mit der Zählrohrspannung die Geigerschwelle, so ist das elektrische Feld so stark, dass die Geschwindigkeit der Ionen für einen wesentlich höheren Verstärkungsfaktor der Primärionisation ausreicht. Ob der primäre Ionisationskeim nun einfach oder doppelt geladen war, lässt sich anhand der Spannungsamplitude nicht mehr feststellen. Abbildung 12 stellt den Bereich E vergrößert, aber in anderer Abhängigkeit dar. Aufgetragen ist nicht mehr die Spannungsamplitude, sondern die Anzahl von Zählimpulsen pro Minute gegen die Zählrohrspannung.

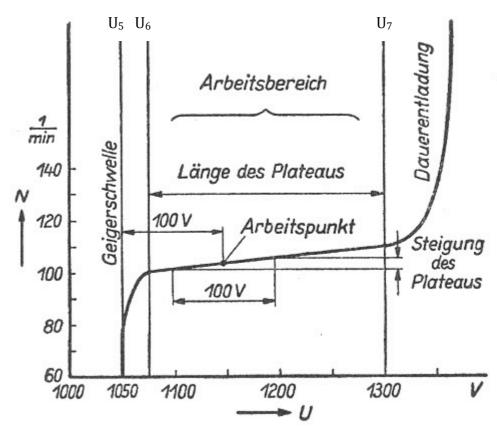


Abbildung 12: Zählrate N in Abhängigkeit der Zählrohrspannung U. Exemplarischer Ausschnitt des Bereichs E aus Abbildung 11 (aus Kment & Kuhn 1953, 8).

Der Geiger-Müller Zählbereich ("Arbeitsbereich") zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass die Anzahl der registrierten Impulse (zum Beispiel auf Grund von Hintergrundstrahlung) über einen weiten Spannungsbereich nahezu konstant bleibt. Oberhalb des Plateaus setzt eine Dauerentladung ein, die je nach Füllgas einen Zählbetrieb entweder verhindert oder das Zählrohr zerstört. Eine möglichst flache Steigung im Plateaubereich ist ein Qualitätsmerkmal für ein gutes Zählrohr. Ein typischer Arbeitspunkt für den Zählbetrieb liegt etwa 100V über der Geigerschwelle.

Messungen mit einem Zählrohr

Das weiter vorne eingeführte Zerfallsgesetz beschreibt nur das mittlere Verhalten einer großen Menge von Zerfällen in Nukliden. Vor allem bei schwächeren Präparaten treten statistische Schwankungen auf, die der Poisson-Charakteristik folgen (vgl. Lieb 2003, 774ff.). Dies liegt an der nichtvorhersagbaren Natur des radioaktiven Zerfalls. Die Anzahl an radioaktiven Teilchen oder γ-Quanten, die pro Zeiteinheit von einem radioaktiven Element ausgesendet wird, ist nicht periodisch, sondern zeitlich ungleichmäßig und binomial verteilt. Da aber die Anzahl von zerfallenen Atomkernen im Vergleich zur Anzahl an (noch) nicht zerfallenen Atomkernen in einem Präparat sehr groß ist, kann man in guter Näherung eine Poisson-Verteilung der Ereignisse annehmen²⁷. Der analytische Vorteil dieser Verteilung ist, dass der Mittelwert der Einzelmessung μ und dessen Standardabweichung σ über den für die Poisson-Verteilung charakteristischen Dispersionsindex von 1 in einer direkten Abhängigkeit stehen: $\sigma = \sqrt{\mu}$. Die dafür maßgebliche Zählrate des Zählrohrs ist von der baulichen Qualität des Zählrohrs, dem Abstand von Präparat und Zählrohr, der Isotropie der radioaktiven Strahlung, der Rückstreuung von radioaktiven Teilchen am Zählrohr und vielen anderen Faktoren in unterschiedlicher und nicht eindeutig bestimmbarer Gewichtung abhängig. Die gemessene Zählrate ist aber zumindest proportional zur Anzahl der tatsächlichen Zerfälle in einem Präparat. Wird die Zählrate N über einen Zeitraum t aufgenommen, so ergeben sich dessen Mittelwert n und Standardabweichung σ_n gemäß:

$$n = \frac{N}{t}$$
 und $\sigma_n = \frac{\sqrt{N}}{t}$ (9)

Misst man die Anzahl an Zerfällen eines Präparats, muss die Zählrate noch von der der Hintergrundstrahlung n_0 bereinigt werden. Damit gemeint ist die

²⁷ Experimentell ist die Poisson-Verteilung einfach nachzuweisen: Man misst über einen festgelegten Zeitraum t mit einem Zählrohr jeweils die Nullrate oder die Zählrate für ein ortsfestes Präparat (mit langer Halbwertszeit) und wiederholt diese Messung genügend oft. 10 Messungen über jeweils eine Minute reichen dabei schon aus. Anschließend bildet man den Mittelwert μ der Einzelmessungen und dessen Standardabweichung σ . Der Quotient aus der Varianz σ^2 und dem Mittelwert μ heißt Dispersionsindex. Ist dieser gleich 1, so handelt es sich um eine Poisson-verteilte Messung.

Summe von Zählimpulsen, die auch ohne Anwesenheit eines radioaktiven Präparats, vom Zählrohr registriert wird. Ursache dafür ist die natürliche Umgebungsstrahlung, die sich aus kosmischer (Höhen-) und terrestrischer Strahlung zusammensetzt. Letztere ist vorwiegend auf die natürlich vorkommenden radioaktiven Isotope Kalium-40 und Kohlenstoff C-14 sowie auf Radon zurückzuführen, die in Baumaterialien, Gestein, der Umgebungsluft und dem menschlichen Körper zu finden sind. Die Bereinigung des Messergebnisses von dieser Nullrate passiert durch Subtraktion der Mittelwerte sowie geometrische Addition der Varianzen gemäß Gauß'scher Fehlerfortpflanzung.

$$m = n - n_0$$
 und $\sigma_m = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{N_0}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{N_0}}{t_0}\right)^2} = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{n_0}^2}$ (10)

Um den Messwert möglichst valide und reliabel zu bestimmen, sollte die Standardabweichung der Einzelmessungen kleiner als 5 % des Messergebnisses sein²⁸:

$$\sigma_0 \le 0.05 \cdot n_0 \Leftrightarrow \frac{\sqrt{N_0}}{t} \le 0.05 \cdot \frac{N_0}{t} \Leftrightarrow N_0 > 400$$
 (11)

Diese Zählrate von 400 erreicht man im Fall der Nullratenmessung mit einer ausreichend großen Messdauer. Bei einer erwarteten Nullrate von 10 bis 15 Zählereignissen pro Minute reichen 27 bis 40 Minuten bereits aus, um eine entsprechende statistische Genauigkeit des Zählereignisses zu erzielen.

 $^{^{28}}$ Bei kleineren Toleranzen würden sich die Mindestzählraten entsprechend der quadratischen Funktion stark vergrößern: Bei 1% wäre $N_0>10\,000$ und bei 0,1 % $N_0>10^6$ einzuhalten.

KAPITEL II

Wissenschaftshistorische Analyse

Das zweite Kapitel dieser Arbeit widmet sich der wissenschaftshistorischen Analyse des Geiger-Müller Zählrohrs. Die Analyse besteht aus insgesamt sechs Teilen. Im ersten Abschnitt werden der methodische Ansatz sowie die aktuelle wissenschaftshistorische Forschungslage zum Geiger-Müller Zählrohr und zu dessen Entwicklern Hans Geiger und Walter Müller erarbeitet. Die beiden darauffolgenden Abschnitte 2 und 3 sind biographischer Natur und rekonstruieren anhand von Primärquellen und Sekundärliteratur die Werdegänge von Walter Müller und Hans Geiger bis zur Entwicklung des Zählrohrs im Jahr 1928 und kursorisch darüber hinaus. Es folgt Abschnitt die Quellenanalyse hinsichtlich Zählrohrentwicklung, welche den im fünften Abschnitt dargestellten Nachbau des Zählrohrs und den Nachvollzug von assoziierten Experimenten vorbereitet. Der Einfluss der Replikationsmethode ist dabei spätestens ab dem vierten Abschnitt deutlich präsent, da das Ziel der Quellenanalyse eine dichte Informationslage bezüglich Konstruktionsmöglichst Funktionsdetails des Zählrohrs ist. Im sechsten und letzten Abschnitt werden die Ergebnisse der Analyse mit der Replikationsmethode interpretiert und reflektiert. Ziel dieser umfassenden Analyse ist neben der Vertiefung der bisher nur sporadisch vorhandenen Sekundärliteratur über Geiger, Müller und das Zählrohr die Analyse von experimentellen Handlungspraktiken und deren Entwicklung, Variation und Tradition. Besonders die für dieses Kapitel in diesem Kontext strukturbildende Replikationsmethode scheint dafür besonders geeignet zu sein, da sie versucht diese praktischen Aspekte der Laborarbeit und Wissensgenese "in ihrem historischen Zusammenhang zu erfassen, zu beschreiben und zu rekonstruieren" (Breidbach et al. 2010, 13).

1. Der Status quo der wissenschaftshistorischen Forschung

Die Replikationsmethode ist mittlerweile eine etablierte Forschungsmethode der Wissenschaftsgeschichtsschreibung, welche ihre Renaissance nach Vorarbeiten von Settle (1961) insbesondere zu Galileis Experimenten dem sowohl didaktisch, als auch physikgeschichtlich orientierten Oldenburger Kreis um Falk Rieß verdankt²⁹. Ergänzend zu einer Wissenschaftsgeschichtsschreibung üblichen Quellenexegese wird anhand Originalquellen ein Instrument nachgebaut und durchgeführten Experimente nachvollzogen. Diese experimentelle Herangehensweise an einen Forschungsgegenstand zielt auf Rekonstruktion der Praxis von Naturwissenschaften ab. Dabei spielen insbesondere nicht verschriftlichte Handlungspraktiken eine Rolle, die in der Regel in der historischen Situation tradiert wurden und daher nur im Prozess der Konstruktion oder des Experimentierens erworben werden konnten. Der Nachbau von Geräten und der Nachvollzug von Experimenten ergänzt durch diesen zentralen Punkt eine rein theoretisch orientierte Arbeit in der Wissenschaftsgeschichte (Breidbach et al. 2010, 13).

Die Replikationsmethode in der Theorie

Eine auf Basis von Breidbach et al. (2010), Heering (1998), Sichau (2002) und Rieß (2000a) erstellte Arbeitsdefinition für die Replikationsmethode könnte lauten: Die Replikationsmethode analysiert Konstruktion und Gebrauch sowohl von Instrumenten, als auch von Experimenten durch deren quellengetreuen, funktionstüchtigen Nachbau und Nachvollzug. Sie generiert damit primär explizites Wissen über zunächst implizite experimentelle Praktiken und sekundär über die zu Grunde liegende wechselseitige Beziehung zwischen Theorien und experimentellen Strukturen der damit erworbenen Erkenntnisse. Der Unterschied zu einem bloßen .Nachmachen' von Experimenten manifestiert sich dabei gerade hinsichtlich der letzten beiden Kriterien. Dabei sind verschiedene, zunächst außer-experimentell erscheinende Faktoren ebenso von zentralem Interesse für experimentelle Wissenschaftsgeschichte. Zielvorgabe ist nicht nur die Reproduktion bestimmter Phänomene oder Messvorschriften, sondern die quellenkritische Suche nach deren Bedingtheit sowohl in apparativen Aspekten als auch in der Person des Experimentators selbst³⁰. Der gesamte

²⁹ Für eine detaillierte epistemologische Analyse der Replikationsmethode anhand von ausgewählten Beispielen siehe Sichau (2000). Zu Formen von experimentellen Handlungen im Kontext der Replikationsmethode siehe Rieß (2000a) und Breidbach et al. (2010).

³⁰ Breidbach et al. (2010, 42ff.) merken an, dass auf Grund dieser Zielsetzung der Nachbau eines Geräts nicht unbedingt vom Forschenden selbst geleistet werden muss, sondern dass dessen Planung und Begleitung der Konstruktion oftmals ausreicht, da ein Großteil des

Prozess der Replikation ist somit nicht eine zunächst als ahistorisch zu wertende Methode, sondern durch den Einbezug der Quelleninformationen hinsichtlich Konstruktion, historischer Handwerkstechniken und Werkzeugen eine Möglichkeit zur Analyse von historisch lokalisierbaren Kulturtechniken anhand von deren Nachvollzug. Das prozedurale Wissen *über* ein Experiment und *über* die Handhabung des Instruments sind dabei im Stadium der Entwicklung *nu*r durch deren Anwendung erlernbar und rekonstruierbar³¹.

Handlungswissen, tacit knowledge und implizites Wissen

Dieses Wissen, welches im Kontext des Nachbaus und Nachvollzugs zum Bewältigen verschiedenster experimenteller Hürden benötigt wird, nennt Sichau (2002) *Handlungswissen*. Es ist Teil des von Polanyi (1958; 1985) und Collins (2011) als *implicit* bzw. *tacit knowledge* bezeichneten Wissens einer Person, welches auf Grund von unmöglicher Generalisierbarkeit nur schwer oder mitunter gar nicht verbalisiert werden kann. Dieses daher 'stille' Wissen kann nur durch den Vollzug der jeweiligen Handlung erworben oder weitergegeben werden³². Zwar stellen in einem wissenschaftlichen Kontext Laborbücher oder in Publikationen veröffentlichte Handlungsanweisungen

Handlungswissens erst im Umgang mit dem Gerät erworben wird. Ein aktuelles Beispiel für diese These liefert die Arbeit von Panusch (2012), der auf Grund der schieren Größe, Komplexität und des großen Kostenvolumens den Nachbau zwar dezidiert geplant und begleitet, ihn aber nicht selber durchgeführt hat.

³¹ Heering (2010b) hat im Kontext der Sonnenmikroskope gezeigt, dass in einem späteren Entwicklungsstadium vor allem von Instrumentenmachern Instrumente gefertigt wurden, die kein hohes Maß an Handlungswissen mehr benötigten und so auch Laien-Experimentatoren trotz hoher Komplexität das Experimentieren ermöglichten. Das Handlungswissen materialisierte sich dort in Form des weiterentwickelten Instruments selbst.

32 An dieser Stelle drängt sich die epistemologisch spannende Frage auf, ob implizites Wissen z.B. in Form von Handlungswissen bei der Tradierung einerseits wirklich vollständiger weitergegeben wird als bei dem Versuch der Transkription und andererseits ob das tradierte Handlungswissen nicht vielmehr ähnlich, anstatt identisch zu dem ursprünglichen Handlungswissen ist. Der Begriff der Entwicklung wäre in diesem Fall dann im Vergleich zu dem der Weitergabe angemessener. Ein plakatives und nicht-naturwissenschaftliches Beispiel zur Illustration der Weitergabe von Handlungswissen ist die vielfältige Tätigkeit des Kochens. Es gibt auf Grund der unzählbaren Kombinationsmöglichkeiten von Zutaten, Zubereitungsarten, usw. keine Möglichkeit der vollständigen und vor allen Dingen effektiven Weitergabe dieses zu einem großen Teil aus Handlungswissen bestehenden Wissenskomplexes. Es wird vielmehr in der Aus- und anschließenden Weiterbildung zum Koch/zur Köchin über Jahre tradiert, entwickelt und auch neu generiert. Kein Koch und keine Köchin würde seinem/seiner/ihrem/ihrer Auszubildenen aufschreiben, wie man eine Zwiebel schneidet, ein Steak anbrät oder einen Lachs filetiert. Stattdessen wird dieses Wissen vielmehr über dessen Vollzug weitergegeben. Dabei kann es sein, dass der/die Auszubildende in seiner/ihrer späteren Laufbahn eine für sich angemessenere oder ggf. auch vollkommen neuartige Variante des Filetierens von Lachs auf der Basis seiner/ihrer früheren Ausbildung entwickelt und diese Variation oder Neuschöpfung an seine/ihre späteren Auszubildenden weitergibt. Allein durch das Studium von Kochbüchern wird man dieses spezielle Wissen jedoch nicht erlangen können.

eine Annäherung an diesen Transfer dar, jedoch kann ein solcher Versuch der Verschriftlichung von Tätigkeiten - also dem Transfer von implizitem, stillem, nicht aussprechbarem Wissen in explizites, kognitives Wissen niemals vollständig passieren. In der originalen Experimentiersituation präsentiert sich stilles Handlungswissen häufig in Form von Fähig- und Fertigkeiten, welche aus verschiedensten Gründen nicht schriftlich festgehalten oder tradiert worden sind. aber Fall im der Wissenschaftsgeschichte das Verstehen der für Praxis von Naturwissenschaften essentiell sind. In der Regel handelt es sich aber um einen von vier Gründen: Es gibt keine schriftlichen Aufzeichnungen, weil (a) es nicht möglich ist, eine bestimmte Handlung oder performative Aspekte von naturwissenschaftlichen Experimenten mit Worten ausreichend genau und effizient zu beschreiben. Nicht-naturwissenschaftliche Beispiele dafür sind in der Regel im traditionellen Handwerk, wie beispielsweise der Schmiedekunst oder auch kognitiv anspruchsvollen Tätigkeiten, wie dem Schachspiel zu finden. Die zweite Option wäre, dass (b) der jeweilige Akteur in der historischen Situation über routinierte, quasi 'selbstverständlich' erscheinende Arbeitsabläufe keine Aufzeichnungen angefertigt hat. Beispiele dafür gibt es zahlreich in der Geschichte der Naturwissenschaften. Darunter fallen u.a. die Verwendung von zeit-typischen Klebstoffen oder auch die Fertigkeit des Glasblasens. Während bis in die 1930er Jahre die Verwendung von Klebwachs oder Siegellack zum Kleben und Abdichten von Materialien üblich war, ist deren Herstellung und Handhabung heutzutage weitestgehend unüblich und muss erst recherchiert sowie anschließend neu erlernt werden. Gleiches gilt für das Glasblasen, das noch Anfang des 20. Jahrhunderts deutlich in den Aufgabenbereich eines Physikers gehörte³³, während es

³³ Siehe hierzu z.B. die Arbeiten von Müller (2004) und Hughes (2008), welche die Fertigkeiten des Glasblasens und den Umgang mit Glasapparaturen anhand der Gasentladungsforschung bzw. Rutherfords Tätigkeiten in Manchester kontextualisieren. Ein weiteres Beispiel aus der Geschichte der Naturwissenschaften, welches gleichermaßen die Wichtigkeit des Handlungswissen im Kontext von Experimentalpraxis und dessen fehlende Verschriftlichung auf Grund von unterschiedlicher Sozialisation illustriert, ist die parallele Entwicklung der Kleist'schen bzw. Leidender Flasche Mitte des 18. Jahrhunderts. Der Geistliche Ewald von Kleist wandte sich mit seiner Entwicklung der heute als Leidener Flasche bekannten 'Verstärkerflasche' an die Mitglieder der Göttinger Akademie der Wissenschaften. Die Flasche solle die elektrische Wirkung von den damals genutzten Elektrisiermaschinen erheblich verstärken. Die Mitglieder der Akademie konnten seine in einem Brief geschilderten Ergebnisse jedoch nicht nachvollziehen, da Kleist ein entscheidendes Detail in seiner Beschreibung nicht erwähnt: Die Person, die die Flasche mit der Elektrisiermaschine auflädt, darf entgegen der bis dahin üblichen und für Physiker in dem Kontext selbstverständlichen Praxis nicht isoliert stehen, sondern muss geerdet sein, damit der 'Verstärkungseffekt' eintritt. Pieter van Musschenbroek aus Leiden kannte auf Grund seiner Sozialisation als Physiker diese Praxis, wusste damit gegenüber den ähnlich ausgebildeten Akademiephysikern umzugehen und erwähnte das von Kleist ausgelassene Detail, vgl. Heering 1998, 33; Heilbron 1979. Eine ähnliche, missglückte Rezeption erfuhren Newtons Experimente zur Lichtzerlegung durch Prismen, vgl. Nawrath 2010a.

heutzutage üblich ist, solche und ähnliche Arbeiten an eigens dafür ausgebildete TechnikerInnen und HandwerkerInnen abzugeben. Am Ende meiner Studie wird zusätzlich klar werden, dass es noch eine dritte Variante (c) gibt, wonach aus Gründen der Geheimnisbewahrung zumindest keine Aufzeichnungen über Details eines Instruments oder den Umgang damit publiziert wurden. Dies ist insofern relevant für den Transfer von Handlungswissen, als dass ein Minimum an Angaben zur Konstruktion einen ungewollten, quasi autarken Nachbau und die damit einher gehende selbstständige Genese von Handlungswissen von Dritten zu verhindern versucht. Neben der in Abschnitt II.6 diesbezüglich geschilderten Geheimhaltungspraxis im Kontext der Zählrohrentwicklung kann man den im gleichen Jahrzehnt von Albert Einstein und Leo Szilard patentierten und ebenfalls 1928 vorgestellten "Volkskühlschrank" anführen. Trotz der für ein Patent notwendigen Offenlegung von Konstruktionsdetails hat sich dessen Nachbau (Engels 2006a, Rauner 2005) als äußerst diffizil präsentiert. Die Patentschrift und die zugehörigen Konstruktionsskizzen wurden absichtlich mit falschen und in sich nicht schlüssigen Maßangaben versehen. Zwar wäre der Kühlschrank an sich durch das Patent vor Nachahmern mit einem kommerziellen Interesse geschützt, jedoch nicht hinsichtlich des apparativen Wissens, was durch Nachbau und Stabilisierung des Betriebs von Dritten hätte erworben werden können. Eine Weiterentwicklung dieser damals vielversprechenden Alternative zu etablierten, aber ineffizienten, aber günstigen Kühlschrankmodellen sollte so gezielt verhindert werden. Eine vierte Möglichkeit (d) wird durch Versuche und Instrumente abgebildet, die lediglich in Briefen, Artikeln o.ä. kurz angesprochen werden, zu denen aber weder eigenständige Publikationen, noch sonstige Aufzeichnungen, wie Laborbucheinträge vorhanden oder verfügbar sind.

Die Replikationsmethode in nationaler Praxis

Insbesondere die vorwiegend im Kreis der Oldenburger Arbeitsgruppe entstandenen Fallstudien von Frercks (2001), Heering (1992; 2008; 2010a), Müller (2004), Sibum (1995) und Sichau (2002) und anderen zeigen eine erfolgreiche Anwendung der Replikationsmethode, die bisher vorwiegend im 18. und 19. Jahrhundert ihre Protagonisten fand. Neben den Arbeiten von Engels (2006a; 2006b) zur Wilson'schen Nebelkammer und Einsteins Kühlschrank, Lacki & Karims (2005) Nachvollzug von Charles-Eugène Guyes Experimenten zur Bestätigung der speziellen Relativitätstheorie bzgl. der postulierten Abhängigkeit von Elektronenmasse und -geschwindigkeit gemäß der Lorentztransformation, Makus' (2002; 2003) Analyse der Experimente zur Ladungsbestimmung des Elektrons durch Felix Ehrenhaft und Panusch' (2012) Arbeit der konkurrierenden Versuche von Robert

Millikan versucht auch meine Arbeit die Replikationsmethode in der Wissenschaftsgeschichte des 20. Jahrhunderts zu etablieren. Die Praxis mit Instrumenten und Experimenten der jüngeren Geschichte ist dabei im Vergleich deutlich näher an der heute an Universitäten und in Handwerksbetrieben gelehrten Praxis, durch die der/die jeweils experimentell arbeitende WissenschaftshistorikerIn ggf. selbst noch sozialisiert worden ist, als dies bei historisch früheren Nachbauten der Fall einerseits Problem. ist. Dies schafft das dass WissenschaftshistorikerIn zu viel seiner/ihrer eigenen Handlungspraxis in seine/ihre nachzuvollziehenden Experimente hineinträgt und damit viele Aspekte des Umgangs sowohl mit Instrument als auch mit den zugehörigen Experimenten trotz der bis zu 100 verstrichenen Jahre noch selbstverständlich erscheinen und nicht neu erlernt werden müssen³⁴. Aus einer naturwissenschaftlichen Perspektive, in der es lediglich um das Herstellen der Funktion des nachgebauten Instruments und der Stabilisierung der Messungen geht, ist dies ein großer Vorteil. Das fremdoder andersartige der Experimentierpraxis geht dabei aber für die wissenschaftshistorische Analyse verloren. Bestimmte in der historischen Situation als neuartig oder spezifisch wahrgenommene Details bezüglich Konstruktion, Experimentalaufbau, Messprozedere, o.ä. werden dann im Nachvollzug nicht mehr als solche erkannt. Da es sich aber bei der Anwendung der Replikationsmethode auch im 20. Jahrhundert noch explizit Wissenschaftsgeschichte Analysen der handelt, Problemstellung Vorrang vor dem naturwissenschaftlichen Argument einzuräumen³⁵.

³⁴ Meinem Kenntnisstand nach behandelt meine Arbeit neben der eher technikhistorischen Arbeit von Engels zum Einstein-Kühlschrank das jüngste Instrument, das mit der Replikationsmethode analysiert worden ist. Ein weiterer, zeitlicher Schritt Richtung Gegenwart wird dabei in zweierlei Hinsicht schwierig, da einerseits das schon diskutierte und gewichtigere Problem der wissenschaftlichen und experimentellen Sozialisation immer deutlicher die Analyse stört und mitunter obsolet macht. Andererseits sehe ich noch ein Machbarkeitsproblem, da die Komplexität von Experimenten der Physikgeschichte hinsichtlich Aufbau, Personal, Infrastruktur, Kostenvolumen, u.v.a. immer weiter zunimmt. Kleinere Experimente, die für die Wissenschaftsgeschichtsschreibung der Physik von Interesse seien könnten und gleichzeitig von einer Person oder einer kleineren Gruppe im Rahmen einer Studie mit der Replikationsmethode bearbeitet werden könnten, sind auf Grund der hohen Binnenkonkurrenz schwieriger zu identifizieren.

³⁵ Um eine weitere, potentielle Abgrenzung der Replikationsmethode im 20. Jahrhundert vornehmen zu können, ist eine eingehende Prüfung der bisher zur Verfügung stehenden Arbeiten notwendig. Ein erster analytischer Zugriff auf die fünf angesprochenen Arbeiten hat dabei keine übergreifenden und auszeichnenden Kriterien aufdecken können. Daher muss bisher davon ausgegangen werden, dass zumindest die analysierten Arbeiten sich hinsichtlich der Anwendung der Replikationsmethode nicht von den historisch früheren Arbeiten unterscheiden. Die bestehenden epistemologischen Unterschiede und Probleme sind bereits dargelegt worden.

Im deutschen Sprachraum gibt es eine zweite Gruppe von experimentell forschenden WissenschaftshistorikerInnen in Jena. Während in Oldenburg in der Arbeitsgruppe von Rieß der erkenntnistheoretische Fokus eher auf den Experimenten und den Umgang damit lag, ist das Interesse der Jenaer Gruppe um Breidbach vorwiegend auf die möglichst quellengetreuer Rekonstruktion des Instruments und des dabei generierten Wissens fokussiert. Dies zeichnet sich beispielsweise dadurch aus, dass zur Verfügung stehende Informationen über ein Instrument bis ins kleinste Detail genutzt werden. So wurde das Glas einer Elektrisiermaschine aus dem späten 18. Jahrhundert mit zeitgenössisch üblichen Methoden und sogar in der originären Glashütte im Thüringer Wald gefertigt (Weber 2010). Diese Präzision im Bereich des Nachbaus findet man in der Regel nicht in Nachbauten des Oldenburger Kreises. Da der Fokus auf den mit einem Instrument vollzogenen Experimenten liegt, trifft man hier eher auf einen begründet pragmatischen Umgang mit Details in der Konstruktion eines Instruments. So verwendete zum Beispiel Heering (1998) in seinem Nachbau der Coulomb'schen Torsionswaage anstatt des historisch adäquaten Silberdrahtes aus finanziellen Gründen einen technisch gleichwertigen Kupferdraht mit vergleichbaren Torsionseigenschaften. Die bisher in Flensburg auf Dissertationsniveau durchgeführten Fallstudien, darunter der Nachbau und Nachvollzug des Millikan-Experiments zur Bestimmung der Elementarladung (Panusch 2012) und der Nachbau eines Geräts zur hydrostatischen Dichtemessung (Engels 2012) sowie meine eigene Fallstudie, stehen in dieser Tradition der Replikationsmethode³⁶. Der Nachbau des Instruments und der Nachvollzug eines oder mehrerer Experimente erfahren im Rahmen der zur Verfügung stehenden Quellen und der möglichen reproduzierbaren Genauigkeit eine intensive Analyse. Für das Experiment an sich spielt dabei nicht nur das nachgebaute zentrale Instrument, sondern auch die notwendigen Peripheriegeräte eine ernst zu nehmende Rolle. Erst die intensive physikalische Analyse der Quellen hinsichtlich der in der Originalsituation benutzten Apparate erlaubt nicht nur deren mitunter pragmatischen Ersatz, sondern auch deren begründete Modernisierung. Dies machte beispielsweise im Fall des Millikan-Nachbaus von Panusch und des Geiger-Müller Zählrohrs die Nutzung von modernen, leistungsbegrenzten Hochspannungsnetzteilen anstelle von mehreren in der historischen Situation verwendeten Anodenbatterien oder den Gebrauch von modernen Messgeräten, wie Multimeter und Oszilloskop anstelle von Galvanometer und Fadenelektrometer möglich.

2

³⁶ In Oldenburg finden derzeit nur noch vereinzelt wissenschaftshistorische Forschungsprojekte statt, da Falk Rieß mittlerweile im Ruhestand ist und sein Nachfolger als Leiter der Arbeitsgruppe "Didaktik und Geschichte der Physik" seinen Forschungsschwerpunkt in der empirischen Bildungsforschung hat.

Nicht zuletzt durch diese Herangehensweise ergeben sich detaillierte Fragen zum Experiment oder dessen Interpretation erst durch die experimentell orientierte Recherche und den anschließenden Nachbau des zugehörigen Instruments. Der wissenschaftshistorischen Fragestellung wird dieses Vorgehen in einem speziellen Sinne gerecht, da Instrument, Experiment und Experimentator bzw. seine Fähig- und Fertigkeiten komplett Gegenstände der Analyse sind. Nach Sichau (2002, 9f.) ist ein Instrument in der historischen Situation nur ein Gegenstand, dem erst durch ein zugehöriges Experiment Sinn verliehen wird. In der anschließenden Tradierung von Experimenten muss Sichaus starre Definition jedoch entsprechend differenziert werden, da auch Instrumente ohne 'ihre' charakteristischen Experimente als Ikonen funktionieren können. Zu nennen wären hier neben dem Geiger-Müller Zählrohr (Abele 2002) selbst, dass auch abgekoppelt von seinem physikalischen Hintergrund als Sinnbild für Radioaktivität und Strahlenschutz wahrgenommen wird, die Torsionswaage von Charles Augustin Coulomb (Heering 1998), welche obgleich ihres detaillierten Aufbaus im Nachbau und Nachvollzug nicht die Art von präzisen Messungen hat leisten können, die Coulomb publiziert hat, aber dennoch im Rückblick eine zeitlose und akzeptierte Ikone der Elektritzitätsforschung darstellt.

Die Replikationsmethode als Analyse-Instrument

Ein Nachbau und Nachvollzug kann jedoch nur eine Annäherung an das eigentliche Experiment darstellen. Während des ganzen Prozesses von Quellenstudium, über Konstruktion des Nachbaus bis hin zum Nachvollzug wird Wissen erworben, welches zumindest noch über die Quellenanalyse in einem direkten und für eine Analyse nutzbaren Zusammenhang zum ursprünglichen Experiment steht (Heering 1998, 68f.). Im Gegensatz zur klassischen Wissenschaftsgeschichtsschreibung liegt der Schwerpunkt jedoch auf experimentellen Gesichtspunkten. Dieser erlaubt einen anderen Blick auch auf bereits erschlossenes Quellenmaterial, da die Analyse und besonders die experimentelle Arbeit des Nachbaus und des Nachvollzugs um Rückkopplungen zur Ausgangsfrage erweitert werden. Diese sind vor allem Probleme, die einerseits erst während der experimentellen Arbeit offensichtlich werden und oft weder in Laborbüchern noch in zugehörigen Publikationen Erwähnung finden. Anderseits offenbaren sich auch Probleme, Widersprüche oder Verständnisschwierigkeiten, die man erst durch die experimentell orientierte Beschäftigung mit Instrument oder Quellen gänzlich wahrnimmt. Die praktische Arbeit ist jedoch historisch gesehen nicht belastbar. Dennoch generieren die Laborarbeit und die detaillierte Beschäftigung mit dem Analysegegenstand ergänzende Fragen, die auf Basis der reinen Quellenexegese nicht gestellt worden wären. Deren Klärung veranlasst zu einem erneuten Gang ins Labor oder zur Analyse weiterer

zeitgenössischer Quellen und erlaubt so einen sich selbst regulierenden, zielgerichteten sowie *historischen* Forschungsprozess anhand von *ahistorischer*, experimenteller Arbeit. Neben einem tiefen, deklarativen Verständnis der Primärquellen wird durch die Anwendung der Replikationsmethode aber auch implizites Wissen über Konstruktion und Handhabung des nachgebauten und nachvollzogenen Experiments erzeugt³⁷.

Die Protagonisten im Spiegel der Wissenschaftsgeschichte

Wissenschaftshistorisch gibt es recht wenig detaillierte Analysen über Geiger, Müller oder deren Zählrohr. Swinne (1988) liefert wohl die umfangreichste Materialsammlung über Geigers Leben und Werk aus verschiedensten Quellen. Daneben gibt es bis auf einzelne Einträge in Lexika und Jahrbüchern (z.B. Cassidy 1979, Westrich 1982, Haxel 1987, Hoffmann 2002, Piel 2008) keine umfangreicheren Veröffentlichungen über Geiger. Grund dafür ist wohl die mangelhafte Quellenlage, da es weder einen privaten noch einen wissenschaftlichen Nachlass von ihm gibt. Das wissenschaftshistorische Interesse an Walter Müller ist bis dato noch geringer. Dies liegt vermutlich daran, dass er nach 1929 von der universitären Forschung in die technische und anwendungsorientierte Industrie wechselte und nur noch vereinzelt wissenschaftlich publizierte. Seinen wissenschaftlichen Nachlass spendete Müllers Tochter Hildegard Gillem kurz nach seinem Tod dem Deutschen Museum in München, wo er unter dem Index NL024 geführt wird. Er beinhaltet neben ein paar Fotos und wissenschaftlichen Berichten und Notizen aus der Nachkriegszeit unter anderem Briefe an Müllers Eltern sowie Briefwechsel mit Eduard Wildhagen, Siegfried Balke und Thaddeus Trenn³⁸.

Der Forschungsstand zum Zählrohr

Neben einem prominenten Status des Zählrohrs in Lehr- und Handbüchern sowie einzelnen Monografien oder umfangreicheren Artikeln der 1930er bis 1960er Jahre mit eher technischem Charakter (Geiger 1933; Montgomery & Montgomery 1940; Korff 1949; Curtiss 1950; Kment & Kuhn 1953; Richter 1957; Rheingans 1988) gibt es auch zwei umfassende wissenschaftshistorische Arbeiten. Während Johannes Abele (2002) vorwiegend die ikonografischen und kulturgeschichtlichen Dimensionen des Geiger-Müller Zählrohrs in der Nachkriegsgeschichte diskutiert, widmet sich Thaddeus Trenn (1976a, 1986) explizit der Entstehungsgeschichte des

³⁷ Die Unterschiede von meinem Ansatz und meine im Fall des Geiger-Müller Zählrohrs angewendete Interpretation der Replikationsmethode im Vergleich zu der hier dargestellten, etablierten Anwendung der Methode wird im Nachgang der Studie in Abschnitt II.6 diskutiert werden.

³⁸ Details zu diesen Primärquellen sind in Abschnitt II.2 zu finden.

Zählrohrs. Erwähnenswert im Kontext von Trenns Arbeit ist seine Informationsquelle. Er hatte in den 1970er Jahren persönlichen Kontakt mit dem zu der Zeit im kalifornischen Santa Barbara lebenden Walter Müller. Müller schilderte ihm retrospektiv seine knapp fünfzig Jahre zurückliegenden Erfahrungen mit Geiger und der Entwicklung des Zählrohrs in Briefen und persönlichen Gesprächen³⁹. Fünf Laborbücher von Walter Müller aus der Zeit von 1926 bis 1929 befinden sich in der *Dibner Library of Rare Books* der *Smithsonian Institution* in Washington, D.C.. Walter Müller hatte sie zunächst Thaddeus Trenn für seine Arbeit zur Verfügung gestellt und sie danach auf Bitten des damaligen Kurators Paul Forman dem *National Museum of American History* der *Smithsonian Institution* überlassen.

Wesentlich sind weiter Jeff Hughes' und Peter Galisons Ausführungen über das Zählrohr. Hughes (1993, Kap. 4) illustriert generell den methodischen und apparativen Disput zwischen dem Wiener Institut für Radiumforschung unter Stefan Meyer und dem von Ernest Rutherford geleiteten Cavendish Laboratory in Cambridge. Anlass für die Kontroverse war der subjektive Charakter der seit den Anfängen der Radioaktivitätsforschung etablierten optischen Zählung der Szintillationen von α-Teilchen. Die rasche Entwicklung der Röhren- und Verstärkertechnik habe dann, so Hughes, die elektrischen Methoden in den später 1920er Jahre weiter gestärkt und die Szintillationsmethode in den Hintergrund gedrängt. Nicht zuletzt deswegen sei das Geiger-Müller Zählrohr so erfolgreich gewesen. Dagegen sieht Peter Galison im Zählrohr eine Weiterentwicklung des Spitzenzählers von 1913, der einen der letzten Anlässe für die Debatte zwischen direkten optischen und indirekten elektrischen Zählmethode Anfang der 1920er Jahre lieferte. Müller habe durch die systematische Arbeit am Spitzenzähler die Ursache für die vormals als Artefakte identifizierten Zählereignisse die Höhenstrahlung ausgemacht. Die rasche Weiterentwicklung der Zählmethode mittels elektrischer Verstärkerschaltungen und standardisierter Experimentalaufbauten durch Bothe, Kolhörster und Rossi habe zur Etablierung und Stabilisierung der Messmethode stark beigetragen (Galison 1997, 39; 440).

Desiderata der Wissenschaftsgeschichte

Dennoch kann man u.a. die Frage stellen, wie das Zählrohr innerhalb weniger Monate den Status eines verlässlich funktionierenden, elektrischen Messinstruments der Radioaktivitäts- und Höhenstrahlungsforschung bekommen hat. Der Einfluss der Höhenstrahlung auf Meeresniveau wurde erst 1926 von Kolhörster (1926a) postuliert und war immer noch Gegenstand für Diskussionen und keinesfalls ein etabliertes Phänomen.

³⁹ Die Briefe sind zum Teil als Kopie in Müllers Nachlass im Deutschen Museum aufbewahrt. Die fehlenden Briefe habe ich im Februar 2011 von Thaddeus Trenn persönlich erhalten.

Außerdem ist die Frage zu klären, welche Rolle Walter Müller in der Entwicklung des Zählrohrs gespielt hat. Ein exemplarisches Beispiel für diesbezügliche Missverständnisse ist die umgangssprachlich übliche Bezeichnung "Geigerzähler", die Mitte der 1930er Jahre aufgekommen ist und Müllers Anteil an der Entwicklung nicht in gleicher Weise würdigt, wie Geigers. Zudem gilt es zu klären, welche handwerklichen Fähig- und Fertigkeiten notwendig sind, um das auf den ersten Blick einfach gehaltene Zählrohr zu bauen und dann für Messungen zu nutzen. Dies ist insofern wesentlich, als dass fast niemand außer Geiger und Müller dazu in der Lage war ein Zählrohr selber zu konstruieren oder gar Messungen damit durchzuführen, die Geigers und Müllers Behauptungen gestützt hätten.

2. Walt(h)er Müller

Über Walter Müllers Leben (1905-1979) ist nicht viel bekannt. Lediglich einige Selbstzeugnisse und spärliche Quellen von dritter Seite berichten von seinem Schaffen in Deutschland, Australien und den USA. Dieser Abschnitt soll ein Bild von seinem Leben zeichnen, welches auf seinen eigenhändig verfassten Lebensläufen und diversen persönlichen Briefen beruht. Zur Verfügung stehen dafür vollständige Briefwechsel mit Thaddeus Trenn, Eduard Wildhagen und Siegfried Balke. Der damalige Regensburger Wissenschaftshistoriker Trenn hatte nach meinem Kenntnisstand den intensivsten, noch erhaltenen brieflichen und persönlichen Kontakt mit Müller in den 1970er Jahren. Daraus hervorgegangen sind zahlreiche Briefe und von Müller redigierte Vortrags- und Artikelmanuskripte, um dessen Müller gebeten hatte. Durchsicht Trenn Trenn hat für wissenschaftshistorische Recherche zudem die schon in Abschnitt II.1 genannten Primärquellen erhalten. Darunter waren u.a. die Briefwechsel mit Wildhagen und Balke. Wildhagen war zu Müllers Studienzeit im Vorstand der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaften, danach Vizepräsident der Nachfolgeinstitution Deutsche Forschungsgemeinschaft und Redakteur beim Hamburger Abendblatt. Die Notgemeinschaft hatte Müller während seiner Tätigkeit bei Geiger finanziell unterstützt. Vermutlich kannte Wildhagen Müller daher sporadisch und nutzte diese mögliche Bekanntschaft für seine Recherchearbeiten für diverse Zeitungsartikel über Müller in den 1950iger und 1960iger Jahren. Balke, zu der Zeit Bundesminister für Atomfragen, war ein Schulfreund von einem Bruder von Walter Müller und hatte in den späten 1950igern Kontakt zu dem zu der Zeit bereits in Australien lebenden und arbeitenden Müller aufgenommen, um mit ihm über eine Rückkehr nach Deutschland zu diskutieren. Die drei Briefwechsel, zahlreiche Briefe von Müller an seine Eltern in den Jahren 1928/2940 sowie ein Teil von Trenns Forschungsunterlagen sind in Müllers Nachlass im Deutschen Museum München hinterlegt. Ergänzend habe ich zu diesen Primärquellen die Memoiren von Müllers Vater Heinrich und Müllers jüngerem Bruder Wolfgang nutzen können⁴¹. Weitere Informationen, besonders über das Leben der Familie von Walter Müller während des zweiten Weltkrieges in

⁴⁰ Die Briefe liegen komplett handschriftlich sowie als Maschinenabschrift (vermutlich angefertigt von T. Trenn) im Nachlass von Müller vor. Die Abschrift enthält jeweils nur für die Entwicklung des Zählrohrs wesentliche Textpassagen und nicht den kompletten Wortlaut. Letztere ist Grundlage für meine Arbeit.

⁴¹ Diese beiden Memoiren sind im Archiv des Hildagymnasiums Koblenz hinterlegt, an dem Heinrich Müller Direktor gewesen ist. Jeweils eine Kopie wurde mir freundlicherweise von Frau Gärtner, Archivarin und Lehrerin am Hildagymnasium, zur Verfügung gestellt.

Hamburg, habe ich dankenswerterweise von Müllers Tochter Hildegard Gillem⁴² bekommen.

Ein erstes Detail, welches schon früh in der Recherchearbeit auffällt, ist die Schreibweise von Müllers Vornamen. Bis 1940 schrieb er sich selbst mit 'h', da er erst zu diesem Zeitpunkt bei einer Musterung durch die Wehrmacht auf eine diesbezügliche Diskrepanz zwischen Geburtsurkunde und Taufschein aufmerksam gemacht worden war. Obwohl er damals eigenen Aussagen nach den Konsequenzen der ihm vorgeworfenen 'Personenstandsfälschung' entgehen konnte, führte er das 'h' in 'Walther' fortan nicht mehr⁴³.

2.1 Die Jugendjahre

Walter (Maria Max) Müller wurde am 6. September 1905 im preußischen Hannover geboren. Er lebte zusammen mit seinen Geschwistern und Eltern Dr. Heinrich Müller und Anna Müller, geb. Sohl in Hannover, Schwelm und Koblenz. Nach sieben Jahren als Oberlehrer in Hannover wechselte Heinrich Müller 1912 als Direktor an das städtischen Lyzeum in Schwelm um dann schließlich 1916 als Oberstudiendirektor der höheren evangelischen Mädchenschule – heute Hildagymnasium - nach Koblenz zu gehen. Er führte damit die lange Lehrertradition seiner Familie fort. Neben Familie und Beruf stand für Heinrich Müller an dritter Stelle die Freimaurerschaft. 1906 wurde er Mitglied in der Hannoveraner *Loge zur Ceder*, der er bis 1926 angehörte. In Koblenz wurde er 1925 Mitglied der Loge *Friedrich zur Vaterlandsliebe* und wechselte 1926 zu der zweiten großen Nationalmutterloge *Zu den drei Weltkugeln*.

Walter war der zweitälteste der insgesamt fünf Müller-Brüder Heinz (*unbekannt, aber vor 1905), Walter (*1905), Hans (*1907), Herbert (*1911) und Wolfgang (*1914). Heinz, Hans und Walter Müller wuchsen im Kaiserreich auf. Jeder in dieser Gesellschaft fand einen Platz in einem sozialen Gefüge, welches vorwiegend durch Fleiß, Gehorsam und nationalistischem Denken geprägt war. Das Deutsche Reich unter Wilhelm II. vermittelte das Gefühl von Sicherheit für die einzelnen getreuen Bürger. So war der 1. Weltkrieg, bzw. vielmehr das Ende des Krieges durch den 'Verrat' Sozialdemokraten und dem von den Alliierten Friedensvertrag umso erschütternder für die durch das Kaiserreich geprägte Familie Müller, so Wolfgang Müller. Die von häufigem Unterrichtsausfall und

⁴² Hildegard Gillem lebte zum Zeitpunkt meiner Kontaktaufnahme immer noch in Kalifornien und hat mir meine wenigen Fragen dankenswerterweise per Email beantwortet.

⁴³ vgl. Briefwechsel Müller an Wildhagen, 10.05.1957, Deutsches Museum Archiv München, NL024-11/26. Ich werde fortan aus Gründen der Einheitlichkeit "Walter" verwenden – exkl. Literaturangaben.

Notabitur gekennzeichnete Schulzeit der beiden ältesten Müller-Brüder fiel genau in diese Phase von Deutschlands Geschichte⁴⁴.

Neben der Schule interessierte sich der junge Walter Müller für Musik und Mathematik. Er spielte Harmonium und Klavier in der Schule und im Musikverein. Nach einem frustrierenden Erlebnis, bei dem er dem Schweizer Pianisten Edwin Fischer auf der Bühne bei einem Konzert in Koblenz beim Noten umblättern assistieren sollte, sah er angesichts des vermutlich hochkarätigen Vortrags von Fischer für sich mangels ausreichender musikalischer Fähigkeiten keine Zukunft in der Musik. Im Gegensatz dazu war er in der Mathematik talentiert und genoss im Schulunterricht eine Sonderbehandlung durch seinen Lehrer Martin Gaertner, der ihm zusätzlich schwerere Aufgaben der Analysis stellte, um ihn gezielt auf sein Studium an der Universität vorzubereiten. Laut eigenen Angaben habe er am Beginn seines Studiums schon das Niveau des dritten Semesters erreicht⁴⁵.

2.2 Die Studienjahre

"Walter war bedächtiger und nachdenklicher [als sein älterer Bruder Heinz, SK]
– ein Wissenschaftlertyp, von dem bohrenden Wunsch beseelt
in dieser Sparte etwas zu leisten." ⁴⁶

Nach seinem Abitur als Jahrgangsbester am Realgymnasium in Koblenz Ostern 1923 setzte auch er die Familientradition fort und begann das Studium für das höhere Lehramt an der Christian-Albrechts Universität zu Kiel. Dort förderte ihn besonders der Mathematiker Otto Toeplitz, welcher seit 1913 außerordentlicher und ab 1920 ordentlicher Professor in Kiel war. Durch dessen Engagement konnte Müller kostenfrei im Christian-Albrechts Haus wohnen und essen. Auf Grund der wirtschaftlichen Schwierigkeiten der Weimarer Republik gab es oft Probleme die Unterhaltskosten aufzubringen. Während der Inflationszeit war sogar das von Müller oft angeforderte Schicken von Geld durch seine Eltern per Post keine Lösung, da es entwertet angekommen wäre. Zeitgleich mit dem Beginn seines Studiums entwickelte sich die mathematische Atomphysik mit großen Schritten von Göttingen aus, so Müller⁴⁷. Er konnte durch den engen Kontakt mit Toeplitz, welcher in Göttingen sieben Jahre lang mit David Hilbert gearbeitet hatte, diese

⁴⁴ vgl. Müller, Heinrich: Aus meinem Leben, Memoiren, geschrieben 1936/37, Archiv des Hildagymnasiums Koblenz und Müller, Wolfgang: Ein Koblenzer Abiturient erlebt den 30. Januar 1933 und das Umfeld zu diesem Tag, geschrieben 1985, Archiv des Hildagymnasiums Koblenz.

 $^{^{45}}$ Müller etwa im Jahr 1930, S. 1, handschriftlicher Lebenslauf, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

⁴⁶ Müller, Wolfgang: Ein Koblenzer Abiturient erlebt den 30. Januar 1933 und das Umfeld zu diesem Tag, geschrieben 1985, Archiv des Hildagymnasiums Koblenz, S. 5.

 $^{^{\}rm 47}$ Müller etwa im Jahr 1930, S. 2, handschriftlicher Lebenslauf, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

Entwicklung sehr nah miterleben. Ein weiterer Wegbereiter auf diesem Gebiet war Hans Geiger (1882-1945), der 1925 nach den Koinzidenzexperimenten zum Compton Effekt mit Walther Bothe in Berlin den Ruf nach Kiel als Ordinarius und Institutsleiter der Physik erhielt.

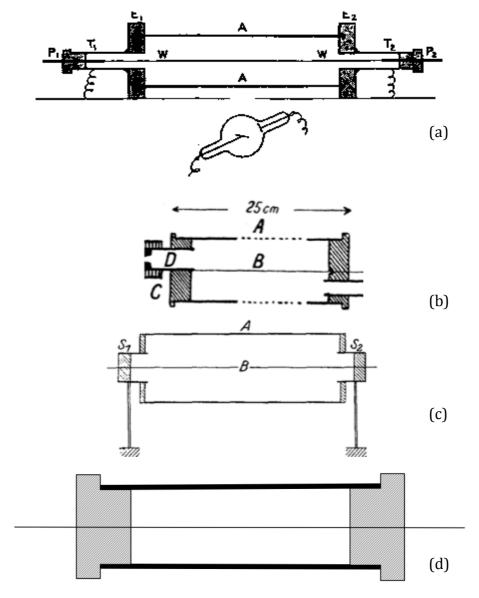


Abbildung 13: (a) P.J. Kirkbys Ionisationskammer von 1901 (aus Townsend 1915, 272); (b) Die Ionisationskammer von Rutherford und Geiger 1908b, 143; (c) Müllers Ionisationskammer von 1927/28 (aus Müller 1928a, 627. Mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg) und (d) Längsschnitt nach Laborbuchskizze⁴⁸ des Geiger-Müller Zählrohr Prototypen, Mai 1928.

 48 Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 21, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

_

Müller bewarb sich 1926 - also schon vor seinem Examen – als Doktorand bei Geiger und bekam nach einem Semester praktischer Übungen, wie z.B. in der Messung von Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten, schließlich die Stelle parallel zu seinem eigentlichen Studium. Seine erste Aufgabe war es Gasentladungen in einem Messingzylinder zu untersuchen. Er solle selbst noch herausfinden, was es im Nachgang zu vorangegangenen Experimenten von Kirkby, Rutherford und Geiger selbst noch wert wäre untersucht zu werden, so Geiger. Er habe während seiner Berliner Zeit keine Zeit mehr dafür gehabt (Abbildung 13). Laut eigenen Angaben erhielt er dazu noch 'das Buch von John Sealy Townsend' (vermutlich das 1910 erschienen *The Theory* of Ionisation of Gases by Collision) und ein Radiumpräparat. Er konnte zeigen, dass die positiven Ionen, die bei der Ionisation der Luft durch das Radium erzeugt werden nicht, wie angenommen, durch Stoßionisation zur Entladung beitragen, sondern durch Auslösen von Elektronen aus der Zylinderwand. Eine weitere Konsequenz seiner Ergebnisse war, dass durch die Mitwirkung des positiven Ions die Entladung im Zylinder bei entsprechender Hochspannung selbsttätig wird, da das ausgeschlagene Elektron weitere positive Ionen durch eine Kette von Stoßionisationen erzeugt, die wiederum neue Elektronen aus der Zylinderwand befreien können. Dadurch reißt die Entladung nicht ab, sondern muss durch einen Schalter im Stromkreis manuell unterbrochen werden.

Die Ergebnisse seiner Experimente, die auf der Variation des Drahtdurchmessers im Zylinder, der Spannung und des Gasdrucks basierten, reichten schließlich Anfang 1928 als Dissertation aus, da er mit seiner Messing-Ionisationskammer (Abbildung 13c) die Rolle des positiven Ions bei der selbsttätigen Entladung in Luft (Müller 1928b, Details zu der so betitelten Arbeit in Abschnitt II.4.1)⁴⁹ in Theorie und Praxis ausführlich darlegen konnte. Im April darauf legte er zusätzlich das Examen für das höhere Lehramt in den Fächern Physik, Mathematik und Philosophie ab, obwohl er eigentlich nicht mehr vor hatte in den Schuldienst zu gehen. Er bestand im Februar 1928 die mündliche Prüfung mit Hans Geiger in experimenteller Physik, Walther Kossel in theoretischer Physik, Otto Toeplitz in Mathematik und Heinrich Scholz in Philosophie. Müller schreibt hierzu:

In Philosophie hatte ich Glück, obwohl meine Kenntnisse gleich null waren, und in Kreisen der jungen Naturwissenschaftler Philosophie als Quatsch gewertet wurde. Zum Glück war der Prüfer der Philosoph Heinrich Scholz, der die mathematischen Seminare oft besucht hatte, und mit dem ich früher oft diskutiert hatte. So wurden mir Fragen über Grundlagen der Mathematik vorgelegt, die ich beantworten konnte, während ich bei Plato, Sokrates völlig verloren gewesen wäre. Deren Bedeutung habe ich erst viel später erkannt.⁵⁰

⁴⁹ sowie als Manuskript im Deutsches Museum Archiv München, NL024.

 $^{^{\}rm 50}$ autobiographischer Lebenslauf von Walter Müller um 1930, S. 4f, Deutsches Museum Archiv München, NL024 .

2.3 Die Assistentenjahre

Zum 1. April 1928 wurde der erst 22jährige grundständig promovierte Walter Müller am Physikalischen Institut der Christian-Albrechts Universität zu Kiel als Assistent bei seinem ehemaligen Doktorvater Hans Geiger für ein Monatsgehalt von 150 Mark angestellt. Finanziert wurde dieses Anstellungsverhältnis durch die 1920 gegründete Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft. Müllers Aufgabe für die vereinbarten drei Stunden Arbeitszeit pro Tag war es, neben dem Assistieren bei Geigers Vorlesungen, weitere Untersuchungen zum Compton-Effekt bei Röntgenstrahlen zusammen mit Geiger und Kossel durchzuführen. Neben dem Durcharbeiten Fachliteratur Vergabe von und der Aufträgen Mechanikerwerkstatt hatte er laut eigener Aussage dabei nicht viel zu tun, da das neue Semester erst am 1. Mai starten würde. Er widmete sich so nochmals seiner Apparatur aus seiner Dissertation, um zu versuchen, noch offen gebliebene Fragen zu klären.

Aus diesen Bemühungen resultierten die in Abschnitt II.3 detailliert dargestellte Entwicklung des Zählrohrs und die ersten Experimente mit dem neuen Instrument. Mit Begeisterung schrieb Müller während dieser Zeit nahezu wöchentlich an seine Eltern in Koblenz und berichtete über die Ereignisse, die erst ein Jahr lang geheim gehalten werden sollten, "ehe wir das Ding bekannt geben, und alle anderen Institute als Konkurrenz haben"51. Aber schon wenige Wochen später wurde das Zählrohr wohl auf Grund der überzeugenden Ergebnisse auf der Kieler Tagung des Gauvereins Niedersachsen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 7. Juli 1928 publik gemacht. Innerhalb der folgenden Wochen verbreitete sich Nachricht über das Zählrohr in ganz Europa. Müller hoffte nach der erfolgreichen Tagung in Kiel auf weitere Ergebnisse bis zur Physikertagung in Hamburg vom 16. bis 22. September 1928 und schrieb bereits Ende Juli 1928, dass er die Radioaktivität von Aluminium entdeckt hätte. Dies war aus heutiger Sicht und wie Müller später selber bemerkte ein Fehlschluss. Weitere Erwähnung gegenüber seinen Eltern, im Laborbuch oder gar in einer Publikation fand diese kurze Episode jedenfalls nicht⁵². Nach weiteren Verbesserungen am Zählrohr und dessen Peripherie im Laufe weniger Monate, über 100 konstruierten Zählrohren und zahlreichen Besuchen im Institut von auswärtigen Physikern kündigte Müller Anfang Juni 1929 seinen Vertrag mit der Notgemeinschaft zum 1. Oktober 1929 mit der Hoffnung auf eine besser bezahlte Stelle in Kiel oder einen Wechsel an eine andere Universität. Geiger, der im Juli die Verhandlungen mit Tübingen und München bezüglich einer ordentlichen Professur für Experimental-Physik

⁵¹ Müller an seine Eltern, 25.5.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

⁵² Müller an seine Eltern, 3.6. bis 7.9.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Näheres zu Müllers Aluminium-Verdacht in Abschnitt II.4.4. ,Das Elektronenzählrohr'.

begonnen hatte, stellte Müller in Aussicht, dass er dorthin übernommen werden würde. Nach langem Hinhalten offerierte Geiger ihm eine Assistentenstelle in Tübingen ähnlich zu der in Kiel, jedoch für nur 30 Mark mehr im Monat. Müller schrieb kurz darauf an seine Eltern:

Ich bin nämlich auf das äusserste empört, dass ich von Geiger tatsächlich in der übelsten Weise betrogen werden soll. Die Folge wird sein, dass ich zwar mit nach Tübingen gehen werde, aber bei der nächsten Gelegenheit mich verändern werde.⁵³

Wenige Tage später konnten sie dann erneut lesen:

Man stelle sich vor: Geiger bekommt auf meine Arbeiten hin einen Ruf und verbessert sich gewaltig. Alle Unbeteiligten verbessern sich: [Hermann] Zahn wird in Kiel fest angestellt, [Christian] Gerthsen wird Oberassistent in Tübingen und [Otto] Klemperer hat freie Bahn in Kiel zur Habilitation und vertritt im Institut mindestens für das nächste Semester. Der Posten von Gerthsen in Kiel fällt an 2 noch nicht promovierte Studenten, die jeder etwas mehr bekommen als ich. Nur ich soll unter gleichen Bedingungen für Jahre nach Tübingen. Ich finde das einfach zum Speien.⁵⁴

2.4 Die Jahre nach Geiger in Deutschland

Soweit kam es nicht. Der 24jährige Dr. Walter Müller nahm zum Oktober des Jahres eine Anstellung als Physiker bei den Siemens-Reiniger-Werken Hamburg in der Außenstelle in Rudolstadt, Thüringen an. Sein Arbeitsgebiet umfasste hier den medizinischen Einsatz der Röntgentechnik und die Entwicklung von Gasentladungsröhren. Der universitären wissenschaftlichen Forschung den Rücken zu kehren, war für Müller laut eigener retrospektiver Einschätzung ein wichtiger, aber auf lange Sicht fataler Schritt. Er wollte in der freien Wirtschaft seinen Horizont erweitern, dachte aber nicht an die geringer werdenden Rückkehroptionen in die Forschung. Nach der Heirat mit Marianne Höfer im Jahr 1935 und der Geburt seiner Tochter Hildegard zahlreichen Patentschriften, 1936, Vorträgen und Veröffentlichungen verließ er zum 1. April 1939 mit einer beträchtlichen Abfindung Rudolstadt. Während dieser Zeit, in der Müller sich im Bereich der Anwendung der Röntgentechnik einen Namen gemacht hatte, erlebte er einen seiner ersten Rückschläge. Auf einer Tagung der deutschen Röntgengesellschaft 1938 in München war er Gast bei einem Vortrag von

⁵³ Müller an seine Eltern, 18.9.1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

⁵⁴ Müller an seine Eltern, 22.9.1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Der gebürtige Däne und deutsche Physiker Christian Gerthsen promovierte bei Walther Kossel in Kiel und ist vor allen Dingen durch sein späteres Lehrbuch "Gerthsen Physik" bekannt. Hermann Zahn (1877- 1952) promovierte nach seinem Studium in Kiel 1901 in München mit einer Arbeit über Photometrie. Nach Assistenzstellen in München, Gießen und Berlin habilitierte er sich 1908 bei Geigers Vorgänger Conrad Dieterici in Kiel. 1913 wurde er zum Titular- (heute Honorar-) Professor ernannt. Nach Geigers Wechsel nach Tübingen übernahm er vertretungsweise die Leitung des Instituts bis 1931 und schlug daher das spätere Übernahmeangebot von Geiger nach Tübingen aus. Weitere Details über Zahns und Gerthsens akademische Karriere liefert Schmidt-Schönbeck 1965, 125ff. Aspekte von Otto Klemperers akademischer Karriere und seiner Arbeit mit Geiger sind Bestandteil der Abschnitte II.3 und II.4. Ein kurzer Überblick ist in Fußnote 225 zu finden.

Walter Gerlach, der über das Zählrohr referierte. Müllers Anteil an der Erfindung würdigte er jedoch nicht. Gerlach sprach fortwährend vom "Geigerzähler" anstatt vom Geiger-Müller Zählrohr, so Müller in einem Brief an Wildhagen in den 1950er Jahren⁵⁵. Müller war gerade von diesem Gremium und besonders von Gerlach enttäuscht, dass er so rücksichtlos ignoriert wurde. Auf ein Protestschreiben erhielt er seinen Darstellungen nach keine Antwort. Für das kommende Jahr wechselte Müller zur Julius Pintsch KG in Berlin, blieb dort jedoch nur etwa 14 Monate. Die Gasentladungsröhrentechnik war auch hier wieder sein Arbeitsbereich. Laut eigenen Angaben konnte er hier seine Kenntnisse und Erfahrungen in diesem Gebiet wesentlich vertiefen. Am 1. Juli 1940 ging er als Laboratoriumsleiter nach Hamburg zu C.H.F. Müller (genannt ,Röntgen Müller'), die kriegsbedingt von ihrem niederländischen Mutterkonzern Philips getrennt wurden. Müller leitete hier die technische Entwicklung von medizinisch genutzten Röntgenröhren. Nebenbei beschäftigte er sich mit der Gleichrichter- und Gasentladungslampen-Fabrikation. Die Bombardierung Hamburgs erlebte die seit 1939 um eine weitere Tochter reichere Familie hautnah, berichtet Hildegard Gillem. Stromausfälle und Fliegeralarme bestimmten das Leben. Als die Bombenangriffe immer stärker wurden, flüchtete Marianne Müller mit ihren Töchtern zu ihrer Mutter zurück nach Rudolstadt und kehrte alleine bis zum Kriegsende nach Hamburg zurück. Aus Angst vor der Übernahme des amerikanisch besetzen Thüringens durch die russischen Truppen und das mögliche Erpressungspotential gegen Müller ließ er seine Töchter Mitte 1945 zurück nach Hamburg bringen. Eine befreundete Familie aus Rudolstadt, die einen Platz auf einem Transportlaster hatte, nahm die beiden Schwestern auf die insgesamt fünf Tage dauernde Reise nach Hamburg mit⁵⁶. Mit dem Ende des Krieges endete Arbeitsverhältnis, da jedwede Forschung im Bereich der Atomphysik fortan verboten war. Er schlug sich als selbstständiger Physiker durch und arbeitete hauptsächlich als Berater für Fabriken und Laboratorien. Darunter waren zum Beispiel die *Phönix-Werke* in Hamburg-Harburg, für die er den Einsatz von radioaktivem Schwefel in Vulkanisierungsprozessen untersuchte. Im medizinischen Bereich testete er Natrium- und Schwefel-Isotope auf deren dermatologische Anwendbarkeit in Seifen. Diese Tätigkeiten brachten aber finanziell so wenig ein, dass "ich mich mit dem Einkommen eines Erwerbslosen wahrscheinlich besser stellen würde"57. Gleichzeitig führte er viele Prozesse gegen Nachahmer, die von ihm patentierte Röntgenröhren kopierten. 1949 stellte er auf einem Kongress der Deutschen

⁵⁵ vgl. Müller an Wildhagen, 10.5.1957, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

⁵⁶ vgl. persönliche Kommunikation mit H. Gillem, 6.6.2011, im Besitz des Autors.

⁵⁷ Müller im Jahr 1951, S.2, maschinenschriftlicher Lebenslauf, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

Röntgengesellschaft in Hamburg ein von ihm entwickeltes Zählrohr vor, das schwach radioaktiven Phosphor als Marker im Menschen detektieren konnte und hoffte damit ein letztes Mal auf wissenschaftliche Anerkennung. Am Ende seines 1951 zum Zweck einer Bewerbung beim Hydrographischen Institut verfassten Lebenslaufs resümierte er:

In einer Zeit, in der geistige Arbeit jeden Marktwert verloren hat, ist mein Potential an physikalisch technischem Können und Erfahrungen nahezu wertlos. Einige der von mir betreuten Firmen erkennen meine Tätigkeit zwar begeistert an, sind aber nur zu bescheidenen Zahlungen fähig. [...] Ich bitte daher das Hydrographische Institut dringend, mir meine schweren Existenzsorgen durch die Übertragung einer Position zu nehmen, zu der ich zweifellos die beste Qualifikation mitbringe.⁵⁸

Eine weitere Bewerbung schickte er an die sich gerade neu konstituierende *Physikalisch Technische Bundesanstalt*. Diese suchte einen Physiker für Strahlenschutz- und Zählrohrmessungen. Müller sah sich mit all seinen Qualifikationen und der Erfüllung der akademischen Anforderungen sowie der Maßgabe einer zu der Zeit noch wichtigen "anständige[n] politische[n] Conduite"⁵⁹ mehr als berufen für die Anstellung. Er bekam die Position jedoch nicht einmal angeboten und nahm stattdessen ein Angebot der australischen Regierung an für neun Monate als Berater für Elektrotechnik und Radioaktivität tätig zu sein.

2.5 Die, nach Australien

Im April 1951 kam Walter Müller zunächst ohne Frau und Kinder in Sydney, Australien an und wurde "mit großem Bahnhof"60 begrüßt. Während seiner gesamten Zeit im Dienste der australischen Regierung wurde er äußerst zuvorkommend behandelt und war nach eigenen Aussagen stets in der lokalen Presse präsent. Jedes Schulkind würde seinen Namen aus dem Zusammenhang der Zählrohrentwicklung kennen. Entsprechend prominenten Status hätte er im gesamten angelsächsischen Raum gehabt, so Müller.

Seine Aufgabe in Australien war die Inspektion von elektrotechnischen Fabriken und Universitäten sowie anderen öffentlichen Einrichtungen, wie Stadtverwaltungen im gesamten Land. Dazu gab er Anregungen, um betriebliche Prozesse und Strukturen zu optimieren. Er sah sich zuerst in Anbetracht des gewaltigen Fortschritts der Australier auf dem Gebiet der Elektrotechnik überfordert und hatte Angst den Anforderungen seines neuen Jobs nicht gerecht zu werden. Sein Arbeitgeber sah das anders und verlängerte seinen Vertrag um ein paar Monate. Nach Ablauf dieser Verlängerung entschloss er sich 1952 seine Frau und seine beiden Töchter

 $^{^{58}}$ Müller im Jahr 1951, S.3, maschinenschriftlicher Lebenslauf, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

⁵⁹ Müller an Balke, 15.9.1957, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

⁶⁰ Müller an Wildhagen, 10.5.1957, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

nach Australien nachkommen zu lassen und gänzlich zunächst in Melbourne und später Adelaide Fuß zu fassen. Am 24. September des selben Jahres meldete er sein erstes Patent auf ein Zählrohr mit dem Titel 'Müller-Geiger Counter' an. Es war ein mobiles, batteriebetriebenes Gerät bestehend aus einem dünnen, an einem langen Griff befestigten Zählrohr. In der zugehörigen Broschüre heißt es:

The counter is not only useful in the detection of Uranium ores, but owing to its sensitivity is indispensable in the subsequent treatment, development or otherwise, of such radioactive substances. γ - Radiation may be considered as a heavy poison, which in small quantities may be useful in medicine if properly applied, [...]. γ - Radiation is treacherous in that man cannot perceive it, and radioactive substances may occur in such small quantities as to be tasteless, odourless and invisible, notwithstanding their possibilities or designed, all Personnel, food, including growing food, and vegetables [...] and indeed everything with which mankind may come into contact, must be tested for radioactivity.[...] In the event of Atomic warfare the counter would be a great life saver in the hands of rescue teams [...] and private citizens. 61

Im gleichen Jahr, so Müller, ging der Uranrausch los, an dem er selber wohl nicht ganz unschuldig gewesen sei. Kurz nachdem er begonnen hatte, den "Müller-Geiger-Counter' in Australien zu vermarkten, wurde er zu einem der fünf Direktoren der 500km von Sydney entfernten Silver Valley Mine ernannt, in der kurz zuvor Uran gefunden wurde. Die Ausbeute war jedoch zu gering, als das sich ein längerfristiger Abbau gelohnt hätte. Zudem wurde Arsen im Erz der Mine entdeckt, dessen gesundheitliche Risiken den Einsatz von Bergmännern erschwerte. Auf Müllers Vorschlag hin kaufte die Gesellschaft daher Konzessionen an der Pazifikküste. Er hatte während seiner Dienstreisen im ganzen Land oft Mineralproben gesammelt und diese analysiert. Das in Küstennähe im Sand enthaltene Uran wollte er mit einer von ihm entwickelten Separationstechnik fördern. Insgesamt betrug die Ausbeute etwa 50kg Uran auf 1t Sand.

Anfang 1955 nahm er eine Anstellung bei der australischen Philips Gesellschaft an um sich mit einem sicheren Gehalt nebenberuflich wieder der wissenschaftlichen Forschung widmen zu können. Er sah sich im Zugzwang, da er sich mit den neusten Entwicklungen, wie der Transistortechnik noch nicht beschäftigt hatte. Sein privates Familienleben lief währenddessen in geordneten Bahnen. Mäßige Beanspruchung im Dienst und das angenehme Klima in Melbourne "würden keine Anzeichen der Managerkrankheit"62 auftreten lassen. In 10 bis 15 Jahren sei er so wohlhabend, dass er sich zur Ruhe setzen könne und zwar seinen Plänen nach in Deutschland. Trotz vieler deutschstämmiger Freunde in Australien habe er Heimweh. Der Briefwechsel bezüglich einer Anstellung in Deutschland im Jahr 1957 mit dem damaligen

 $^{^{61}}$ Broschüre des Müller-Geiger Counters von Müller Nuclear Industries, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

 $^{^{62}}$ Müller an Balke, 10.05.1957, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Der moderne und heute gängigere Begriff für Managerkrankheit ist Burnout-Syndrom.

Bundesminister für Atomfragen Siegfried Balke kam ihm daher wohl sehr recht. Balke war ein Schulfreund von einem seiner jüngeren Brüder. Dieser habe Balke gebeten Müller eine Anstellung in Deutschland zu verschaffen. Müller betont in seinem Antwortschreiben, dass er trotz der großen Annehmlichkeiten in Australien wieder in deutsche Dienste treten möchte. Später schreibt er jedoch an Thaddeus Trenn, dass diese Ausführungen wohl beim Minister eher als Hilferuf und nicht als patriotisches Angebot gedeutet wurden. Deshalb sei aus einer Rückkehr nach Deutschland nichts geworden⁶³.

2.6 Das Leben in den Vereinigten Staaten

Ein Jahr später, 1958, hatte Müller die Möglichkeit in die USA überzusiedeln. Zuerst flog er wiederum alleine in die Vereinigten Staaten um ein Jahr lang für Sylvania Lighting Services Corp. in Redwood City, Kalifornien zu arbeiten. 1959 folgte ihm seine Familie, mit der er gemeinsam nach Atherthon zog. Hildegard Müller besuchte ab 1960 die Universität in Berkeley in Kalifornien. Marianne und Walter Müller zogen in Folge dessen alleine in das etwa 500km südlicher gelegene Santa Barbara um, wo Müller eine Stelle als 'Research Physicist' bei General Telephone & Electronic Co. in Palo Alto, bei General Motors Defense Research Laboratories und der Vandenberg Airforce Base in Santa Barbara annahm⁶⁴. Ab 1963 arbeitete er dann als Senior Research Physicist im *Microwave Physics Laboratory* im *Aerospace Operations* Department. Laut seinen Forschungsunterlagen im Deutschen Museum arbeitete er dort auf dem Gebiet der Lasertechnik. Er folgte so dem damaligen Trend dieser gut finanzierten und von der Regierung unterstützten Arbeit (vgl. Bromberg 1993) und beschäftigte sich mit der Verkleinerung der Wellenlängen in den Submillimeter-Bereich. Dazu konstruierte und experimentierte er mit Quecksilber-Lasern.

Nach Müllers Pensionierung lebten er und seine Frau Marianne weiterhin in Santa Barbara. Marianne Müller verstarb im Juni 1975; Walter Müller kurz darauf am 4. Dezember 1979 im Alter von 74 Jahren.

⁶³ vgl. Müller an Trenn, 01.01.1977, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{64}}$ vgl. persönliche Kommunikation mit H. Gillem, 6.6.2011, im Besitz des Autors.



Abbildung 14: Walter Müller mit Dr. Vodicka bei General Motors Defense in San Carlos, Kalifornien (um 1960). Mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums in München. ⁶⁵

 $^{^{65}}$ Deutsches Museum München, Archiv, NL024.

3. Hans Geiger

Dieser biografische Teil über Hans Geiger wird vorwiegend durch zwei Sekundärquellen gespeist. Zum einen das von Claus-Peter Westrich herausgegebene Jahrbuch anlässlich des 100. Geburtstag von Hans Geiger und der zugehörigen Jubiläumsfeier in Geigers Heimatstadt Neustadt an der Weinstraße (Westrich 1982). Neben einer Festschrift besteht das Jahrbuch hauptsächlich aus dem Manuskript der von Geiger angefangenen Monographie *Experimentierkunst und Entdeckerfreuden*. Die zweite, umfangreichere Quelle ist eine von Edgar Swinne erstellte und kommentierte Sammlung von Primärquellen verschiedenster Herkunft, anhand derer Swinne Geigers akademische Karriere nachzeichnet (Swinne 1988).

3.1 Die Jugend- und Studienjahre

Johannes 'Hans' Wilhelm Geiger wurde am 30. September 1882 als Sohn des promovierten und in Erlangen habilitierten Indologen und späteren Gymnasiallehrers Wilhelm Geiger in Neustadt an der Weinstraße geboren. Bereits 1884 wechselte Wilhelm Geiger an das Max Gymnasium nach München und hielt parallel Vorlesungen an der Universität. Nachdem der junge Hans Geiger in München eingeschult wurde und drei Jahre lang die Volksschule besuchte, folgte sein Vater einem Ruf als ordentlicher Professor und zog mit seiner Familie nach Erlangen. Hans Geiger beendete seine Schullaufbahn schließlich in Erlangen am humanistischen Gymnasium *Friedericianum* im Jahr 1901 mit dem Abitur ⁶⁶.

Noch im gleichen Jahr schrieb er sich in Erlangen in den Fächern Mathematik und Physik ein. Bereits 1904 begann er mit den Arbeiten zu seiner Promotion bei Eilhard Wiedemann und bestand im Herbst die erste Lehramtsprüfung für Mathematik und Physik. 1906 folgte der zweite Teil des Examens und zugleich die Abgabe und Disputation seiner nur 39 Seiten langen Arbeit über *Strahlungs-, Temperatur- und Potentialmessungen in Entladungsröhren mit starken Strömen* (Geiger 1906). Die mündliche Prüfung fand am 23. Juli 1906 in den Fächern Physik, Mathematik und Geologie statt (vgl. Swinne 1988, 9ff.).

3.2 Geiger & Rutherford

"Wenn ich in meiner Erinnerung auch eingestellt war auf eine trostlose düstere Stadt, so war die Wirklichkeit doch schlimmer als alle Erwartungen" (Geiger rückblickend über Manchester, zit. nach Westrich 1982, 12)

Durch die Herausgabe der Beiblätter zu den Annalen der Physik zusammen mit seinem Vater und wohl auch durch sein großes Sprachtalent hatte

⁶⁶ An der gleichen Schule war auch der spätere Physiker Georg Simon Ohm (1789-1854) Schüler.

Geigers Doktorvater Wiedemann zahlreiche internationale Kontakte. Er vermittelte Geiger nach seiner Promotion an Arthur Schuster, der zu der Zeit Professor für Physik an der Universität in Manchester und renommierter Fachmann in der Gasentladungsforschung war. Geiger wurde 1906 sein Assistent.

Im Vergleich zu Universitäten in Deutschland sei das physikalische Institut in Manchester nur spärlich ausgestattet gewesen. Werkstätten jeglicher Art fehlten, sodass handwerkliche Arbeiten an Tischler, Glaser und Metaller in der näheren Umgebung abgegeben wurden (Westrich 1982, 10). Bereits 1907 emeritierte der 55jährige Arthur Schuster und räumte seinen Platz für Ernest Rutherford, der im Sommer 1907 die Stelle antrat. Geiger, dessen Auslandsaufenthalt nur auf das eine Jahr bei Schuster begrenzt war, zeigte ihm das Institut. Trotz eines Angebotes aus Erlangen durch seinen Doktorvater nahm er Rutherfords Einladung an unter dessen Institutsleitung in Manchester weiterzuarbeiten.

1908 erschienen ihre ersten beiden gemeinsamen Artikel in den *Proceedings* der Royal Society, die eine elektrische Methode zur Zählung von α-Teilchen bzw. deren Natur und Eigenschaften beschrieben (Rutherford & Geiger 1908b; Rutherford & Geiger 1908a). Diese Bemühungen ergaben für die Zeit wichtige Konstanten, wie die Lebensdauer des Radiums oder auch das Ionisationsvermögen von α-Strahlung. Dafür nutzten sie ein elektrisches Instrument zur direkten quantitativen Messung von radioaktiver Strahlung. Übergeordnetes Ziel dieser Arbeit war die Bestimmung der Ladung eines α-Teilchens, welche man mit Hilfe des schon bekannten Wertes der von Radium emittierten α-Partikel pro Sekunde vermeintlich leicht berechnen könne. Für diesen Zweck haben sie eine evakuierbare Messing Ionisationskammer (Abbildung 15, ,Detecting Vessel') gebaut, die nicht die Ladung des α-Partikels direkt, sondern dessen sekundäre Ionisation von Gasatomen bestimmen sollte. John Sealy Townsend hatte solche Versuche zur Stoßionisation schon wenige Jahre vorher durchgeführt und damit eine Grundlage für Rutherfords und Geigers Arbeit geschaffen. Townsends Schüler P.J. Kirkby verwendete für die experimentellen Arbeiten eine ähnliche Ionisationskammer (Kirkby 1902, Abbildung 13a).

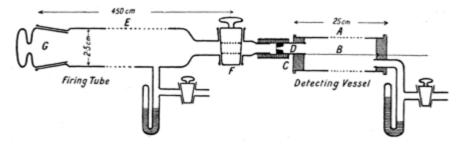


Abbildung 15: Ionisationskammer für α -Teilchen samt Peripherie nach Rutherford und Geiger (1908b, 143).

Tritt ein einzelnes α-Teilchen in die auf wenige Millimeter Quecksilbersäule evakuierte und auf Hochspannungspotential liegende Kammer ein wird die Ladung des α -Teilchens um ein Vielfaches verstärkt. Das α -Teilchen wird durch das elektrische Feld zwischen Gehäuse A und Draht B beschleunigt und kann dadurch auf seinem Weg zur Gehäusewand Moleküle des verbliebenen Restgases in der Kammer ionisieren. Die Verstärkung der Ladung und der Transport der Ladungsträger durch das verdünnte Gas über eine bestimmte Zeit lassen sich als Strom mit einem Elektrometer messen. Dabei ist die Amplitude der abfallenden Spannung abhängig von der angelegten Gehäusespannung. Je näher man an dem Wert ist, bei dem ein Durchschlag zwischen Gehäuse und Draht stattfindet, desto höher ist die registrierbare Amplitude des durch ein α-Teilchen initiierten Stromimpulses. Rutherford und Geiger merken explizit an, dass das Gehäuse der Kammer auf negativem da die Stromstärke bei liegen müsse, Erhöhung Gehäusespannung so gleichmäßiger steigen würde und sich im umgekehrten Fall die Stoßionisation erst nahe dem Funkenpotential bemerkbar machen würde. Zusätzlich wird ein weiteres Problem erwähnt:

Under such conditions, however, it was found impossible to avoid natural disturbances of the electrometer needle. [...] [They] were not numerous, but were sufficient to interfere with an accurate counting of the number of α -particles. These disturbances were inherent in the vessel and could not be got rid of by changing the pressure or nature of the gas or the diameter of the central wire. [...] any change of the applied voltage, and consequently of the magnification, altered the magnitude of the natural disturbances, and the throw due to an α particle in about the same ratio. In addition, it was observed that the number of the natural disturbances fell off rapidly with decrease of the diameter of the detecting tube. (Rutherford & Geiger 1908b,148f.)

Als Erklärung wird eine leichte natürliche Radioaktivität der Messingwände der Kammer genannt. Das Problem ein solches Artefakt ("natural disturbances") von einem tatsächlichen "Fakt" zu unterscheiden und in diesem Messkontext richtig zu interpretieren, wird hier das erste Mal beschrieben und zieht sich durch weitere Artikel der Folgejahre. Ein Ende dieser Diskussion schafft schließlich Walter Müller 1928, der mit seinem der Ionisationskammer fast baugleichen Zählrohr diese Störungen als Resultat der Höhenstrahlung und somit als konkrete Zählereignisse deutete. Rutherford und Geiger haben dieses Problem umgangen, in dem sie den Durchmesser ihrer Ionisationskammer mit zuletzt 1,7cm entsprechend klein gewählt haben⁶⁷. Zusätzlich haben sie die Gehäusespannung aus Angst vor Durchschlägen vergleichsweise klein gehalten.

⁶⁷ Retrospektiv gesehen und unter Kenntnis von Müllers Interpretation der Artefakte ist dieses Vorgehen nachvollziehbar, da mit Verkleinerung des Radius' auch die Oberfläche der Ionisationskammer und damit die für die Höhenstrahlung wirksame Fläche stark verringert wurde.

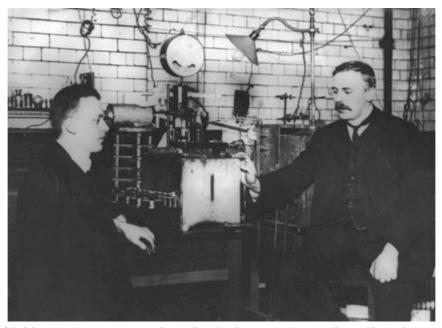


Abbildung 16: Geiger und Rutherford in Geigers Labor ('liquid air & research room') im Jahr 1912 im Kellergeschoss des Physikinstituts in Manchester. Mit freundlicher Genehmigung der Emilio Segre Visual Archives, American Institute of Physics College Park, MD, USA.



Abbildung 17: Grundriss der Keller- und Erdgeschosses des Physikinstituts in Manchester um 1912 (Todd 2012, 80). Markiert ist Geigers Labor im Kellergeschoss: "Liquid Air & Research, 55' 10" x 20'4" " Das entspricht einer Fläche von etwa 105 m². Mit freundlicher Genehmigung des Directorate of Estates and Facilities, Manchester University, UK. Drawing No. 013AB-B001.

Im gleichen Jahr 1908 und sogar im selben Zeitschriftenband der Proceedings folgt ein weiterer Artikel - diesmal aber von Geiger als alleinigem Autor. Er beschreibt hier die Streuung von α-Partikeln an Goldfolie, da sich diese experimentelle Untersuchung als ein wichtiger Faktor für den Erfolg der Ionisationskammer Experimente erweisen könnte⁶⁸. Einen weiteren Artikel über "Unregelmäßigkeiten" von radioaktiver Strahlung erscheint unter Geigers Namen im *Philosophical Magazine* im gleichen Jahr. Er wies hier auf der Basis von Arbeiten von Schweidler, Kohlrausch und eigenen experimentellen Bemühungen die statistische Natur des radioaktiven Zerfalls bzw. dessen statistischen Fehler als Wurzel des Erwartungswertes gemäß der Poisson-Verteilung nach und bestätigte damit die mathematische Grundlage für die Beschreibung von Zerfallsprozessen. Die Abweichungen zwischen theoretischer Erwartung und experimentellem Ergebnis liegt in seiner Arbeit bei 15%. Im Vergleich zu den Fehlern, die eine solche Messung sonst produziere, sei diese Abweichung aber auch hinsichtlich der schwierigen Kalibrierung des benutzten Elektrometers zu vertreten (Geiger 1908).

1909 begann der 20jährige Student Ernest Marsden (1889-1970) mit kleineren Forschungsarbeiten in der Arbeitsgruppe. Ohne ein aussagekräftiges Ergebnis zu erwarten schlug Rutherford vor: "'Lassen Sie [Geiger] ihn [Marsden] doch untersuchen, ob α -Teilchen so stark gestreut werden können, daß sie zurückfliegen.' " (zit. nach Swinne 1988, 19). Mit allseitigem Erstaunen konnten Geiger und Marsden diesen Effekt wenige Tage später mit einer Häufigkeit von 1 zu 10 000 durch Szintillationen⁶⁹ direkt beobachten. Mit den statistischen Gesetzen der Streuung von α -Teilchen war dieses Ergebnis jedoch nicht vereinbar, da die mittlere Ablenkung von α -Partikeln nur etwas mehr als ein Grad betrüge. Geiger selbst schreibt hierzu, dass sich zwei Jahre lang niemand für dieses Ergebnis interessiert hätte, obwohl eine spätere Konsequenz die Entdeckung des Atomkerns und der Niedergang des Thomson'schen Atommodell gewesen sei (vgl. Geiger & Marsden 1909, 1913). Erst 1911 veröffentlichte Rutherford schließlich die "Lösung' dieses Rätsels mit der Postulierung seines Atommodells.

Im gleichen Jahr trug Geigers Arbeit mit John Mitchel Nutall (1890-1970) erste Früchte. Sie lieferte die Geiger-Nutall'sche Beziehung zwischen der Reichweite von α -Strahlung und der Halbwertszeit eines radioaktiven

⁶⁸ "A special series of experiments by a new method were made by one of us [Geiger, SK] to determine the magnitude of this scattering in special cases." (Rutherford & Geiger 1908b, 151)

 $^{^{69}}$ Szintillationen sind in diesem Fall kleine Lichtblitze auf speziellen Einkristallen. Üblich war damals Zinksulfid, dessen durch α -Strahlung angeregte Moleküle unter Emission von sichtbarer elektromagnetischer Strahlung in ihren Grundzustand zurückfallen. Jeder durch den Beobachter wahrgenommene Lichtblitz wurde mit einem α -Partikel gleichgesetzt und erlaubte so deren 'direkte' Zählung.

Präparats, wonach Halbwertszeit und Reichweite umgekehrt proportional sind. Ein konkrete Gleichung wird nicht angegeben, da es für Geiger mehr eine empirische "Faustformel für den Laboratoriumsgebrauch" (Geiger zit. nach Haxel 1987, 291) darstellte (siehe auch Abschnitt I.2).

Neben seiner Tätigkeit im Labor war er auch Dozent in Manchester und gab zusammen mit Marsden und Walter Makower (1879-1945) den Einführungskurs zu Radioaktivität (Swinne 1988, 23). Zusammen mit Makower veröffentlichte er in diesem Zusammenhang im Jahr 1912 *Practical Measurements in Radio-Activity* 70 und als einer der ersten, so Lise Meitner, ein "Hilfsmittel bei wissenschaftlichen Untersuchungen [im Bereich der Radioaktivität, SK] von größtem Wert" 71.

Geiger kehrte schließlich als Experte für Messinstrumente des noch jungen Gebiets der Radioaktivitätsforschung 1912 nach Deutschland zurück. Er sollte zunächst die Professur für theoretische Physik in Tübingen besetzen. Dieses weniger privilegierte und der Experimentalphysik unterstellte Extraordinariat war dort seit 1911 vakant⁷². Geiger bekam jedoch ein besseres Angebot der *Physikalisch Technischen Reichsanstalt* (PTR) in (Berlin-)Charlottenburg. Er sollte dort Leiter des neu einzurichtenden "Laboratorium für Radiumforschung" werden. Am 1. Oktober 1912 trat er seinen Dienst an.

3.3 Geiger in Berlin an der PTR

Geigers Aufgabe an der PTR war hauptsächlich die Prüfung von Radiumpräparaten, die aus ganz Deutschland eingesandt wurden. Der Zweck war die Bestimmung des Radiumgehalts im Vergleich zu dem seit März 1912 von Marie Curie eingeführten neuen Standards von 21,99mg Radiumchlorid.

Der Spitzenzähler

Er betrieb aber auch Forschung, die an seine Arbeit in Manchester anknüpfte. Das letzte Projekt mit Rutherford Anfang 1912 hatte sich mit dem Bau eines Kugelzählers als Weiterentwicklung des elektrischen Zählers von 1908 beschäftigt. Es gelang Geiger jedoch nicht diesen in Berlin nachzubauen.

⁷⁰ Die Monographie kam 1920 in deutscher Übersetzung ein zweites Mal als *Meßmethoden auf dem Gebiete der Radioaktivität* heraus. Auf Grund des Krieges wurde wohl in Deutschland zeitlich verzögert publiziert. Auf Bitten von Geigers Doktorvater Wiedemann nahm dieser das Werk in seiner Reihe *Die Wissenschaft* auf. Das Buch ist Geigers erste und einzige Monographie.

⁷¹ Lise Meitner (1913) im Kontext einer Rezension des Buches in der *Physikalischen Zeitschrift* (14) sowie danach zur deutschen Edition in *Die Naturwissenschaften* (26) 1920, zit. nach Swinne (1988, 23).

⁷² Doch weder Geiger noch der Erstplatzierte Peter Debye nahmen die Position an, da "die Vorteile der Tübinger Stellung die jetzigen und künftigen Vorteile seiner [Debyes] Züricher Tätigkeit nicht aufzuwiegen vermöchten." (Senatsbericht des württembergischen Ministeriums für Kirchen- und Schulwesen über P. Debye, zit. nach: Swinne 1988, 29)

Geiger selbst bezeichnete den Kugelzähler daher als "Zufallstreffer" (Westrich 1982, 16). Auf Grund des ausbleibenden Erfolgs mit den Berliner Nachbauten des Kugelzählers ersetzte er die kugelförmige zentrale Elektrode durch eine negativ geladene zentrische Nähnadel. Das nun zylindrische und mit einem Eintrittsfenster versehene Gehäuse lag auf positivem und nicht mehr auf negativem Spannungspotential, wie die beiden Vorgänger von 1908 und 1912 (Abbildung 18).

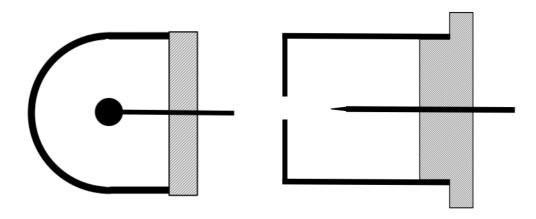


Abbildung 18: Längsschnitt eines Kugelzähler von 1912 (links) und Spitzenzähler (rechts) von 1913.

Der Zähler funktionierte zu Geigers Erstaunen nun auch bei Atmosphärendruck und reagierte nicht nur auf α - sondern auch auf β - Strahlung. 1913 veröffentlichte er das Ergebnis in den *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* (Geiger 1913), da es eine Methode zur elektrischen Registrierung von β -Strahlen bisher nicht gab. Auf Grund der Spitze der Nähnadel und der charakteristischen Spitzenentladungen sollte der neue Zähler fortan 'Spitzenzähler' heißen. In Fachkreisen setzte sich aber schnell die Bezeichnung Geigerzähler durch.

Mit Geiger kam James Chadwick aus Manchester mit nach Berlin an die PTR um dort weiterzuarbeiten. Der spätere Nobelpreisträger Walther Bothe wurde 1913 noch ohne Examen von dem PTR-Direktor Emil Warburg eingestellt. Dies geschah mit "Weitblick" schreibt Geiger (zit. nach Swinne 1988, 31), da er Bothes handwerkliche und experimentelle Fähigkeiten sehr schätzte. Chadwick und Bothe waren auch an der Entwicklung des Spitzenzählers beteiligt.

Der Kriegsausbruch im Sommer 1914 brachte die Arbeiten von Geigers Arbeitsgruppe an der PTR zum Erliegen. Chadwick wurde als gebürtiger Engländer und potentiell feindlicher Soldat im Kriegsgefangenenlager Berlin-Ruhleben interniert. Geiger wurde bereits am 3. August 1914 eingezogen. Während eines Aufenthalts in einem Lazarett in Erlangen schrieb er an Lise Meitner in Berlin:

Hier in der Langeweile der Klinik hat es mir wieder gedämmert, dass ich mich einmal für Radium und ähnliches interessiert habe. Jetzt habe ich sogar ein paar Druckbögen gelesen, die seit Ende Juli herum lagen. Auch das, was an der Reichsanstalt vor sich geht beschäftigt mich wieder. In meinem Lab.[or] ist alles fort, Herr Bothe dient bei einer Maschinengewehrabt[ei]l[un]g, Herr Kolhörster röntgt in Schwiebus [Westpreußen, SK] und Chadwick muss sich in Ruhleben unterhalten. Zwei von den Mechanikern sind auch weg und die beiden anderen müssen die Radioaktivität hochhalten, so gut es geht.⁷³

Geiger kam im Dezember 1918 zurück an die PTR. Bothe geriet 1915 in russische Kriegsgefangenschaft und kehrte erst 1920 aus Sibirien wieder nach Berlin zurück.

Anfang 1919 nahm Geiger seine alte Tätigkeit als Regierungsrat an der PTR wieder auf. Er widmete sich aber nicht nur dem Gebiet der Radioaktivität sondern auch zusammen mit Albert Einstein der sich gerade konstituierenden Quantenphysik. Einstein war zur gleichen Zeit an der PTR tätig war und beauftragte das Team Geiger-Bothe mit der experimentellen Prüfung seiner Theorie der Lichtemission. Eine gemeinsame Publikation ist aus dieser Zusammenarbeit jedoch nicht hervorgegangen (vgl. Haxel 1987, 293) 74 75.

Geigers Forschungsarbeit zu radioaktiver Strahlung an der PTR kurz nach dem Krieg fand vorwiegend mit dem seit 1914 promovierten Walther Bothe und dem ehemaligen Studienrat Dr. Werner Kolhörster statt, der seit 1922 erneut an der PTR tätig war. In diesem Jahr wurden auch erste Überlegungen zur Natur der durchdringenden Höhenstrahlung angestellt. Zusammen mit dem seit 1923 amtierenden Präsidenten der PTR Walther Nernst stellten die vier Physiker erste experimentelle Untersuchungen im Gletschereis der Alpen an (vgl. Swinne 1988, 44; Hoffmann 2012). Erste Veröffentlichungen dazu sollten aber erst 1926 von Kolhörster folgen.

Geigers und Bothes Haupttätigkeit bestand auch nach dem Krieg weiter in der Prüfung von eingesandten Radiumpräparaten. Gleichzeitig wollte Geiger sein mit Nutall aufgestelltes Reichweitengesetz für α -Strahler umfassend an sämtlichen bekannten α -Strahlern prüfen und erneut die Zahl der von 1g Radium pro Sekunde ausgesendeten α -Teilchen messen. Dies wäre das dritte Mal nach der 1908er Messung (3,48 \cdot 10¹⁰) und einer Arbeit von Victor Hess und Robert Lawson von 1918 (3,72 \cdot 10¹⁰, Lawson & Hess 1918 sowie Hess & Lawson 1924), aber diesmal mit Hilfe des neuen Spitzenzählers und mit gleichzeitiger Überprüfung durch Szintillationen. Die Neubestimmung zusammen mit A. Werner⁷⁶ ergab den Wert 3,40 \cdot 10¹⁰ und wurde 1924

⁷³ Geiger an Meitner, 18.11.1914, Meitner Nachlass MTNR, Churchill College Cambridge.

⁷⁴ Von Einstein gibt es zu diesem Thema zwei Publikationen: "Über ein den Elementarprozeß der Lichtemission betreffendes Experiment" (1922) und "Zur Theorie der Lichtfortpflanzung in dispergierenden Medien" (1922).

⁷⁵ Im Februar 1920 heiratete Hans Geiger Elisabeth Heffter.

⁷⁶ Über A. Werner konnte ich leider trotz intensiver Bemühungen nichts herausfinden.

veröffentlicht (Geiger & Werner 1924). Dieser erste Versuch einer Koinzidenzmethode durch synchrone Anwendung von zwei unterschiedlichen Methoden der Registrierung erbrachte auch den Nachweis dafür, dass der Spitzenzähler auf jedes α -Teilchen reagierte, welches in den Zähler eintritt. 1924 wurden diese Experimente abgeschlossen.

Geiger & Bothe vs. Bohr, Kramers & Slater

Die Koinzidenzmethode migrierte jedoch in Geigers nächstes Projekt in dem er einen experimentellen Beitrag zur Energieerhaltungstheorie von Niels Bohr, Hendrik Kramers und John Slater in der Quantenphysik leisten wollte; diesmal aber mit zwei Spitzenzählern und ohne Szintillationen. Zusammen mit Bothe stellte er daher Untersuchungen zum 1923 postulierten Compton-Effekt bei Röntgenstrahlung an (Compton 1923). Die Koinzidenzmethode diente hier jedoch nicht als statistische Absicherung des Messergebnisses, sondern um das gestreute Elektron und das gestreute Quant gleichzeitig detektieren zu können. Falls dies gelänge, wäre die Energieerhaltung auch in diesem Fall belegt und die Kopenhagener Superpositionstheorie von Bohr, Kramers und Slater widerlegt. Geiger schrieb, dass auf jedes 500ste Streuelektron an Zähler Nr. 1 nur ein registriertes Streuquant an Zähler Nr. 2 kam. Die experimentelle Schwierigkeit hätte darin bestanden, die zeitliche Übereinstimmung zu zeigen. Dies sei laut Geiger mit einer Genauigkeit von 1ms möglich gewesen (Westrich 1982, 13f.). Insgesamt konnten Geiger und Bothe 43 nicht zufällige koinzidente Zählungen von Photon und gestreutem Elektron in einer 333 Minuten langen Messung feststellen. Bei einer zeitlichen Auflösung von 1ms mussten dafür etwa 3km 1,5cm-Filmstreifen entwickelt und per Hand analysiert werden (Fick & Kant 2009, 401). Wolfgang Pauli hielt es schon 1925 "für ein ungeheures Glück", dass die "schönen Experimente von Geiger und Bothe" (zit. nach Swinne 1988, 47) den Fortgang der theoretischen Physik in die von Bohr und seinen Kollegen vorgeschlagene Richtung aufgehalten haben und sie so vor einer offensichtlichen Sackgasse bewahrt haben. Ein Schema des Aufbaus ist in Abbildung 19 zu sehen.

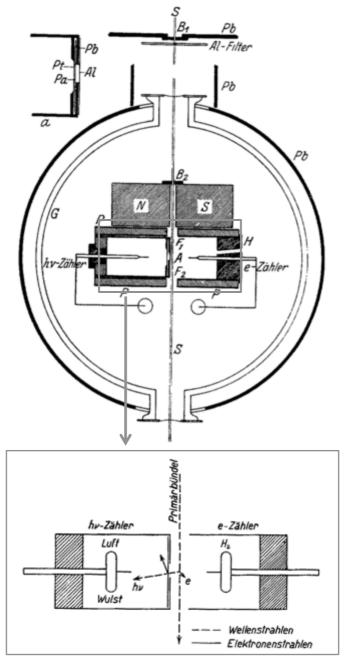


Abbildung 19: oben: Horizontalschnitt des Versuchsaufbaus von Geiger und Bothe (1925b, 641).⁷⁷ unten: Ausschnitt des Aufbaus mit den beiden Spitzenzählern und schematischen Darstellung des vermuteten Streuungseffektes (Bothe & Geiger 1925a, 441). Mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg.

 77 Die Glasglocke G war mit Wasserstoff unter Atmosphärendruck gefüllt. In einem Hohlzylinder PP aus Blei waren zwei gegenüberliegende Spitzenzähler eingebracht. Vor Eintritt in den Hohlzylinder passiert das Röntgenstrahl-Bündel S nach Filterung durch Aluminium (Al-Filter) eine Blende B_2 und ein homogenes Magnetfeld (Permanentmagnet N S). Die Compton-Elektronen werden an Punkt A vom e-Zähler in Wasserstoff-Atmosphäre gezählt. Der hv-Zähler ist mit Luft gefüllt und mit einer dünnen Platin Folie gegen die Wasserstoff-Atmosphäre abgedichtet. Von den Röntgenstrahlen erzeugte Sekundärelektronen in der Pt-Folie werden dann vom hv-Zähler gezählt.

Vor der Veröffentlichung der Ergebnisse schrieb Geiger an Niels Bohr, den er aus ihrer gemeinsamen Zeit bei Rutherford in Manchester gut kannte:

[...] Unsere Versuche sprechen allerdings sehr zu gunsten [sic] der älteren Auffassung von Compton und Debye. Wir möchten aber nichts unversucht lassen, um Ihre Theorie, die uns natürlich aufs lebhafteste interessiert, weiter zu prüfen.⁷⁸

Geiger und Bothe publizierten 1924/25 insgesamt drei Artikel, die erst ihr Vorhaben und schließlich das Ergebnis publik machten (Bothe & Geiger 1924, 1925a und 1925b)⁷⁹. Laborbücher, die die Koinzidenzexperimente detailliert beschreiben, existieren laut dem Berliner Bothe Experten Dieter Fick nicht mehr⁸⁰. Walter Müller beschrieb jedoch 1972 gegenüber Thaddeus Trenn in einem Brief ein Laborbuch, welches er Trenn zur Analyse geschickt hatte:

Die Einträge vom 23.3.1925 bis 3. Juli 1925 sind von Geiger geschriebene Protokolle über die berühmten Bothe-Geigerschen Versuche mit Koinzidenzen. Nur am 2.4.25 [...] hat jemand anders (vermutlich ein Assistent oder Bothe) Eintragungen gemacht [...]. 81

Dieses Laborbuch ist wahrscheinlich jenes, das in Müllers Nachlass in München zu finden ist. Bis auf den zitierten Teil zu den Koinzidenz-Experimenten stimmt der Inhalt des Buches nämlich mit Müllers weiteren Beschreibungen und den zugehörigen Erläuterungen überein. Die ersten Seiten sind jedoch augenscheinlich entfernt worden, da der erste Eintrag vom 20.9.1928 stammt. Müller schrieb weiter an Trenn, dass er das Laborbuch aus ökonomischen Gründen von Geiger übernommen hatte. Es wurde von vielen Mitgliedern der Arbeitsgruppe hauptsächlich für parallel zum Zählrohr laufende Experimente benutzt. Wo die ersten Seiten zu den Koinzidenzversuchen sind bzw. ob sie wissentlich entfernt wurden, konnte ich leider nicht herausfinden.

Geiger habilitierte sich am 15.12.1924 an der Berliner Friedrich-Wilhelm Universität mit seinen Schriften zur Reichweitenmessung von α -Strahlen und wurde auf Grund seiner bisherigen Leistungen von dem üblichen Kolloquium und den Probevorlesungen befreit. Gutachter seiner Arbeit war hier unter

⁷⁸ Geiger an Bohr, 17. April 1925, Archiv der Max Planck Gesellschaft Berlin (AMPG), III. Abteilung, Rep.59, lfd. Nr. 1.

⁷⁹ Bothe erhielt schließlich 1954 einen 'halben' Nobelpreis für Physik für diese Arbeit. Geiger starb 1945 und war damit für eine posthume Verleihung ausgeschlossen. Bothe wurde bereits 1934 von Jean-Baptiste Perrin für einen ungeteilten und 1949 von Erwin Madelung für einen mit Max Born geteilten Nobelpreis vorgeschlagen. Bothe selber hat 1937 mit seiner ersten und einzigen (eingeladenen) Nominierung Hans Geiger für einen ungeteilten Nobelpreis bedacht. Geiger wurde auch bereits 1935 von Walther Nernst nominiert. Alle Angaben umfassen auf Grund von der schwedischen Akademie der Wissenschaften praktizierten Verschwiegenheitsverpflichtung von 50 Jahren den Zeitraum bis 1901 – 1950, der von zuletzt von Elisabeth Crawford aufgearbeitet wurde (Crawford 2002).

⁸⁰ Diese Information stammt aus einem persönlichen Gespräch mit Dieter Fick. Für seine detaillierten Arbeiten mit Horst Kant über Bothe und auch die Koinzidenzexperimente siehe z.B. Fick & Kant 2008, Fick & Kant 2009.

⁸¹ Müller an Trenn, 20.4.1972, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

anderem Walther Nernst, der kurz zuvor zu Geigers Bedauern von der PTR an die Berliner Universität gewechselt hatte⁸². Am 30.9.1925 stellte Geiger den Antrag auf Entlassung aus dem Reichsdienst um den Ruf als ordentlicher Professor an die Universität Kiel wahrzunehmen. Walther Bothe übernahm Geigers Position an der PTR.

3.4 Geiger in Kiel

Geiger schrieb im November 1925 an den Chemiker Hans Georg Grimm: "Ich bin natürlich sehr gern hierher gegangen, denn einmal hat Kiel ein ziemlich geräumiges Institut und dann hat man Kossel, einen guten Theoretiker, der einem viel Anregung verspricht."83 Tatsächlich arbeitete Geiger zusammen mit dem seit 1921 in Kiel als Professor für theoretische Physik tätigen Walther Kossel an einem Projekt zu Röntgenstrahlen. Neu für Geiger war wohl die nun verpflichtende Lehrtätigkeit, die er in Kiel im Gegensatz zu seiner vorigen Position in Berlin nun erneut ausüben musste. Von studentischer und kollegialer Seite gab es bzgl. der Qualität seiner Vorlesungen in der Regel nur positive Rückmeldungen. Neben seiner Tätigkeit als Hochschullehrer und Forscher widmete er sich zusammen mit Karl Scheel der Herausgabe des 24-bändigen Handbuch der Physik 84. 1926 bekam Geiger mit Walter Müller seinen ersten Doktoranden in Kiel, der nach seiner Promotion ab April 1928 auch sein erster Privatassistent wurde. Zusammen mit ihm entwickelte er das zunächst Elektronenzählrohr genannte Instrument, das später als Geiger-Müller Zählrohr ein wichtiges Instrument der kernphysikalischen Forschung werden sollte (siehe hierzu Abschnitt II.4). Im Kontext dieser Entwicklung empfing er in Kiel oft Besuch von alten Kollegen oder deren Assistenten aus seiner Zeit mit Rutherford in Manchester. Darunter waren Niels Bohr und Georg von Hevesy. Ähnlich wie Rutherford nahm er seine Gäste bei sich zu Hause auf und war so auch privat Gastgeber⁸⁵. Während Bohr aus dem nahen Kopenhagen selbst anreiste, schickte Rutherford seinen Assistenten Hugh Webster und Georg von Hevesy seinen Assistenten Seith nach Kiel. Es fällt auf, dass die meisten dieser und anderer mehr oder weniger prominenten Besucher nicht nur alte Kollegen oder Freunde Geigers waren, sondern auch wie deren gemeinsamer Lehrer Rutherford Nobelpreisträger (siehe hierzu auch Fußnote 79). Geiger selbst

⁸² Geiger an v.Hevesy, 19.3.1924, Bohr Archive Kopenhagen.

⁸³ Geiger an Grimm im November 1925, zit. nach. Swinne 1988, 49. Die Originale der Briefe liegen im Archiv des Deutschen Museums, Nachlass NL 046.

⁸⁴ Die von ihm selbst redigierten Bände 22 und 23 erschienen bereits 1933 in der zweiten Auflage, da es bereits im Sommer 1930 ausverkauft war. Zur gleichen Zeit erschien auch der letzte Band der ersten Auflage des Handbuchs, vgl. Swinne 1988, 53 ff..

⁸⁵ Geiger wohnte in Kiel am Strandweg 78 direkt an der Ostseite der Kieler Förde. Das physikalische Institut war an der Fleckenstraße in Kiel (an der westlichen Seite der Förde) bis es im zweiten Weltkrieg zerstört wurde.

zählte spätestens nach der Entwicklung des Zählrohrs selbst zur international renommierten Spitze der physikalischen Forschung zu der Zeit (vgl. Swinne 1988, 49ff.).

3.5 Geiger in Tübingen

Mit Walther Gerlachs Wechsel von Tübingen nach München wurde Hans Geiger auf den dortigen Lehrstuhl für Experimentalphysik berufen. Er trat seine bereits am 6. August 1929 zugesagte Stelle zum 1. Oktober 1929 an. Mit ihm sollten auf Geigers Wunsch die schon von Müller erwähnten Mitarbeiter Hermann Zahn und der kürzlich habilitierte Christian Gerthsen von Kiel nach Tübingen wechseln, aber nicht sein Privatassistent Walter Müller⁸⁶.

Kurz nach seinem Wechsel erhielt er am 30. November 1929 von der Royal Society die *Hughes Medal*. Er schrieb dazu wenige Tage vorher an Rutherford, der ihn darüber in Kenntnis gesetzt hatte:

It is indeed a high honour for me that the Royal Society has awarded to me the Hughes Medal and that my modest contributions to Physics have found such a high recognition. I am of course very proud about all this and so is my wife.

Bezüglich seines Wechsels nach Tübingen schreibt er weiter:

[...] Your letter to Kiel has reache[d] me in Tübingen where I have taken charge of the Physical Laboratory which was previously under Paschen and later under Gerlach. It is only three weeks ago that this change has taken place. On the whole I think that Tübingen means a considerable improvement to me since the laboratory is about twice as large and the financial aids considerably higher compared with Kiel.⁸⁷

Geiger setzte seine Untersuchungen zur Höhenstrahlung in Tübingen fort, die er schon in Berlin zusammen mit Kolhörster und Bothe begonnen hatte und auch zuletzt in Kiel mit Müller intensiv betrieb. Weiterhin betreute er viele Dissertationen, die sich u.a. mit diesem Thema auseinandersetzen⁸⁸. Dieser Umstand und seine Pflichten als Institutsdirektor ließen ihm kaum Zeit für eigene Arbeit, so Schmidt-Schönbeck (1965, 136ff.). 1931 lehnte Geiger den Ruf nach Heidelberg auf Philip Lenards Lehrstuhl ab. Schon im ersten Berufungsverfahren 1927 wurde Geiger als Nachfolger neben James Franck

_

⁸⁶ In Kiel übernahm erst im Jahr 1931 Heinrich Rausch von Traubenberg (1880-1944) das Ordinariat von Geiger und die Leitung des physikalischen Instituts in Kiel. Er war zuvor seit 1922 Ordinarius an der deutschen Universität in Prag. Dort beschäftigte er sich mit Problemen der Atom- und Quantenphysik, u.a. mit der experimentellen Bestätigung von Schrödingers Wellenmechanik. 1937 wird ihm aus politischen Gründen die Lehrbefugnis entzogen. Daraufhin siedelte er nach Berlin-Charlottenburg und forschte fortan privat sowie mit Otto Hahns Hilfe am Kaiser-Wilhelm-Institut. Nach den ersten Bombenangriffen auf Berlin flüchtet er zusammen mit seiner Frau zurück in das damalige Sudetenland (Hirschberg am See). Nach der Deportierung seiner Frau in das nahe Konzentrationslager Theresienstadt 1944 starb Rausch von Traubenberg an einem Herzschlag, vgl. Schmidt-Schönbeck 1965, 149ff.

⁸⁷Geiger an Rutherford, 13. November 1929. Cambridge University Library, Department of Manuscripts and University Archives; Ernest, Lord Rutherford: Correspondence and Papers, MS Add.7653 666.

⁸⁸ Eine personelle und inhaltliche Übersicht über diese Arbeiten liefert Swinne 1988, 63ff.

und Gustav Hertz gehandelt. Diese Liste hatte Lenard jedoch selbst abgelehnt, da für seine Nachfolge "zwei Juden und ein Anglophiler" (zit. nach Swinne 1988, 66) in Betracht gezogen wurden. Lenard zog sein vorzeitiges Pensionierungsgesuch daher zurück, bis er schließlich 1931 sein endgültiges Pensionsalter erreichte. Neben Geiger lehnten den Ruf nach Heidelberg auch Walther Gerlach und Carl Ramsauer ab⁸⁹. Die württembergische Regierung erhöhte auf Grund seines Verbleibs in Tübingen Geigers Bezahlung und sagte ihm die Einstellung eines zweiten Labormechanikers sowie Mittel für die apparative Ausstattung seines Instituts zu. Ein damaliger Doktorand von Geiger, Ernst Stuhlinger, schrieb 1984 anlässlich des 100. Geburtstags seines Lehr-Forschungstätigkeit **Doktorvaters** über seine und unmissverständlich pathetischem Ton:

Unvergeßlich bleiben seine Vorlesungen. Jede einzelne war ein Meisterwerk in ihrer Klarheit und Eindringlichkeit, jede war vollkommen nach Aufbau und Inhalt, jede war pünklichst vorbereitet. Alle Versuche gelangen aufs beste; das Ohm'sche Gesetz stimmte innerhalb der Nadelbreite der Instrumente, die Fraunhofer'schen Linien erschienen, wo sie erwartet wurden, die Interferenzfiguren waren im ganzen Hörsaal sichtbar. [...] An jedem Tag, den Geiger im Institut verbrachte besuchte er jeden seiner zwölf bis fünfzehn Assistenten, Doktoranden und Kandidaten. Jeden frug er, wie es ihm ginge, was für Fortschritte er gemacht habe, und welchen Problemen er gegenüberstünde. Am meisten freute er sich, wenn man ihm neue Messungen zeigen konnte. Dann war er unermüdlich in dem Bestreben, die Daten zu verstehen und zu deuten, Zusammenhänge zu sehen, schwache Stellen zu prüfen und neue Messungen zur Verifikation der alten vorzuschlagen. Das Experiment war für ihn der entscheidende Weg zum Verstehen der Natur. Er traute ihm weit mehr als der spekulierenden Theorie. (Stuhlinger 1984, 159f.)

Nach der Machtergreifung der Nationalsozialisten im Frühjahr 1933 wurde im Herbst des Jahres das Führerprinzip auch in Tübingen eingeführt. Geiger wurde in diesem Zuge stellvertretender 'Führer' der Universität, obgleich er kein Mitglied der NSDAP war. In einem Tübinger Senatsgutachten heißt es, dass "[ü]ber seine [Geigers, SK] politische Qualitäten [...] kein einstimmiges Urteil [vorliegt], jedoch ist nicht Nachteiliges bekannt." (zit. nach Swinne 1988, 74). Mehrere solcher Gutachten führten dazu, dass Geiger 1936 auf Gustav Hertz' Lehrstuhl an der Technischen Hochschule Charlottenburg berufen wurde, obwohl er im Mai 1936 zusammen mit Werner Heisenberg und Wilhelm Wien einen Aufsatz veröffentlichte, der die akute, forschungsfeindliche und nationalsozialistische Politik anprangerte, auf Grund derer u.a. Gustav Hertz seine Professur wegen seiner jüdischen Abstammung⁹⁰ für Geiger räumen musste (Cassidy 1979, 378f.).

⁸⁹ Kurzzeitig besetzte dann Walther Bothe Lenards Lehrstuhl bis er 1934 als Direktor des physikalischen Instituts an das Kaiser Wilhelm Institut für medizinische Forschung berufen wurde.

⁹⁰ Gustav Hertz' Großvater war Jude und sein Enkel somit im nationalsozialistischem Sprech "Mischling zweiten Grades" (vgl. Cassidy 1979, 375). Hertz trat Ende Juni 1935 zurück.

3.6 Geiger in Berlin an der TH Berlin-Charlottenburg

Geigers politisch initiierter Wechsel an die Technische Hochschule, trotz seiner Agitation vor allem gegen Lenards und Starks 'deutsche Physik', geschah zum 1. Oktober 1936 und das obwohl Lenards Mitstreiter Johannes Stark zu der Zeit Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt und der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaften war. Schon seit der Machtübernahme der Nationalsozialisten wurde der Forschungsetat stetig gekürzt und u.a. zu Gunsten von wehrtechnischen Physikkursen umverteilt. In den Plänen für die in Aussicht gestellte Adolf-Hitler Universität in Berlin sollte die Physik unter der Leitung von Geiger und Wilhelm Westphal in einem "Sonderinstitut für Physik für Ingenieure" aufgehen. Alternative Pläne sahen vor, dass die Chemie, die Physik und die physikalische Chemie der Friedrich-Wilhelms-Universität Berlin (ab 1946 Humboldt Universität) und der Technischen Hochschule (ab 1946 Technische Universität) zu reinen Lehrzwecken zusammengelegt werden und nur noch das Kaiser-Wilhelm Institut in Berlin in geringem Umfang physikalische Forschung betreiben sollte (Cassidy 1979, 376). Um diesen Bestrebungen der Politik Paroli zu bieten, wurde Geiger 1939, so Cassidy, als Berliner Vertreter in den Vorstand der DPG gewählt. Bereits 1937 wurde er zum Herausgeber des Gesellschafts-Organs Zeitschrift für Physik bestellt, da Karl Scheel 1936 verstorben war. Geiger übernahm die Tätigkeit mit Band 104. Mit Scheel zusammen hatte Geiger schon das Handbuch für Physik herausgegeben. Neben dieser literarischen Tätigkeit war er Mitglied der Preußischen Akademie der Wissenschaften, der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin sowie engagiert bei der Gesellschaft von Freunden der Technischen Hochschule Berlin. Nach der erfolgreichen Kernspaltung von Otto Hahn und Fritz Straßmann Ende 1938 am Kaiser-Wilhelm Institut wurde Geiger aktives Mitglied des 1939 neu gegründeten Uran-Vereins. Am 14. September 1939 wurde Geiger schließlich zum Kriegsdienst einberufen. Statt an die Front geschickt zu werden, erhielten er und andere führende Physiker in Berlin spezielle, wehrpraktische Aufgaben, die mit der Nutzung von Kernenergie zu tun hatten. Während sich Otto Haxel, Helmut Volz und Ernst Stuhlinger der Moderation von Neutronen widmeten, übernahm Geiger lediglich Volz' Vorlesungen ohne einen speziellen Forschungsauftrag zu haben, obwohl er sich gegenüber dem zunächst Kernwaffen-skeptischen Heereswaffenamt deutlich für die Erforschung der Kernenergie ausgesprochen hatte, so Kurt Diebner, der zu der Zeit Kernphysiker beim Heereswaffenamt war: "Die Unterredung verlief durchaus positiv, und Geiger bestärkte die beiden Herren darin, Versuche zur Freisetzung der Kernenergie in Angriff zu nehmen." (Kurt Diebner, zit nach Cassidy 1979, 382). Cassidy bemerkt aber auch, dass sich aus Geigers dokumentierter Wortwahl in diesem Kontext keine Rückschlüsse auf einen potentiell favorisierten Bau einer Atombombe

ziehen lassen können. Dennoch führte der damalige Hype um die Kernspaltung dazu, dass nicht nur kernphysikalische Forschung während des Krieges stark gefördert wurde, sondern auch eine Vielzahl von wissenschaftlichen Projekte nicht-nuklearer Natur.

Obwohl sich Geigers schon länger instabiler Gesundheitszustand nicht besserte, nahm er 1943 seine Vorlesungstätigkeit sporadisch wieder auf bis das physikalische Institut nach mehreren massiven Bombenangriffen 1945 geschlossen wurde. Nach der Besetzung Berlins wurde Geigers Haus in Potsdam-Babelsberg beschlagnahmt, demoliert und für die Reparatur anderer Häuser teilweise demontiert. Geiger starb schließlich am 24. September 1945 im Alter von 63 Jahren in einem Notquartier (Cassidy 1979, 383; Laue & Pohl 1947).

Geiger und der Nationalsozialismus

Fasst man alle vorliegenden Dokumente und Einschätzungen Dritter zusammen (Swinne 1988, 81) so kann man konstatieren, dass sich Geiger mit Ausnahme der Denkschrift von 1936 nie öffentlich für oder gegen das herrschende Regime der Nationalsozialisten ausgesprochen hat. Unter seiner Mitarbeit im Gauverein Berlin der DPG sowie als dessen Vertreter im Hauptverein konnte sich die DPG bis 1940 gegen die Gleichschaltung und das Führerprinzip behaupten. Liselotte Herforth, damals Studentin bei Geiger an der TH, berichtet, dass Geiger mit ihr zusammen noch 1939/40 eine befreundete Halbjüdin zum Diplom zugelassen hatte. Ernst Stuhlinger merkt ebenfalls an, dass Geiger mehreren nicht-geduldeten Kollegen - darunter auch sein alter Kieler Kollege Otto Klemperer - mit Hilfe seiner vor allem britischen Kontakte geholfen hat, im Ausland Fuß zu fassen (vgl. Swinne 1988, 86). Noch 1937 bekam er trotz Hitlers immer deutlicher akzentuierteren Bestrebungen von der *London Physical Society* die Duddell-Medaille nach Wolfgang Gaede 1932 als zweiter Deutscher verliehen.

4. Die Analyse der Entwicklung des Elektronenzählrohrs mit dem Ziel des Nachbaus

4.1 Müller und Geiger in Kiel

Während Geiger in den Berufungsverhandlungen um die vakante Stelle des ordentlichen Professors für Experimentalphysik in Kiel steckte und sich letztendlich gegen die namenhaften Mitbewerber Walther Gerlach, Carl Ramsauer und Wolfgang Gaede durchsetzte, studierte Walter Müller bereits seit 1923 Physik und Mathematik für das höhere Lehramt an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.





Abbildung 20: links: Hans Geiger (aus: Laue & Pohl 1947) und rechts: Walter Müller als Student in Kiel⁹¹. Mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums München.

1926 folgte Hans Geiger schließlich dem pensionierten Institutsleiter und Thermodynamiker Conrad Dieterici (1858-1929). Müller bewarb sich schon vor seinem Examen im gleichen Jahr um eine Stelle als Doktorand bei Geiger. Im Februar 1928 schloss er sein Studium mit seiner Promotion zum Dr. der Philosophie ab. Anschließend trat Müller zum 1. April 1928 als Assistent in Geigers Dienste. Auf Grund seiner zunächst geringen Arbeitsbelastung (siehe Abschnitt II.2.3) widmete er sich nochmals seiner Apparatur aus seiner Dissertation, um zu versuchen noch offen gebliebene Fragen zu klären. Diese frühere Arbeit beschäftigte sich mit der Charakterisierung des Strom-Spannungsverhaltens von Ionisationskammern bei verschiedenen Drucken

⁹¹ Deutsches Museum Archiv, NL 024-08.

und Gasen. Dazu nutzte er neben seiner von Kirkby inspirierten Ionisationskammer (Abbildung 13a, S. 47) eine einfache Messschaltung. Statt einer Röntgenröhre benutzte er jedoch ein radioaktives Präparat von 2mg Radiumäquivalent zur Ionisation.

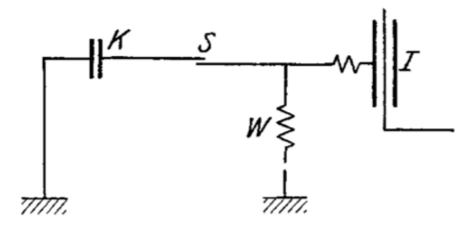


Abbildung 21: Schaltbild zu Müllers Versuchen mit der Ionisationskammer I inkl. einem nicht eingezeichneten Vorschaltwiderstand von 40 Ω . K ist ein Kondensator mit 0,05 μ F, S ein Schalter, der mit einer Glimmerfolie betätigt wird⁹² und W, einem Erdungswiderstand ("Wasserwiderstand") mit 3 bis 980 $k\Omega$. Der Draht liegt auf positivem Potential. (Müller 1928b, 643) Mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg.

Die Ionisationskammer und Peripheriegeräte waren im April 1928 bereits auseinander gebaut und im Keller eingelagert. Ihm gelang es die einzelnen Teile zu finden und sich zusätzlich fehlende Geräte von Kollegen zu leihen. Er wollte laut seinem Lebenslauf⁹³ der Frage nachgehen, was passiert, wenn man die Ionisation durch das radioaktive Präparat verringert, jedoch trotzdem die Spannung am Zylinder erhöht. Erfahrungsgemäß sollten sich die schon von Geiger und Rutherford beschriebenen wilden Entladungen immer stärker bemerkbar machen. Tatsächlich stellte er aber fest, dass bei völliger Entfernung der radioaktiven Quelle die mit einem Quadrantenelektrometer registrierten Spannungsimpulse merklich reduziert wurden, aber nicht komplett verschwanden. Aus seiner Schaltung (Abbildung 21) baute er anschließend den Schalter aus, der noch im Februar die durch das radioaktive Präparat induzierten Dauerentladungen manuell löschen sollte. Es traten aber immer noch einige wenige Entladungen in unregelmäßigen Abständen auf, die aber im Durchschnitt pro Minute konstant blieben. Wenige Tage später demonstrierte er Geiger diesen Effekt, der begeistert von

^{92 &}quot;Die beiden Kontaktstellen waren federnd gegeneinander gepreßt. Das Öffnen geschah durch Zwischenschieben einer dünnen Glimmerfolie, das Schließen durch schnelles Herausziehen derselben." (Müller 1928a, 643)

⁹³ Müller etwa im Jahr 1930, handschriftlicher Lebenslauf, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

einem neuen Instrument zur Messung der Höhenstrahlung sprach, die bezüglich ihrer Wirkung auf Meeresniveau zu der Zeit noch sehr umstritten war⁹⁴. Geiger glaubte jedoch an den erdnahen Effekt, da er in Berlin mit dem Höhenstrahlungs-Pionier Werner Kolhörster (1887-1946) kurz vor seiner Berufung nach Kiel zusammengearbeitet hatte. Neben der Messung der Höhenstrahlung führte Müller auch Messungen an Kalium⁹⁵ durch, von dem bisher nur dessen β -Strahlung seit 1905 bekannt war. Müller ging davon aus, dass die Vermutung, wonach β -Strahler auch γ -Strahlung emittieren, bis dato noch nicht beim Kalium gezeigt werden konnte. Durch Abschirmen der β -Komponente durch Bleiplatten⁹⁶ zeigten sich am Zählrohr folglich nur die von der γ -Strahlung verursachten Impulse, obwohl Müller in der Endphase dieser Experimente nur wenige Gramm Kaliumchlorid verwendete. Er war begeistert von diesem Nachweis, da schon seit Jahren keine radioaktive Substanz mehr näher klassifiziert worden war. Wenig später stellte sich aber heraus, dass Kolhörster den Beleg schon kurz zuvor mit Hilfe eines Spitzenzählers geliefert hatte – jedoch im Kali-Bergwerk des anhaltinischen Stassfurt unter Verwendung von mehreren Tonnen Kalium, die dort im Gestein enthalten waren⁹⁷. Das von Müller (wieder-)entdeckte und von ihm Geiger re-interpretierte Spannungssignal sowie Müllers Ionisationskammer bildeten so die phänomenologische und apparative Grundlage für das spätere Elektronenzählrohr.

4.2 Das Laborbuch als paraphrasierende Informationsquelle

Präambel

wissenschaftlicher Korrespondenz bilden Laborbücher reichhaltigste Quelle für Informationen zu einem quellengetreuen Nachbau oder Nachvollzug eines Experimentes. Veröffentlichungen Fachzeitschriften geben in der Regel nur Auskunft über Ergebnisse und Resultate eines Experimentes und nicht über deren Genese (Sichau 2000). Nach Holmes et al. (Holmes et al. 2003a) haben Aufzeichnungen in Laborbüchern Charakteristika. spezielle die sie für die

⁹⁴ Müller an seine Eltern, 8.2.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30 und Müller an Wildhagen, 10.05.1957, S. 4f, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

⁹⁵ Das natürlich vorkommende Kalium Isotop K-40 ist radioaktiv, bildet etwa 0,012% des gesamten Kaliumvorkommens aus und hat mit etwa 1,3 Milliarden Jahren eine sehr lange Halbwertszeit. Die ebenfalls natürlichen und primordialen Isotope K-39 und K-41 sind nicht radioaktiv und bilden den überwiegenden Anteil des Kaliumvorkommens.

 $^{^{96}}$ Warum Müller Bleiplatten zur Abschirmung benutzte, obwohl schon wenige Millimeter Aluminium ausreichen würden, ist unklar.

⁹⁷ vgl. Müller etwa im Jahr 1930, S. 5f, handschriftlicher Lebenslauf, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

Wissenschaftsgeschichtsschreibung besonders wertvoll erscheinen lassen: Laborbücher stellen eine unzensierte, aber oft routiniert erstellte Vorstufe einer später durch den Forschenden linearisierten und in der Regel auch so publizierten Version von wissenschaftlicher Forschung dar. Sie enthalten neben den später publizierten Forschungsergebnissen auch übergangene Fehlschläge und verworfene Experimente und repräsentieren individuellen Forschungsprozess in ausgezeichneter Weise. Besonderheit erhält das Laborbuch durch die spezielle Art und Weise, wie Aufzeichnungen darin vorgenommen werden, die aber in der Regel auf Grund der vielen Randbedingungen nicht umfassend und allgemeingültig erfasst werden kann. Das an den Forschenden selbst adressierte Laborbuch präsentiert sich oft als eine Sammlung aus privaten Notizen, Kritzeleien, Messtabellen, Gedächtnisstützen, Literaturhinweisen ohne die Zwänge eines theoretischen Formalismus bzgl. Form, Inhalt und Struktur einhalten zu müssen. Eventuelle Korrekturen von Einträgen sind in Einzelfällen ebenfalls sichtbar und portraitieren wissenschaftliche Forschung nicht als ein abgeschlossenes System sondern als einen Prozess zwischen bürgerlichen Kulturtechnik des Schreibens und wissenschaftlicher Handlungspraxis. Wie dieser Prozess dargestellt und illustriert wird, ist sowohl vom persönlichen Stil des Autors als auch von disziplin- und zeitabhängigen sowie und nationalen Einflüssen geprägt⁹⁸.

Die differenzierten Analysen in der Anthologie von Holmes et al. (2003b) beschränken sich jedoch rein auf eine kognitive Aufarbeitung von Laborbüchern durch die Rekonstruktion der zu Grunde liegenden Denk- und Datenstrukturen der jeweiligen Laborbuchautoren und -autorinnen. Für eineN experimentell arbeitendeN WissenschaftshistorikerIn sind noch vorhandene Laborbücher ebenfalls ein zentrale Quelle, da sie neben noch erhaltenen materiellen Relikten oder gar Zeitzeugen den vergleichsweise direktesten Zugang zur Rekonstruktion von Handlungswissen sind (vgl. Abschnitt II.1).

Es gibt insgesamt sechs Laborbücher von Walter Müller auf die Thaddeus Trenn in seiner Forschungsarbeit oder Müller selbst Bezug nimmt. Fünf Laborbücher spendete Müller auf Bitten von Paul Forman und vermittelt durch Trenn kurz vor seinem Tod im Februar 1977 der *Dibner Library of Rare Books* der *Smithsonian Institution*. Trenn arbeitete bereits seit 1974 mit den Laborbüchern. Die ersten zwei Bücher beinhalten die Notizen, die Müller zu den Experimenten für seine Dissertation gemacht hat (Januar 1926 bis

⁹⁸ Moderne, in heutigen Forschungseinrichtungen genutzte Laborbücher bilden eine andere Kategorie. Deren Zweck ist im Gegensatz zu den von mir thematisierten Laborbüchern rein formaler Natur. Sie dienen vorwiegend als Instrument der Labororganisation und als Beweismittel. Zudem sind Laborbücher in Forschungseinrichtungen in der Regel immer im Labor präsent und nicht an nur eine Person gebunden.

Februar 1927, Februar 1927 bis November 1927). Die drei letzten Bücher umfassen den Elektronenzählrohr-Zeitraum vom Frühjahr 1928 bis Juli 1929. Ein "sechstes" Laborbuch in der Sammlung des Deutschen Museums stammt jedoch nach Handschriftenvergleich nicht ausschließlich von Walter Müller. Es wurde gleichzeitig mindestens von seinem Kollegen Walter Mühlhoff mitgenutzt, der als Doktorand ebenfalls an der späteren Forschungsarbeit zum Elektronenzählrohr beteiligt war. Zusätzlich enthalte dieses Buch laut Müller Eintragungen von Geiger, Walther Bothe und Walther Kossel ab dem Jahr 1925. Da Papier damals rar und teuer war, so Müller weiter, hätte er dieses Laborbuch am Anfang seiner Assistenzzeit als Statusbericht von Kossels Arbeit, an der er mitwirken sollte, geerbt. Müller schreibt über die Laborbücher neben den schon früher in Abschnitt II.3.3 zitierten Bemerkungen zu den Koinzidenzexperimenten ergänzend an Trenn:

Vom 24.3.1926 in Kiel sind Versuche mit Röntgenstrahlen protokolliert, die zusammen mit Walther Kossel als Berater ausgeführt wurden. Hier sind 3 Seiten mit Kossels Abschätzungen, - an der Handschrift unfehlbar zu identifizieren. Diese Versuche sind dann wohl aufgegeben worden, und ich sollte sie dann als erste Arbeit nach meiner Anstellung als Assistent am 1.4.1928 wieder aufnehmen. Die Weiterführung wurde dann ganz aufgegeben, nachdem 5 Wochen später das Zählrohr erfunden war. (4. Mai 1928). Einige Monate später richtete Geiger im Cheflabor eine private Zählrohrforschung ein. (Siehe 20.9.1928 und folgende). Oberhalb der Datumseintragung vom 25. September 1928 ist mit meiner Handschrift eine Eintragung über frühere Ergebnisse zu finden, ebenso am 28.9.28. Am 16.10.1928 findet sich eine Eintragung von dem Doktoranden Mühlhoff, der assistierte und von dem weitere Eintragungen am 18.10.1928 herrühren. [...] Ich übernahm dann das Protokollbuch und machte vom 6.12.28 einige Eintragungen über Versuche mit speziellen Mehrdraht-Zählrohren. Die letzten drei Seiten enthalten Zeittafeln von Geigers Arbeiten in Berlin. Nur die beiden letzten Daten auf der vorletzten Seite sind in anderer Handschrift, und die Bemerkung auf der letzten Seite ist von mir. [...] Ich habe noch etwa 4 Protokollbücher aus dieser Zeit, die meine eigenen Versuche enthalten.99

Müller äußert sich 1974 weiter zu den Laborbüchern. Sein damaliges Verständnis über das Führen von Protokollen bestand nur in der Sammlung von Daten, die eine spätere Veröffentlichung in Aussicht stellen:

A description of results was not made in my diary, because contrary to present costum [sic!] no bureaucracy required reports and the diary's purpose was only to collect data for future publications. 100

Dieser Umstand kann auch erklären, warum vor Anfang Mai keine Datumseintragungen vorgenommen wurden. Müller selbst erklärt aber auch, dass er "kein perfekter Buchhalter gewesen [ist].[...] Die Ergebnisse wurden vielmehr mit Geiger mündlich besprochen."¹⁰¹ Er zögerte daher mit der

 $^{^{99}}$ Briefwechsel Müller an Trenn, 20.4.1972, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{100}}$ Briefwechsel Müller an Trenn, 9.10.1974, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{101}}$ Briefwechsel Müller an Trenn, 8.5.1974, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

Herausgabe der Bücher an Trenn, da sie den mittlerweile bestehenden Kriterien eines Protokolls nicht gerecht werden würden. Dennoch ist eine detaillierte Analyse der Laborbücher auf der Suche nach Konstruktionsdetails und Hinweise auf Müllers Experimentierstrukturen notwendig.

Inhaltsanalyse der Laborbücher

Bereits auf Seite 5 des vierten Laborbuchs findet man folgenden Eintrag:

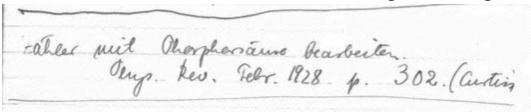


Abbildung 22: Eintrag zu Curtiss' Artikel in Müllers Laborbuch¹⁰²:"Zähler mit Phosphorsäure bearbeiten. Phys.[ical] Rev.[iew] Febr.[uar] 1928, p.[age] 302. (Curtiss[)]"

Dieser Arbeitsschritt, der die Spitze eines Spitzenzählers im Vergleich zum Ausglühen zuverlässiger machen sollte, wurde von Leon Curtiss in der Physical Review vorschlagen (Curtiss 1928)¹⁰³. Müller sollte auf Anweisung von Geiger diese Variation testen. Geiger arbeitete zu dieser Zeit mit Walther Kossel an einem Projekt zu Röntgenstrahlen und benötigte daher funktionsfähige Spitzenzähler. Offenbar führte Müller diese Aufgabe aus, denn sein erster diesbezüglicher und datierter Eintrag stammt vom 24. April 1928. Man findet hier einige Notizen und Tabellen zur Behandlung verschiedener Spitzen mit Phosphorsäure. Offensichtlich wechselte Müller nach ersten Versuchen mit positiver Gehäusespannung des Spitzenzählers das Potential, denn er notierte: "Dasselbe bei negativer Zähleraufladung. Etwas kleinere Ausschläge (und tieferer Druck ?)". Nach einer kurzen Messwerttabelle ist zu lesen: "Ergebnis: Der Zähler zählt im augenblicklichen Zustande bei positiver Spitze 8,5 mal mehr Teilchen als bei negativer"104. Auf Grund der erfolgversprechenden Ergebnisse mit dieser Methode wendete Müller das gleiche Verfahren auch auf seine Ionisationskammer an. Drei Seiten später erscheint der Eintrag vom 5. Mai 1928, in dem zum ersten Mal

¹⁰² Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 5, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Die Veröffentlichung aller in dieser Arbeit dargestellten Laborbucheinträge wurde freundlicherweise von Walter Müllers Tochter Hildegard Gillem genehmigt.

¹⁰³ Leon Francis Curtiss arbeitete von 1922 bis 1924 bei Rutherford in Cambridge und wurde 1926 Mitarbeiter beim *National Bureau of Standards* in Washington, D.C.. Wie Hughes (1993) genauer darstellt, hatte sich Curtiss dort der Entwicklung von elektrischen Zählmethoden gewidmet. 1950 schrieb er auch im Zuge seiner Tätigkeit eine Monographie über das Geiger-Müller Zählrohr (Curtiss 1950).

¹⁰⁴ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 18, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

das Zählrohr in seiner Urform skizziert und kommentiert zu sehen ist (Abbildung 23).

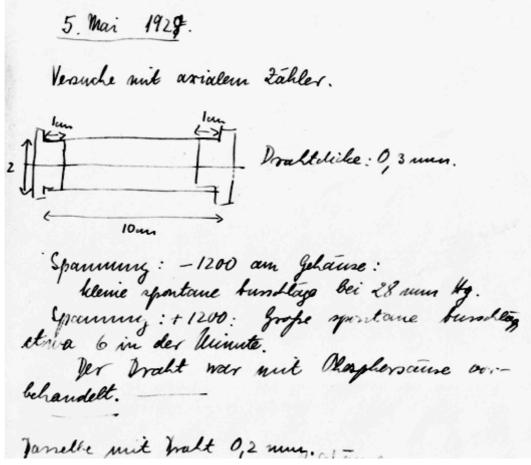


Abbildung 23: Eintrag vom 5.Mai 1928 aus Walter Müllers Laborbuch. 105

Der Zählrohr Prototyp

Das Zählrohrgehäuse war, wie die Ionisationskammern bei den Experimenten zu seiner Dissertation vermutlich aus Messing und wohl auch aus dem Bestand der alten Ionisationskammern¹⁰⁶. Der zentrale, axial gespannte Draht war aus Stahl mit 0,3mm Durchmesser und wurde durch die T-förmigen Endstopfen aus Hartgummi nach außen geführt. Der Draht war gemäß Curtiss' Artikel und Müllers Erfahrungen mit den Spitzenzählern "mit Phosphorsäure vorbehandelt". Im Zählrohr selber herrschte ein Unterdruck von 28mmHg, was mit 37mbar etwa 4% des Normaldrucks entspricht. Die notwendige Gleichspannung von 1,2kV realisierte Müller zunächst mit einem

 105 Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 21, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹⁰⁶ Eine direkte Übernahme einer der beiden publizierten Ionisationskammern scheint aber auf Grund der deutlich verschiedenen Dimensionen zumindest für den Prototyp ausgeschlossen. Müller schreibt 1957 an Wildhagen, dass das verwendete Messingrohr noch weitere "Brüder" gehabt hatte, die er zur Konstruktion des Zählrohrprototypen verwendet habe, vgl. Müller an Wildhagen, 10.5.1957, S. 5, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

Transformator und einem Gleichrichter. Hinweise auf eine entsprechende Schaltung sind vereinzelnd im Laborbuch zu finden. Neben negativer Gehäusespannung testete er auch positive. Letztere entspricht der damals gängigen Beschaltung eines Spitzenzählers. Ob ein Präparat in der Nähe des Zählrohrs war, ist nicht notiert. Daher ist die Interpretation der notierten Anzahl an großen und kleinen Ausschlägen schwierig. Prägnant ist jedoch das Wort "spontan". Es impliziert die unbestimmte Ursache oder den nicht vorhersehbaren Zeitpunkt dieser Entladungen. Im Gegensatz dazu findet man auf der gleichen Laborbuchseite weiter unten Versuche bei einem Druck von 40mmHg die Phrase "regelmäßige Ausschläge" bei positiver Gehäuseaufladung und "spontane Ausschläge" bei negativer¹⁰⁷. Als dritte Variation des Drucks senkte Müller diesen auf 21mmHg bei gleicher Spannung ab. Außerdem hat er hier Notizen über Messungen mit einem nicht näher benannten Präparat in 60cm Entfernung zum Zählrohr gemacht. Diese dritte Änderung des Luftdrucks bei konstanter Spannung lässt zum einen Rückschlüsse auf Müllers systematischen Ansatz beim Experimentieren durch die überlegte Variation der zwei Parameter 'Entfernung' und ,Gasdruck' bei konstanter Spannung zu¹⁰⁸. Die Experimente zu seiner Dissertation sind von einem ähnlichen Vorgehen gekennzeichnet, da er dort Luftdruck-Spannungs-Kennlinien von Ionisationskammern aufgenommen hatte. Zum Zweiten wird er die schnelle Änderung des Luftdrucks vermutlich analog zu seinen früheren Experimenten mit einem Rezipienten vorgenommen haben, da Hinweise auf eine Abdichtung des Zählrohrs oder auf einen Anschluss für eine Luftpumpe zumindest in diesem frühen Stadium der Experimente gänzlich fehlen. Es folgen zwei halbe Seiten mit Eintragungen in fremder Handschrift. Vergleicht man diese mit einer Handschrift, die im sechsten "Münchener Laborbuch' zu finden sind, stellt man starke Ähnlichkeiten fest. Letztere hatte Müller gegenüber Trenn als Geigers Eintragungen identifiziert¹⁰⁹. Geiger überschlägt in Müllers Laborbuch die zu erwartende Zahl an Ausschlägen auf Grund der β - und γ -Strahlung eines Präparates. Nach einer erneuten Änderung des Drucks (oder eine durch Undichtigkeit verursachte Druckerhöhung) auf 22mmHg prüft Müller die Proportionalität der Anzahl der Ausschläge Nals Maß für Intensität der Strahlung und dem Abstand r von Zählrohr und Präparat. Die Verwendung des Wortes "Ausschläge" legt die Verwendung eines entsprechenden Messinstruments nahe, mit dem Ausschläge gezählt werden.

¹⁰⁷ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 21, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹⁰⁸ Im Sinne von Friedrich Steinle (1996, 2005) könnte man Müllers Experimentierverhalten als "explorativ" in Abgrenzung zu "von einer Theorie geleitet" bezeichnen, da ein grundsätzliches systematischen Verhalten, dem aber keine zu prüfenden theoretischen Vorüberlegungen zu Grunde liegen, interpretierbar wäre.

¹⁰⁹ Müller an Trenn, 20.4.1972, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

Zeittypisch und Disziplin-typisch wäre ein Fadenelektrometer, bei dem ein Spannungsimpuls durch den Ausschlag eines leichten Quarzfadens zwischen zwei geerdeten Kondensatorplatten registriert wird. Müller bestimmte jeweils die Zeit, die zur Registrierung von 100 Ausschlägen benötigt wurde und rechnete dann auf 'Ausschläge pro Minute' um. Abzüglich der Nullrate von (erstaunlich hohen¹¹¹0) 42,5 Ausschlägen pro Minute bestimmte er das Produkt aus Anzahl der Ausschläge und dem Abstandsquadrat. Der so zu prüfende r^{-2} -Zusammenhang zur Charakterisierung der elektromagnetischen γ -Strahlung war allerdings nicht zufriedenstellend, da die jeweiligen von Müller berechneten Produkte $N\cdot r^2$ trotz eines offensichtlich gemachten Rechenfehlers nicht einmal annähernd identisch sind (Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26)¹¹¹¹.

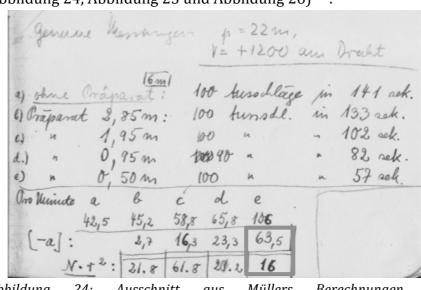


Abbildung 24: Ausschnitt aus Müllers Berechnungen zu Abstandsabhängigkeit mit $1/r^2$ -Charaktersitik 112 . Rot markiert ist ein offensichtlicher Rechenfehler: Der korrekte Wert beträgt 62,7 statt 63,5 bzw. 15,7 statt 16. Dennoch erscheint der Messwert bei c auf Grund seines deutlich verschiedenen Produkts von 61,8 auffälliger.

Es wäre aber auch denkbar, dass die kleine Notiz "6m" bei Messung a bedeutet, dass das Präparat 6m entfernt war und Müller diese Messung als "ohne Präparat" deklariert hat. Zudem kann man vermuten, dass das ganze physikalische Institut mit radioaktivem Material kontaminiert war und so die Nullrate im Vergleich zu heute (10 bis 15 Ausschläge pro Minute) deutlich höher war. Im Kontext der später durchgeführten Höhenstrahlungsexperimente schreibt Müller, dass er aus diesem Grund zuerst seine Experimente vom 1. Stock in das Erdgeschoss und dann sogar ins Freie verlegt hat.

¹¹¹ Wenn $I \sim \frac{1}{r^2}$ dann ist $\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$ und somit $I_1 \cdot r_1^2 = I_2 \cdot r_2^2$, wobei I die Intensität ist. Müller nutzt als Maß für die Intensität die Zählrate N.

 $^{^{112}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 23, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution

Pro Minute	a	b	С	d	e	(1)
	42,5	45,2	58,8	65,8	106	(2)
[-a]		2,7	16,3	23,3	63,5	(3)
r Präparat in m	[6m]	2,85	1,95	0,95	0,50	(4)
$N \cdot r^2$		21,8	61,8	21,2	16	(5)

Abbildung 25: Übertrag aus Müllers Laborbuchseite (Abbildung 24) auf dessen Basis Abbildung 26 erstellt wurde. Messung a ist die Nullrate, die in Zeile (3) von den Brutto- Zählraten in Zeile (2) abgezogen wurde. Der Abstand r des unbekannten Präparats zum Zählrohr ist in Zeile (4) aufgelistet.

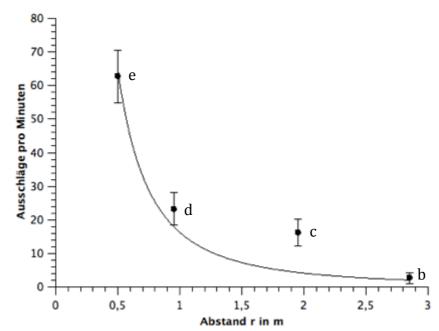


Abbildung 26: Meine (bewusst anachronistische) graphische Darstellung von Müllers Messwerten mit von mir ergänztem statistischen Fehler \sqrt{N} . Der geplottete Fit entspricht der erwarteten quadratischen Funktion $f(r) = 16, 2 \cdot r^{-2}$ bei 91% Übereinstimmung. Bei erte mit dem quadratischen Fit 98,2 %. Ein optimaler Fit von Müllers Messwerten ergäbe $f(r) = 24, 5 \cdot r^{-1,3}$ bei 97% Übereinstimmung; Bei maskiertem c: $f(r) = 20, 9 \cdot r^{-1,6}$ bei 99,9% Übereinstimmung.

Um zu einem den anderen Produkten ähnlichen Wert im Bereich $15 \leq N \cdot r^2 \leq 21$ auch bei einer fehlerhaften Messung von c zu kommen, muss man Müller entweder eine fehlerhafte Abstandsmessung im Intervall $0.95m \leq r_c \leq 2.95m$ bei $r_c = 1.95m$ oder eine fehlerhafte Auszählung der Ausschläge im Intervall $3.9 \leq N_c \leq 28.7$ bei $N_c = 16.3$ unterstellen. Die in Abbildung 26 retrospektiv angefertigte und strenggenommen anachronistische statistische Analyse legt jedoch genau diesen Verdacht eines Mess- oder Zählfehlers nahe, da bei Ausschluss von Messung c ein zufriedenstellendes Ergebnis mit

quadratischer Abhängigkeit erreicht werden kann. Alternativ zu diesen signifikanten Abweichungen wäre aber auch ein störender Einfluss eines weiteren anwesenden Präparates oder ein defektes Zählrohr möglich, denn Müller notiert eine Seite darauf: "Kammer über Nacht mit P2O5 [Phosphorpentoxid, SK] ausgetrocknet. [...] Bei allen bisherigen Versuchen befand sich im Nebenzimmer (8m) ein Ra-Präparat von 4mg!" 113. Ob Müller allerdings diese Messung als gelungen oder mir misslungen ansieht, lässt sich anhand der Aufzeichnung nicht sagen. Nach einer weiteren Messtabelle zur "Bestimmung der Zahl der sp.[ontanen] Ausschläge" auf Seite 24 folgt der Hinweis auf Literatur über durchdringende Höhenstrahlung. Es handelt sich hierbei um Kolhörsters ersten (zweiteiligen) Artikel zu diesem Thema (Kolhörster 1926a, 1926b). Müller notiert die Ionisierungsstärke bzw. Ionendosis der Erdstrahlung von 2 - 3 I ¹¹⁴ und darunter einen Absorptionskoeffizienten der Höhenstrahlung von μ_{Höhenstrahl}=1,22 I. Diesen Zahlenwert findet man in Kolhörsters Artikel in einer Tabelle, in der verschiedene Absorptionskoeffizienten aufgelistet werden, jedoch in der heue noch üblichen Einheit cm⁻¹ und nicht I oder cm⁻³, wie Müllers Notiz impliziert. Diese Diskrepanz lässt sich aber hier nicht weiter aufklären.

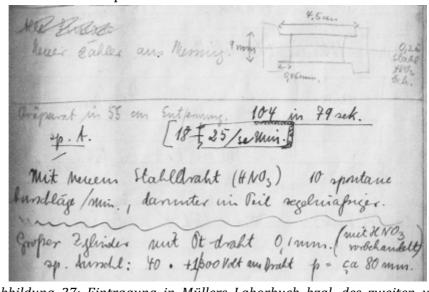


Abbildung 27: Eintragung in Müllers Laborbuch bzgl. des zweiten und dritten Zählrohrs.¹¹⁵

¹¹³ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 24, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹¹⁴ In Kolhörsters Artikel findet man "2 bis 3 Ionen" (Kolhörster 1926a, 293). Die zeitgenössische Einheit 'Ionen' meint hier wahrscheinlich die ursprünglich für die physikalische Größe definierte cgs-Einheit, die in Ionen eines Vorzeichens pro cm³ Luft (bei 1 bar und 20°C) und Sekunden angegeben wurde (Kolhörster 1932).

¹¹⁵ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 25, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Danach beginnt offensichtlich ein neuer Abschnitt. Ein neuer Zähler aus Messing wird konstruiert. Nebst Skizze und Dimensionsangaben notiert Müller, dass er einen 0,2mm dünnen Stahldraht mit Salpetersäure (HNO₃) behandelt habe. Dass Stahl ein erstes Material für die Zähldrähte war, wird hier das erste Mal direkt notiert¹¹⁶. Der Wechsel von Phosphor- zu Salpetersäure lässt vermuten, dass die oxidierende Eigenschaft der Säuren als das zentrale Kriterium für die Behandlung des Drahtes angesehen wurde. Das Ergebnis einer Messung mit einem 55cm entfernten Präparat und die Anzahl der spontanen Ausschläge werden notiert. Letztere wird ihm wohl mit 18 bis 25 Ausschlägen pro Minute zu hoch erschienen sein und hat ihn vielleicht eine Fehlfunktion des Zählrohrs vermuten lassen, denn Müller schreibt, dass er einen neuen Stahldraht verbaut habe, mit dem die spontanen Ausschläge auf 10 pro Minute bestimmt werden konnten. Es folgen ein großer Zylinder mit 0,1mm Platindraht (Salpetersäure, +1300V am Draht bei 80mmHg Druck.) sowie auf der nächsten Seite (S. 26) ein kleiner Zylinderzähler, der mit und ohne Blei-Mantel die Nullrate messen sollte. Für je 100 Ausschläge bestimmt er die notwendige Messzeit und kam auf 14,6 Ausschläge pro Minute. Rechnet man diesen Wert nach, stellt man erneut einen kleinen Rechenfehler fest, wonach der eigentliche Wert 14,8 pro Minute betragen würde. Mit Bleiummantelung von nicht angegebener Dicke wird dieser Wert um etwa 16,5 % auf 12,2 pro Minute verringert.

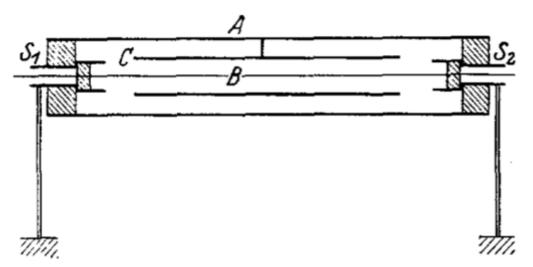


Abbildung 28: Längsschnitt der Ionisationskammer für hohe Drucke aus Müllers Dissertation (Müller 1928b, 627)¹¹⁷. Mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg.

Aber auch die von Müller vorher präparierten Spitzenzähler hatten eine Spitze aus Stahl. Der Rückschluss, dass auch der Prototyp einen Draht aus Stahl hatte, liegt daher nahe. Platin als ein zweites Material ist ebenfalls für Spitzenzähler typisch gewesen.

 $^{^{117}}$ "Der äußere Zylinder, der dem Druck [über 1 Atmosphäre] standzuhalten hatte, hatte eine Länge von 15cm, eine Wandstärke von 5mm und einen lichten Durchmesser von 25mm. Auf

Nach einer kleinen Skizze, die vermutlich den Primär- und Sekundärkreis eines Transformators nebst einer Tabelle der damit zu erzeugenden Hochspannungen darstellt, wird der Bau eines weiteren, bisher vierten Zählrohrs notiert. Dabei handelt es sich um einen "kleinen" Aluminium-Zähler, der in der "alten Hochdruckionisationskammer" eingebaut werden sollte. Durch den Gebrauch des Wortes "in" kann man vermuten, dass der Aluminium Zähler dem inneren Zylinder C in Abbildung 28 entspricht.

Müller wollte mit dem neuen Zähler erneut prüfen, ob die Anzahl der spontanen Ausschläge durch einen Bleimantel reduziert werden kann. Er bestimmte jeweils sechs Mal die Zeit in der 100 Ausschläge mit und ohne Bleimantel¹¹⁸ erreicht werden. Anschließend summierte er alle sechs Einzelergebnisse auf und kommt so auf 600 Ausschläge in 910 Sekunden¹¹⁹ ohne Bleimantel und 600 Ausschläge in 1001 Sekunden mit Bleimantel. Ein konkretes Ergebnis oder eine Interpretation seiner Werte notierte er aber nicht¹²⁰. Dies ist erstaunlich, da sein Ergebnis zeigt, dass seine explizit formulierte Anfangshypothese, wonach die Ausschläge mit Bleimantel weniger werden müssten, bestätigt worden ist. Auf der darauffolgenden Seite notiert er "Durch γ -Strahlen erregte β -Strahlung: Abnahme von C [Kohlenstoff] bis Cu [Kupfer], dann Zunahme. Kovarik, Phys[ical] Rev.[iew] 18 S.154"121. Alois Kovarik schreibt in seinem kurzen Artikel, dass γ -Strahlung beim Durchgang durch Materie in Abhängigkeit von dessen Dicke und Atomgewicht β -Strahlung in einer bestimmten Anzahl anregt. Ab Kohlenstoff wird die Zählrate laut Kovarik bis hin zu Kupfer kleiner und steigt danach wieder an. Schlussfolgerungen von Müller auf Grund dieser Information sind nicht erkennbar.

beiden Seiten war er mit eingeschraubten Hartgummistopfen verschlossen, durch welche die geerdeten Schutzringe S_1 und S_2 hindurch geführt waren. Die einzelnen Teile waren mit Wachs abgedichtet. [...] Bei Versuchen, bei denen ein Trockenmittel benötigt wurde, befand sich in der Ionisationskammer ein weiterer Zylinder C, der mit dem äußeren metallisch verbunden war. Er hatte eine Länge von 9 cm und einen Durchmesser von 1cm." (Müller 1928b, 627f.)

¹¹⁸ Stärke oder Halbwertsdicke des verwendeten Bleimantels werden nicht notiert. In späteren Experimenten sind typischen Bleiplatten 5 bis 10cm und Eisenplatten bis zu 30cm stark, wobei auch mehrere Platten schichtweise verwendet worden sind (vgl. Abbildung 35 auf S.93)

¹¹⁹ Hier tritt ein erneuter Rechenfehler auf. Das korrekte Ergebnis wäre 908,5 Sekunden. Ich vermute jedoch, dass Müller auf Grund der fehlenden Nebenrechnungen alle Berechnungen, also Wurzelziehen, Aufsummieren und Dividieren, im Kopf durchgeführt hat. Daher sind kleine Fehler durchaus verständlich.

¹²⁰ In heute üblicher Notation betrüge das Ergebnis $39.6 \pm 6.3 \, min^{-1}$ ohne Blei und $36.0 \pm 6.0 \, min^{-1}$ mit Blei. Mit Blei ist die Anzahl an Ausschläge damit um etwa 9% gefallen.

¹²¹ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 30, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Es handelt sich dabei um die Juli-Dezember 1921 Ausgabe der *Physical Review Series II*. Das zweite Heft beinhaltet Seite 154 und ist Teil der *Minutes of the 109th Meeting, Washington, April 22 and 23, 1921*, siehe auch Kovarik 1921.

Die ersten Messungen mit Kalium

Auf der nächsten Seite des Laborbuchs (S. 32) findet man die Beschreibung eines neuen Versuchs mit einem "kleinen Zähler in Glasapparatur". Das Attribut 'klein' könnte ein Hinweis darauf sein, dass Müller den "kleine[n] Al-Zyl. Zähler" aus dem vorigen Versuch dafür genutzt hat¹²². Gegenstand der experimentellen Untersuchung war der Nachweis der vermuteten γ -Strahlung von Kalium. Er nutzte dafür 100g Kaliumacetat in 20cm Entfernung zum Zählrohr. Die Nullrate bestimmte er auf 100 Ausschläge in 456 Sekunden. Das Zählrohr wurde laut Laborbuch von "fast allen Seiten" mit Blei ummantelt. Er konnte aber keinen "meßbare[n] Mehrbetrag" an Zählereignissen feststellen. Er notierte: "Eine γ -Radioactivität des Kaliums ist auf die ausgeführte Weise nicht nachweisbar." Neben diesen Notizen findet man drei kleine Skizzen, die vermutlich die für den kleinen Zähler in der Glasapparatur verwendete elektrische Schaltung darstellen sollen. Die dritte Skizze ist in Abbildung 29 dargestellt.

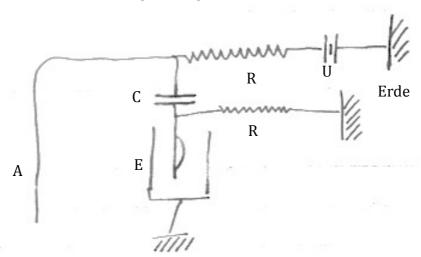


Abbildung 29: Eine kleine Skizze einer elektrischen Schaltung. Die zwei anderen, weniger elaborierten Skizzen auf der Seite lassen vermuten, dass der linke Draht die Anode A des ebenfalls geerdeten Zählrohrs ist. Das Wort "Faden" an dem Messgerät in einer der anderen Skizzen lässt auf die Verwendung eines Fadenelektrometers schließen. Im Aufbau entspricht die Schaltung aus zwei Widerständen R, einem Kondensator C, der Spannungsquelle U und dem Elektrometer E dem der kleinen Skizze in einem später von mir thematisierten Brief von Geiger (Abbildung 72, S. 155).

Es folgt eine weitere Messreihe mit Kalium, aber diesmal mit 5kg Kaliumchlorid. Er notiert, dass ohne Kalium $32,1\pm1,3$ Ausschläge pro

 $^{^{122}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 32 bzw. 28, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹²³ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 32, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Minute gezählt werden können. Wie bei den vorigen Messungen summierte Müller über 5 Messungen auf, sodass er mit 500 Ausschlägen pro Zeitintervall rechnen konnte. Im Vergleich dazu entfallen auf die Messung mit 5kg Kaliumchlorid in (vermutlich) 150cm Entfernung 41,6 \pm 1,3 Ausschläge pro Minute¹²⁴. Als Referenz vermisst er auf die gleiche Art und Weise 0,0518mg Radium ohne jedoch in gleicher Weise ein Ergebnis zu formulieren. Wendet man Müllers Berechnungsmethode auch hier auf seine Einzelmessungen mit Radium an, erhält man $101,7\pm2,5$ Ausschläge pro Minute. Als Ergebnis notiert Müller: "Das Radiumäquivalent 1mg Kalium [sic!, Streichung von mir] entspricht: $8\cdot10^6~kg$ Kalium. Oder: Die γ -Activität des K[aliums] beträg[t] $8\cdot10^{-12}$ von der des Radiums."125 In einem Brief von Müller an seine Eltern schreibt er am 25. Mai 1928 dazu:

Es ist mir schon jetzt gelungen, eine bisher zwar vermutete, aber nicht nachweisbar gewesene Strahlung des Kaliums zu entdecken und genau zu messen. Es handelt sich um die γ -Strahlung des Kaliums. Eine β -Strahlung von Kalium ist übrigens seit 25 Jahren bekannt. Vielleicht wird euch die Stärke der von mir entdeckten Strahlung interessieren. Die γ -Strahlung von 1 Milligramm Radium ist so stark wie die entsprechende Strahlung von 8 Millionen Kilogramm Kalium! Und dabei habe ich sie mit 1 Kilogramm Kalium gemessen! 126

Müllers hier vermutlich adressatengerecht gerundeten Zahlenwerte liegen in der selben Größenordnung, wie seine Angaben im Laborbuch. Man kann diese Seiten im Laborbuch also noch dem Mai 1928 zuordnen.

Es folgt auf der nächsten Seite eine "Messung eines schwach aktiven Präparats" mit einer "Tauchapparatur (s. Werkstattzeichnung)"127. Bei dem

 $^{^{124}}$ Wie sich der Fehler von 1,3 zusammensetzt konnte ich nicht mit Bestimmtheit nachvollziehen. Es könnte die Standartabweichung des Mittelwertes in Frage kommen. Diese betrüge aber $\frac{|\sqrt{32,1}|}{5}$ =1,13 und nicht 1,3. Im Fall der Messung mit Kalium käme man so auf einen Wert von 1,29, welcher in etwa Müllers Angabe von erneut 1,3 entspricht. Durch einen Verlust der ersten Dezimalstelle 1 könnte man diesen Fehler aber auch als Übertragungsfehler identifizieren.

Valter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 35, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Im ersten Teil des Satzes ist ein logischer Fehler. Vermutlich ist das Wort "Kalium" zu viel. Ein Überschlag zeigt, dass 1 mg Radium hochgerechnet 1,96· 10^6 Ausschläge pro Minute verursachen würde; 1 mg Kaliumchlorid käme dahingegen auf $8.3 \cdot 10^{-6}$ Ausschläge pro Minute. Der Quotient aus diesen beiden Werten wäre $4.2 \cdot 10^{-12}$. Zwar ist die Größenordnung die selbe wie bei Müllers Angabe, aber der Koeffizient passt nicht. Zudem erhalte ich nach meiner Berechnung mit Müllers Werten, dass die Anzahl der Ausschläge pro Minute von 1mg Radium der von $2.4 \cdot 10^5$ kg Kaliumchlorid entsprechen würde. Nun besteht aber das Kaliumsalz KCl aus Kalium mit 39,1u und Cl mit 35,5u. Unter der Annahme, dass die molare Masse sich gleich verteilt, erhielte man zumindest beim Strahlungsvergleich einen nachgerechneten Wert von etwa $8.5 \cdot 10^{-12}$. Dieser könnte Müllers Angabe entsprechen. Aus heutiger Sicht müsste man natürlich den Anteil des radioaktiven Isotops K^{40} von 0.012 % in die Überlegungen mit einbeziehen.

¹²⁶ Müller an seine Eltern, 25.5.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7.

 $^{^{127}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 38, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Präparat handelt es sich um 70mg 'Thor' ¹²⁸. Das Messprozedere ist das gleiche, wie bei den vorigen Messungen. Am Ende der Messungen kann man lesen: "Es ist zu hoffen, daß Radioactivität nachgewiesen werden kann, die 10^{-17} der des Radiums entspricht." Der Wechsel des Präparats von Kaliumchlorid auf 'Thor' lässt vermuten, dass die Messung von Kalium von Müller als erfolgreich angesehen wurde, da mit dem Thor offensichtlich eine noch geringere Aktivität als die des Kaliums nachgewiesen werden sollte.

Nachdem bisher nur Blei zur Abschirmung des Zählrohrs benutzt wurde, sollte nun offensichtlich auch Eisen eingesetzt werden. Auf Seite 37 findet man in Geigers Handschrift eine kurze, schwer nachvollziehbare Berechnung der Größe und Menge der für den nicht explizit genannten Zweck erforderlichen Eisenplatten. Insgesamt kommt er auf 1200 kg.

Müllers erstes Resümee am 6. Juni 1928

Es folgt der zweite datierte Eintrag im Laborbuch. Müller beschreibt mit einem bisher ungewöhnlich hohen Anteil an Fließtext am 6. Juni 1928 weitere "Versuche mit dem Zylinderzähler"129. Der Abschnitt fasst vermutlich alle bisher gemachten Erfahrungen zusammen. Erfolge mit einem zylindrischen Zähler ließen sich nur erzielen, wenn der Draht trocken war. Dies könne man mit Trocknung durch Phosphorpentoxid oder Erwärmung mit einem Akkumulator erreichen¹³⁰. Drähte aus Platin oder Silber "weder blank noch mit Chloridüberzug" hätten Erfolge hervorgebracht, da entweder regelmäßige Stromstöße oder ein kontinuierlicher Strom auftreten würden. Letzteres wäre besonders bei Feuchtigkeit der Fall. "Positiver Zylinder ist ganz hoffnungslos". Stahldraht hingegen wurde in drei unterschiedlichen Dicken (0,03mm, 0,04mm und 0,2mm) untersucht. Bei "sauberen" Drähten könne man damit einwandfrei arbeiten. Eine Vorbehandlung des Drahtes durch ein 30-Sekunden-Bad in verdünnter Salpetersäure sei aber notwendig. Vereinzelt auftretende Dauerausschläge hätten ihre Ursache in Feuchtigkeit oder Spitzen auf den Drähten. Die Doppelseite schließt mit der Bemerkung, dass Zähler Nr. 8 180 spontane Ausschläge pro Minute bei 2650 Volt zählen würde sowie mit einer Tabelle über neun bereits konstruierte Zählrohre (siehe Abbildung 70, S. 151)¹³¹.

¹²⁸ Welches 'Thor' Müller meint, bleibt unklar. Zu der Zeit gab es mindestens 12 'Elemente' in der Thorium-Zerfallsreihe, die alle Thor als Bestandteil der Bezeichnung führen – meistens als Thorium (X, A, B, C, D) oder auch direkt als "Radiothor" oder "Mesothor". Eine Liste, in der die 'alten' mit den heute üblichen Bezeichnungen identifiziert werden liefert z.B. Malley 2011, 217 ff..

¹²⁹ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 40, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{130}}$ Da die Feuchtigkeit irgendwo hin entweichen muss, gehe ich davon aus, dass bei diesem Trocknungsprozess das Zählrohr immer noch an der Vakuumpumpe angeschlossen war.

¹³¹ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 40f., Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Müller beschreibt neben Platin und Silber noch eine dritte

Einen Tag später, am 7.6.1928, machte Müller Notizen über neue Abschirmungsversuche mit der "[Versenk]Kammer 5" hinter 9cm Eisenpanzer nach oben und unten. Von der Seite wurde die Kammer mit 8cm dicken Bleiklötzen abgeschirmt. Ohne diesen Schutz zählte Müller 70 Ausschläge in der Minute und mit nur noch 30. Anschließend wurde das schon benutzte 70mg Thorpräparat aufgelegt¹³². Die Anzahl der Ausschläge steigt auf 37,6 pro Minute bei einer Zeitmessung von insgesamt 900 Ausschlägen und 9cm Eisen zwischen Präparat und Zähler. Weitere Kommentare dazu wurden nicht notiert.

Auf Seite 44 folgen Abschirmungsversuche mit Eisenplatten und Radium sowie eine Liste über die am Institut vorhandenen radioaktiven Präparate (Abbildung 30).

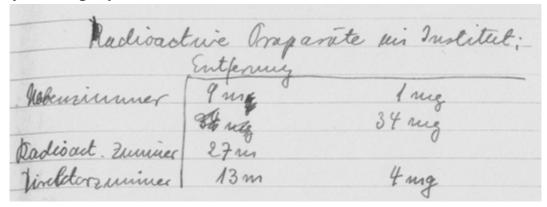


Abbildung 30: Müllers Liste von radioaktiven Präparaten im Institut, Juni 1928. Nebenzimmer; 9m; 1mg// Radioact. Zimmer; 27m; 34mg// Direktorzimmer; 13m; 4mg"

Auf der nächsten Seite 46 folgt eine Abschätzung darüber, wie viele Zählereignisse allein auf Grund der Höhenstrahlung zu erwarten sind:

Drahtsorte, mit der keine Erfolge zu erzielen seien. Dessen Namen konnte ich jedoch nicht entziffern. Es könnte sich rein orthographisch um "Lackdraht 0,1 mm" handeln. Möglich wäre dann Kupfer-Lackdraht.

 $^{^{132}}$ Diesmal notiert Müller zusätzlich, dass es sich dabei um $10^{\text{-}5}$ mg Radiumäquivalent handeln würde.

¹³³ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 45, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Amg Ra is 10 m Entferning gibt den
Strom 3T.

The Hohenstrahlung gibt 1I, it floo:

4 aquivalent mit 3 mig nis 10 m Entferning, oder mil

300 mig nis 1 m Entferning.

Da 20 mig nis 1 m Entferning etwa 150

hindlage ergibt, so purif die Hohenstrahlung etwa 10 hindlage ergeben.

Abbildung 31: Müllers Abschätzung über die auf Grund von Höhenstrahlung zu erwartende Anzahl an Zählereignissen¹³⁴. I meint vermutlich den Ionenstrom, auf den er schon vorher Bezug genommen hat.

Er notiert weiter, dass die überschlagenen zehn Ausschläge pro Minute erst bei einer Bleiabschirmung von 9cm bisher aufgetreten seien. Ohne Abschirmung durch Blei oder Eisen sind beispielsweise in der Messung vom 7.6.1928 70 Ausschläge pro Minute gezählt worden.

Auf der nächsten Seite führt Müller erneut Absorptionsmessungen mit Radium durch. Die spontanen Ausschläge bestimmt er auf 18,6 pro Minute. Das Zählrohr wird mit insgesamt 8 Eisenplatten mit je 1cm Dicke abgeschirmt. Es werden je 400 Ereignisse gezählt und daraus die Anzahl der Ausschläge pro Minute berechnet. Unter der Messtabelle notiert er sein Ergebnis:

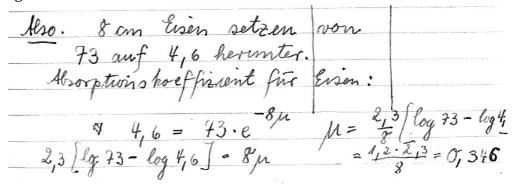


Abbildung 32: Müllers Ergebnis zur 'Messung der γ -Absorption von Radium' ¹³⁵. Dies ist die einzige mathematische Nebenrechnung, die in seinem Laborbuch zu finden ist.

¹³⁴ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 46, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Der Ansatz mit dem exponentiellen Abschwächungsgesetz ist nachvollziehbar und auf den ersten Blick adäquat. Auch auf den noch in den 1970er Jahren genutzten, sehr elaborierten Rechenschiebern (z.B. von Faber Castell) waren in der Regel keine natürlichen Logarithmen zu finden, sondern nur dekadische. Daher scheint Müllers erster Rechenschritt mit der Wahl gegen den in diesem Fall operational einfacheren natürlichen Logarithmus plausibel. Auch seine Umformungen sind korrekt mit Ausnahme der offensichtlich willkürlichen Mischung von 'log' und 'lg' ¹³⁶. Fittet man Müllers Messwerte mit seiner Funktion und $\mu = 0,345$ erhält man $I(x) = 114,1 \cdot \exp(-\mu \cdot x)$ bei 94% Übereinstimmung (Abbildung 33).

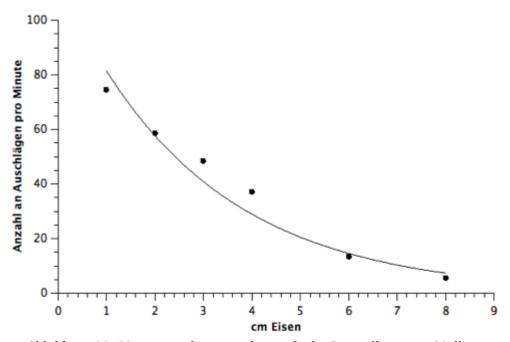


Abbildung 33: Meine anachronistische grafische Darstellung von Müllers Messwerten und einem exponentiellen Fit.

Spätestens an dieser Stelle wird für mich deutlich, dass schon Müllers frühe Zählrohre zwischen dem 5. Mai und dem 6. Juni 1928 (Nr. 1 bis 9) quantitativ arbeiteten bzw. theoretisch begründbare Resultate lieferten¹³⁷. Aus der retrospektiven Sichtweise erhält man durch die Fits natürlich ein stärkeres, aber strenggenommen nicht für die Analyse nutzbares Argument.

 $^{^{135}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 47, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹³⁶ Die 2,3 ergibt sich aus $\frac{1}{\lg(e)} \approx 2,3$ mit $e \approx 2,7$.

 $^{^{137}}$ Da der Absorptionskoeffizient von der Energie der γ -Strahlung abhängt, ist es schwer, eine nachträgliche Bewertung seines Ergebnisses vorzunehmen.

Zähler Nr. 10

Nach dieser Messung konstruiert Müller Zähler Nr. 10 um sich damit dem zuvor angedeuteten Problem der Höhenstrahlung zu widmen. Zunächst versucht er mit dem neuen Zählrohr den Wert der Betriebsspannung zu ermitteln, bei dem die Anzahl und die Amplitude der Ausschläge gleich zu bleiben scheinen. Anschließend fängt er an andere für die hohe Anzahl an spontanen Ausschlägen potentiell verantwortliche Quellen zu bestimmen. Dazu schirmt er das Zählrohr Richtung Erdboden mit 18cm Eisen ab. Dies war vermutlich erfolglos, denn ein Teil der Ergebnisse ist durchgestrichen. Es folgt eine Messung an einem standardisierten Radium Präparat (Nr. 1259 der PTR) und anschließend erneut an Kaliumchlorid. Diesmal ist die Menge mit zuerst 15,1g und dann 1g aber deutlich geringer, als bei seinem letzten Kalium-Versuch. Anschließend erhöht er die Spannung am Zählrohr um 50 Volt ohne den letztendlichen Spannungswert direkt zu benennen. Auch mit dieser geänderten Randbedingung und der Wiederholung der vorigen Messung, bleibt die Anzahl der Ausschläge mit 32 in 85 Sekunden konstant. Nach einer Spannungserhöhung um weitere 50 Volt arbeitet das Zählrohr nicht mehr, notiert Müller, da nun 180 Ausschläge in der Minute auftreten. Danach testet er Zähler Nr. 8, der laut Müllers Übersichtstabelle von Laborbuch-Seite 41 eine Kopie von Zählrohr Nr. 2 war. Der Detailgrad der Aufzeichnung nimmt hier schon deutlich ab. Er notiert lediglich Druck, Drahtdurchmesser und "kritische Spannung", die hier bei 1800 Volt liegt¹³⁸. Als Ergebnis der Messung notiert er nur die Anzahl der Ausschläge pro Minute mit und ohne Bleischutz (40 bzw. 70 pro Minute) und dass der Zähler sowohl auf das "kleine" Radiumpräparat, also auch auf das schon verwendete 1/20 mg Radiumpräparat ansprechen würde.

Auf der nächsten Seite beschreibt er in ähnlicher Kürze eine Messung mit einem "Doppelzylinder zur Aufnahme von zu untersuchenden Substanzen". Auf Grund von fehlenden weiteren Beschreibungen kann man nur vermuten, dass es sich dabei erneut um seine alte Ionisationskammer (Abbildung 28) handelt, die auch schon bei den Experimenten zu seiner Dissertation für den Zweck der Aufnahme von Substanzen konstruiert wurde. Damals sollte der Zylinder jedoch das Trocknungsmittel und nun 53,7g Kaliumchlorid aufnehmen. Er differenziert hier zum dritten Mal zwischen Kaliumchlorid und Kalium und notiert, dass diese Menge Salz 28,5g Kalium enthalte¹³⁹. In der darunter notierten Messtabelle protokolliert Müller 8 Messungen, bei

¹³⁸ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 52, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹³⁹ Auf Seite 50 schreibt Müller: "1g KCl auf Filterpapier=[530mg K]". Auf Seite 51: "1,27g K = 2,4g KCl" und schließlich auf Seite 53: "53,7g KCl = 28,5g K". In allen drei Fällen beträgt der prozentuale K-Anteil in KCl somit 53%. Die heute akzeptierte Masse von Kalium beträgt 39,0983u und die von Chlor 35,45u. Der Anteil von Kalium in Kaliumchlorid betrüge nach heutigen Maßstäben somit 52,4%.

denen er die Zählrohrspannung von 1270 auf 1210 herunter und dann in 10-bzw. 20-Volt-Schritten bis 1290 wieder herausgeregelt hat. Zu jedem Spannungswert notiert er die Anzahl der Ausschläge pro Minute sowie bei 1220 Volt, dass das Zählrohr mit 6 Ausschlägen pro Minute auf ein Präparat ansprechen würde.

Auf der nächsten Seite erfolgt eine zweite, vergleichbare Messung, aber vermutlich mit einem anderen nicht benannten Zählrohr, da die Spannungswerte mit 1290 bis 1350 Volt deutlich höher liegen. Es folgt eine zu der vorigen Kalium-Messung analoge Messreihe, aber ohne jegliche Notiz von Randbedingungen mit Ausnahme der spontanen Ausschläge.

Riesenzähler 11

Auf einer halben Laborbuchseite notiert er anschließend die Konstruktions-Parameter von "Riesenzähler 11":

Resenzabler 11.

White, Mahllauge 25, cus

di = 0,2 mm

Die = 2.9 kmm

Waustarke 0,5 mm.

Volumen: 180 ccm.

sp. 4: 150 i.d. Unimite konstant von 1130 Voet

m zu itwa 1300 Volt.

Abbildung 34: Notizen zu Riesenzähler 11. "Wirks.[ame] Drahtlänge 25,6 cm, d_i =0,2mm. D=29mm, Wandstärke 0,5mm, Oberfläche 245qcm, Volumen 180ccm."¹⁴⁰

Rein von der Nummerierung der Zählrohre her müsste es sich bei diesem Zähler um Nr. 11 handeln. Die auf den ersten Blick römische "II" kann man daher mit dieser Information auch als 11 interpretieren, obgleich Müller seine "1" in der Regel anders schreibt (z.B. bei "150 i.d. Minute" im gleichen Ausschnitt). Es ist aber das erste Zählrohr, bei dem Müller die Oberfläche bzw. das Volumen berechnet und notiert hat. Im Vergleich zu den zeitlichen Vorgängern ist dieses Zählrohr mit mehr als 25,6cm Länge etwa 2,5 mal länger und im Durchmesser etwa 1cm größer. Das Attribut "Riese" ist im Vergleich also gerechtfertigt. Die 'wirksame' Länge des Drahtes meint wohl den Teil des Drahtes, der nach dem Durchgang durch die Endstopfen im Zählrohrinneren ausgespannt ist. Für Müller ist anscheinend klar, dass nur

 $^{^{140}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 55, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

hier Zählereignisse stattfinden können. Erstaunlich ist daher, dass er dann aus dieser wirksamen Drahtlänge und dem Durchmesser des Zählrohrs die Oberfläche und nicht die Mantelfläche dieses Zylindersegments berechnet, obwohl die Stirnseiten des Zylinders offensichtlich nicht aus Metall, sondern aus Hartgummi bestanden haben¹⁴¹.

18. Juni 1928

Auf Seite 56 beginnt eine offensichtlich aufwändigere Messung, die auf den 18. Juni 1928 datiert ist. Sie ist mit "Apparatur im Erdgeschoß" betitelt. Neben dem Wechsel des Ortes wurde an den Randbedingungen wenig geändert. Müller skizziert den Aufbau, der dem seiner vorigen Abschirmungsversuche ähnelt (Abbildung 35).

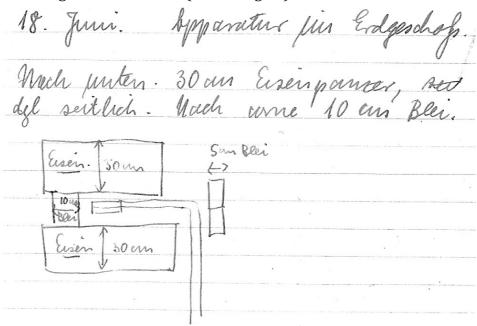


Abbildung 35: Müllers Skizze zu seiner "Apparatur im Erdgeschoß". Zu sehen ist das Zählrohr mit zwei Verbindungen zum Gehäuse und zum Zähldraht sowie die Metallabschirmung: "Nach unten. 30cm Eisenpanzer, d[er]gl.[eiche] seitlich. Nach vorne 10 cm Blei." 142

¹⁴¹ Die Berechnung der Oberfläche ist nachvollziehbar. Bildet man jedoch das Produkt aus Grundfläche und wirksamer Länge des Zylinders, kommt man nicht auf 180cm³, sondern auf 169,1cm³. Nimmt man an, dass Müller das Volumen nicht nur über die wirksame Länge berechnet hat, sondern inkl. der Stopfen, könnte man daraus auf deren Eindringtiefe in das Zählrohr schließen. Bei 180cm³ Gesamtvolumen käme man bei einem symmetrischen Aufbau auf 0,8cm, die die Stopfen in den Zylinder hineinragen. Im Vergleich dazu ragten die Stopfen beim Prototyp 1cm in den Zylinder hinein (vgl. Abbildung 23 auf S. 80), was die 0,8cm durchaus plausibel erscheinen ließe. Aus heutiger Sicht würde bei einem geschlossenen Zählrohr die Angabe der Mantelfläche mehr Sinn machen als die der Oberfläche, denn je größer die Metalloberfläche aus der Elektronen ausgelöst werden können, desto höher wäre die Zählrate.

¹⁴² Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 56, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Als Zählrohr verwendet er nicht das kurz zuvor neu konstruierte Riesenzählrohr 11, sondern erneut Zählrohr 10. Entgegen seiner bisherigen Praxis legt er die Hochspannung aber bei diesem Versuch nicht am Gehäuse, sondern am Draht an. Er notiert:

Sp.[ontante] A[usschläge]: +1320 am i.[nneren] Zyl.[inder] (um das Aktivwerden des Zylinders zu vermeiden wird + Spannung verwendet): 50 in 239; i.[n] d.[er] Minute 12,5 (anstatt 28 im 1. Stock und auch bei mangelhaftem Schutz im Freien.)¹⁴³

Auch hier testet er nur drei weitere Spannungswerte (1330, 1340, 1350 Volt) und notiert die Anzahl der spontanen Ausschläge. Nur bei 1330 Volt erreicht er vermutlich ein zufriedenstellendes Ergebnis, da er diesen Wert ebenfalls unterstreicht und sich die Zählrate mit 14,8 Ausschlägen pro Minute nicht deutlich von der Zählrate bei 1320 Volt unterscheidet.

19. Juni 1928: Die erste Messung mit Riesenzählrohr 11

Einen Tag später, am 19. Juni, notiert Müller Absorptionsmessungen von Höhenstrahlung mit dem neuen Zählrohr 11. Auch hier legt er die Hochspannung nun am Draht an. Er notiert weiter, dass das Zählrohr nicht zu nah an den abschirmenden Eisenplatten stehen dürfe, da die daraus "Capacitätsvergrößerung" resultierende die Ausschläge verkleinern würde¹⁴⁴. Während die Dicke der Eisenplatten Richtung Erdboden und zur Seite gleich bleibt, wird der Eisenpanzer nun nach oben sukzessive vergrößert. Nach drei Messungen der Anzahl an spontanen Ausschlägen mit 3cm, 8,9cm und 15,8cm Eisen notiert er als Ergebnis: "Aus diesen Zahlen würde sich bei Annahme eines einheitlichen Abs.[orptions] Koeffizienten ergeben: $\alpha = 0.031$; Restgang 24."145 Auf der nächsten Seite setzt er die Messnotizen nach drei Stunden fort. Er wiederholt die Messung mit 15,8cm Eisen und erhöht dann auf 18,9cm. Danach behält er diese Eisendicke bei und erhöht die Spannung von den bisher verwendeten 1155 Volt auf zuletzt 1250 Volt. Die Anzahl an Ausschlägen steigt zuerst linear an und pendelt sich ab 1200 Volt auf einem Niveau um 210 Ausschläge pro Minute ein. Im Vergleich dazu war die Anzahl bei 1155 Volt 23. Danach baut er den Eisenpanzer auf 8 cm ab und misst erneut. Am Ende notiert er das **Ergebnis:**

 $^{^{143}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 56, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{144}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 57, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{145}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 57, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Ergel	vis:			
Causer:	3[Teilchen:	71±3	Levius er-
	8.9		41 - 2	got oich der
	15,8		25±3	Restgang zu
	18,9		23±2	2.1 der tos
	8		34±4	koeff. zu
		*	ly	2:0,03.

Abbildung 36: Müllers Ergebnis zur zweiten Absorptionsmessung der Höhenstrahlung mit Eisen. 146

Ich habe jedoch keine Messmethode finden können, die diesen Koeffizienten bestätigt. Die Bedeutung des Wortes "Restgang" konnte ich nicht herausfinden¹⁴⁷.

Auf Seite 60 beginnen weitere Experimente zum Spannungsverhalten eines Zählrohrs. Er nutzt hierfür Nr. 5, das beim ersten Auftauchen im Laborbuch noch den Beinamen "Versenkkammer" getragen hatte. Dieses Zählrohr wurde laut Notiz zuvor beschädigt und nun erneut in Betrieb genommen: "Zähler 5 hinter 8cm Fe [Eisen]. Der Zähler wurde, da beim Abschmelzen des Glashahnes Undichtigkeit entstanden war, erneut ausgepumpt und abgeschmolzen."¹⁴⁸ Dies ist der erste direkte Hinweis, dass eine Glaskapillare verwendet wurde, um das Zählrohrinnere zu evakuieren, obgleich die Kapillaren bisher in keiner Zählrohrskizze aufgetaucht sind. Müllers Versuche beinhalten hier neben dem Spannungsverhalten erneut Abschirmungsversuch; diesmal aber mit Radium in nicht angegebener Menge, welches durch 13,5cm Eisen abgeschirmt wird.

21. Juni 1928

Am 21. Juni musste Zählrohr Nr. 5 erneut ausgepumpt und abgeschmolzen werden, da es bei den Versuchen beschädigt wurde. Müller notiert den neuen Innendruck von 54mmHg sowie: "strömender Regen". Letzteres könnte ein Hinweis darauf sein, dass seine danach protokollierten erneuten Höhenstrahlungsexperimente (und die vorigen mit dem Riesenzählrohr) im Freien stattgefunden haben, um vermutlich den störenden Einfluss des

¹⁴⁶ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 58, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹⁴⁷ Im Kontext der späteren Versuche könnte "Restgang" die Anzahl der Ausschläge beziffern, die auf Grund von einem radioaktiv verunreinigten Zählrohr zu Stande kommen. Bei Zählrohr 15 bezeichnet Müller diese Ausschläge nicht mehr mit "Restgang" sondern mit "Restaktivität".

¹⁴⁸ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 60, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Müller Gebäudes 711 eliminieren. schreibt. dass er nun Absorptionskoeffizienten von Eisen genau bestimmen wolle. Das Wort genau' hat er dabei unterstrichen. Der Ablauf ähnelt den vorigen Experimenten: Zuerst sucht er den Spannungswert, bei dem er den Arbeitspunkt vermutet. Er testet drei Spannungswerte. Bei den ersten beiden notiert er, dass einige Ausschläge gruppenweise auftreten würden und daher die Spannung zu hoch sei. Bei 1245 Volt erhält er 17 Ausschläge in der Minute und beginnt die Absorptionsmessung. Im Unterschied zu vorigen Messreihen erhöht er die Messdauer sehr stark. Während er sonst etwa 120 Sekunden gemessen hat, zählt er nun die Ausschläge über 250 bis etwa 800 Sekunden. Für jede Eisenschicht macht er drei Messreihen, deren Ergebnis er aufsummiert. So erhält er eine sehr geringe Standardabweichung des Mittelwerts. Aber auch trotz dieser Bemühungen ermittelt er für diese dritte Absorptionsmessung mit Eisen einen dritten, von den vorigen Absorptionskoeffizienten verschiedenen Wert.

22. Juni 1928

Am 22. Juni notiert er zunächst "Erneute Messung der Absorption von Höhenstrahlung", was jedoch nachträglich gestrichen wurde. Stattdessen werden weitere Kalium-Messungen begonnen. Dazu nutzt er das nun modifizerte Zählrohr Nr. 1, das er erneut abgedichtet und nachträglich mit einer Kapillare versehen hat, denn diese war zumindest in den ersten Skizzen der Zählrohre bisher nicht eingezeichnet.

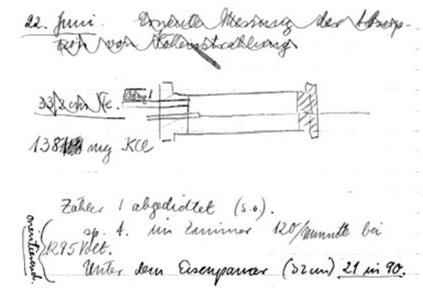


Abbildung 37: Müllers Skizze zum ersten dokumentierten Umbau eines Zählrohrs, hier Nr. 1 ¹⁴⁹.

 149 Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 64, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Im Vergleich zu seinen vorigen Versuchen mit Kaliumchlorid und den dort gemachten Berechnungen ergeben diese hier keinen für mich nachvollziehbaren Sinn mehr. Es wurden viele Streichungen und Korrekturen vorgenommen. Zudem sind einige Werte mit einem Fragezeichen versehen.

27. Juni 1928 und Zählrohr Nr. 12

Die nächste Eintragung passierte 5 Tage später am 27. Juni: Die γ -Strahlung von Kalium sollte erneut mit Zählrohr Nr. 5 bestimmt werden. Das Zählrohr musste aber zuvor nach einer Beschädigung ein weiteres Mal ausgepumpt und abgeschmolzen werden. Damit nur die γ -Strahlung gezählt wird, wurde das Präparat mit 1mm Blei abgeschirmt. Bei einer Betriebsspannung von 1260 Volt und 5g Kalium notiert Müller als Ergebnis: 22,4 Ausschläge pro Minute.

Auf der nächsten Seite dokumentiert Müller die Parameter eines neuen Zählrohrs Nr. 12 mit dem Beinamen "β-Strahl Zähler".

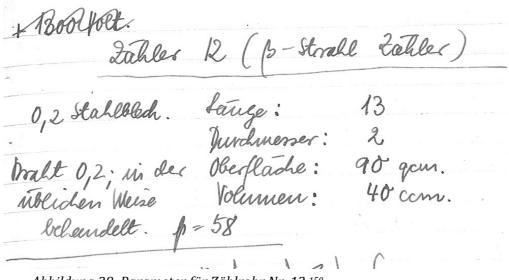


Abbildung 38: Parameter für Zählrohr Nr. 12 150.

Neben Messing und Aluminium ist Stahlblech bei diesem Zählrohr die bisher dritte Variation des Zählrohrmaterials. Bei dieser Notiz kann man erste Gewöhnungseffekte von Müller in Bezug auf die Konstruktion von Zählrohren ausmachen. Die Präparation des Drahtes geschehe "in der üblichen Weise", also meiner Auffassung nach auf Grund der Mehrheit der Laborbuchnotizen erneut mit oxidierender Säure. Die darunter protokollierten Versuche zur Spannungsabhängigkeit der Ausschläge sind gestrichen worden.

¹⁵⁰ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 67, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Auffällig ist hier im Vergleich zum Riesenzählrohr 11 die erneute Mischung der Schreibweisen der Ziffer 1: arabisch und römisch.

30. Juni und 1./2. Juli 1928

Auf der darauffolgenden Seite notiert Müller Messwerte zur "Nachtbeobachtung der Höhenstrahlung" am 30. Juni, welche offensichtlich mit dem neuen Zählrohr 12 durchgeführt hat¹⁵¹. Zwischen 10:30 und 12:05 in der Nacht notiert er insgesamt 10 Messungen über etwa je 500 Sekunden Dauer. Alle durchschnittlichen Zählraten liegen zwischen 27,6 und 30,6 Ausschlägen pro Minute. Am nächsten Tag wiederholt er die Messung mittags und am darauffolgenden Tag morgens mit unverändertem Ergebnis. Darunter beginnt er gänzlich neue Versuche. Er füllt Zählrohr Nr. 5 mit Wasserstoff. Aber weder bei 100mmHg noch 760mmHg Gasdruck ließ sich ein Zählbetrieb herstellen. Auch Zählrohr Nr. 1 wird erneut benutzt. Müller erhöhte hier den Druck auf 500mmHg, aber stellte auch hier fest, dass das Zählrohr so nicht mehr funktioniert.

9. Juli 1928, Die Einheit "Empfindlichkeit"

Am 9. Juli dokumentiert er einen zweiten Umbau des ersten Zählrohrs. Es wurde nachträglich mit einem Glimmerfenster ausgestattet. Ob mit diesem Zählrohr Messungen gemacht wurden, lässt sich nicht sagen, denn danach erfolgt auf Basis einer Messung mit Zählrohr 12 eine Abschätzung darüber, wie viele Ausschläge 1mg Radium in 1m Entfernung zum Zählrohr mit 80cm² Oberfläche erzeugen würde. Der diesbezügliche Überschlag ergibt etwa 3000 Ausschläge. Müller notiert weiter, dass dann 1mg Radium in 10m Entfernung 30 Ausschläge erzeugen würde, was 3 I entsprechen würde. Damit kämen auf 1 I 10 Ausschläge bei einem 80cm² Zählrohr¹5². Diese später in den Publikationen und Laborbüchern propagierte Einheit der 'Empfindlichkeit' als 'Anzahl der Ausschläge auf Grund von 1mg Radium in 1m Entfernung zum Zählrohr' kann man hier zum ersten Mal erahnen.

Danach folgt eine Liste von den bisher häufig benutzten Zählrohren 2, 5, 10 und 12 und deren Zählspannungen. Auf der nächsten Seite sind Zähler Nr. 3 sowie Zähler 14 bis 16 nachgetragen. Deren Konstruktionsparameter folgen auf der nächsten Seite 73 im Laborbuch:

Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 68, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Er schreibt zwar nicht explizit, dass er Zählrohr 12 verwendet hat, nutzt aber die gleiche Betriebsspannung, die er auf der Seite zuvor für Zählrohr 12 nutzte.
 Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 68, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Bei der Einheit "I" könnte es sich hier wiederum um die damals noch verwendete Ionendosisleistung handeln.

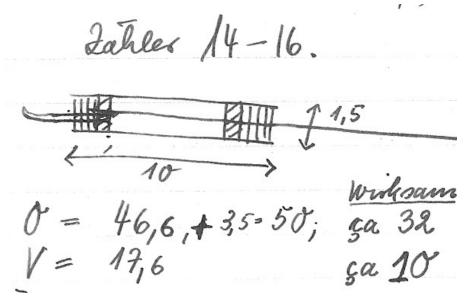


Abbildung 39: Skizze und Parameter von Zählrohr 14-16 ¹⁵³. Die Berechnung des Volumens des Zählrohrs ist nachvollziehbar; die der Oberfläche nicht. Die gesamte Oberfläche des Zählrohrs beträgt nach meiner Rechnung jedoch 47,1 cm². Wenn man annimmt, dass die Werte in der Spalte "wirksam" die jeweilige Oberfläche bzw. Volumen im mittleren Bereich des Zählrohrs meinen, würde die Länge dieses "wirksamen" Bereichs etwa 6 cm betragen.

Für alle drei "Schwesterzähler" 14-16 notiert Müller das Spannungsverhalten in 10-Volt-Schritten. Anschließend werden für die drei Zähler die Werte für deren Empfindlichkeit experimentell ermittelt¹⁵⁴. Für Zähler 16 schreibt Müller: "1/20 mg Radium in 1,15m Entfernung [...] bei 1450 Volt: 73; also abzüglich der ursprüngl.[ichen] Auschläge: 48. 1460 Volt: 85; [abzüglich der ursprünglichen Ausschläge:] 50." Danach folgt die Berechnung: "1mg in 1m Entfernung ergibt für Zähler 16: $50 \cdot 1,15^2 \cdot 20 = 1320$ ". 155 Müller bildet also das Produkt aus der Anzahl an von Radium induzierten Ausschlägen, dem Quadrat des Abstandes und der auf 1mg normierten Menge Radium und rundet das Ergebnis auf 10 ab. Im Vergleich zu 1320 bei Zählrohr 16 kommt Müller bei Zählrohr 15 auf einen Wert von 1080. Da die Zählrohre baugleich waren, hat er wohl auch bei der Berechnung der Empfindlichkeit mit einem vergleichbaren Ergebnis gerechnet. Da dies offensichtlich ausblieb, hat er Zählrohr 15 einer erneuten Prüfung unterzogen und eine Messung unter Eisen-Abschirmung mit beiden Zählrohren gemacht. Auch hier tritt eine

 $^{^{153}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 73, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Für ein Zählrohr Nr. 13 gibt es keine Eintragungen im Laborbuch. Ob 'triskaidekaphobische' Beweggründe, also der weit verbreitete Volksaberglaube um die Angst vor der Unglück bringenden Zahl 13, dazu geführt haben, sei an dieser Stelle dahingestellt.

¹⁵⁵ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 74, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Differenz in der Zählrate auf. Er notiert: "Zählrohr 15 unter Eisen […]: 36,2. Zählrohr 16 unter Eisen 12,7 […] Ergebnis: Der Zähler 15 scheint eine Restaktivität von etwa 25 [Ausschlägen] / Minute zu haben." 156 Dieses Resultat scheint ihn aber nicht zu stören, denn direkt danach misst er mit dem Zählrohr 15 die γ -Aktivität von Uran. Danach wird Zählrohr 15 erneut für eine weitere Messung mit 70mg Thor 157 genutzt.

Bestumming der jo-Aldwitat von Uran.

2 ahler 15.

ohne Uran: 45 in 5,4 ± 3 goealle 323.

mit Uran in 13,2 om Entferning: 91 ± 5. (373)

Vom Uran: 37±8 in 13 cm Entferning.

Abbildung 40: Notizen über eine erste Messung an Uran. ¹⁵⁸ In Anbetracht des Ergebnisses (91-37) ist wohl in der Zeile "ohne Uran" ein Kommafehler aufgetreten. Der nachvollziehbare Wert wäre 54 statt 5,4.

Der 19. Juli 1928

Auf der nächsten Seite findet man den nächsten auf den 19. Juli datierten Eintrag. Spätestens jetzt ist der Zeitpunkt erreicht, an dem die Experimente bzw. deren Ergebnisse für Geiger und Müller wohl ausreichten, da kurz vorher die erste Publikation bereits verfasst und eingereicht worden ist. Erwähnenswert ist jedoch noch mindestens ein Eintrag im Laborbuch: Die letzten Zählrohre, welche von Müller in seinen Laborbüchern explizit skizziert und kommentiert wurden, sind die baugleichen Zählrohre 19-21. Zugleich handelt es sich aber auch um die rudimentärste Skizze. Man kann das Zählrohr lediglich erahnen. Der Fokus liegt offensichtlich auf der Kupfer-Kapillare (Abbildung 41).

 $^{^{156}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 75, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹⁵⁷ Bezüglich der Bezeichnung Thor siehe Fußnote 128.

¹⁵⁸ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 75, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

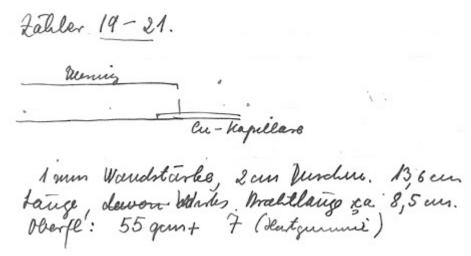


Abbildung 41: Skizze der Zählrohre 19-21 ¹⁵⁹. "Messing. Cu-Kapillare. 1mm Wandstärke, 2 cm Durchm.[esser], 13,6 cm Länge, Wirks[ame] Drahtlänge ca 8,5cm. Oberfl[äche]: 55qcm + 7 (Hartgummi)".

Zusätzlich kann man lesen, dass die Zählrohre durch Abquetschen der Kupferkapillare abgedichtet wurden. Die Zählrohre 19 und 21 hätten aber "beim Abquetschen der Kupferkapillare zuviel Druck bekommen und sprechen infolgedessen bei 1500 Volt noch nicht an." ¹⁶⁰ Rückschlüsse auf die Konstruktion späterer Zählrohre lassen sich nicht ziehen. Dieser Eintrag könnte vermuten lassen, dass das Abquetschen der Kapillare zu schlechten Ergebnissen geführt hat, da zwei von drei Zählrohren diese Prozedur nicht unbeschadet überstanden haben. Ob für nachfolgende Zählrohre erneut die Glaskapillare genutzt wurde oder ob die Methode mit der Kupferkapillare verändert wurde, lässt sich in Ermangelung weiterer Skizzen und Notizen nicht sagen.

Zusammenfassung der Experimente bis zur ersten Publikation

Bis zur ersten Publikation führte Müller Experimente durch, die grob in drei Kategorien eingeteilt werden können (nach Häufigkeit der Laborbuchnotizen in absteigender Reihenfolge): (1) Versuche, welche die Intensität von radioaktiver Strahlung bei verschiedenen Präparaten, wie Radium, 'Thor', Uran und Kalium bestätigen oder im Fall von Kalium nachweisen sollten, dann (2) Absorptionsmessungen der Höhenstrahlung mit Abschirmung durch Eisen und Blei sowie (3) Experimente, bei denen er offensichtlich versucht hat, die Arbeit mit dem Zählrohr zu stabilisieren, indem er dessen Verhalten bei unterschiedlichen Betriebsspannungen und Drucken analysierte. Für diese Versuche nutzte er bis zur ersten Publikation

¹⁶⁰ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 85, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{159}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 86, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

insgesamt mindestens 12 und eventuell sogar 16 Zählrohre mit unterschiedlichen Konstruktionsparametern sowie bisher drei Gehäuse-Materialien Messing, Aluminium und Stahlblech. Ab Zählrohr 11 wird ergänzend zu Länge, Durchmesser und Wandungsstärke zusätzlich Oberfläche und Volumen der Zählrohrgehäuse berechnet und notiert. Für die Drähte nutzte er vorwiegend Stahl in unterschiedlichen Dicken. Platin, Silber Lackdraht schließt er als Drahtmaterial aus. Die "übliche Vorbehandlung" des Stahldrahtes vor dem Einbau passiert durch ein 30-Sekunden-Bad in verdünnter Salpeter- oder Schwefelsäure. Die Validierung der Funktionsweise des Zählrohrs passiert über die experimentelle Überprüfung des exponentiellen Abschwächungsgesetztes für γ -Strahlung sowie über den Versuch der Einführung der Einheit "Empfindlichkeit". Diese gibt einen Zählrohr-charakteristischen Wert an, der sich ähnlich wie das Radiumäquivalent aus dem Produkt einer definierten Menge Radium in normiertem, quadratischem Abstand sowie der zugehörigen Zählrate pro Minute zusammensetzt.

4.3 Exkurs: Die Zählrohre Plön I und Plön II im Spiegel der Laborbücher und Müllers Korrespondenz

Müller hat in seinen Laborbüchern die Zählrohre in der Regel durchnummeriert. Ein paar wenige Zählrohre haben jedoch anstelle oder zusätzlich zur Nummer einen Namen bekommen. Darunter fallen der Kokosnuss-Zähler¹⁶¹, das Riesenzählrohr Nr. 11 (Abbildung 34), der Rutherford Zähler Nr. 22 (Abbildung 46), der Behnken-Zähler Nr. 68, das β -Strahl-Rohr Nr. 12, die Versenkkammer Nr. 5 und die Zählrohre Plön 1 und 2. Die Beinamen charakterisieren in der Regel einen besonderen Zweck eines Zählrohrs: Den Versand an Kollegen, eine außergewöhnliche Konstruktion oder eine spezielle experimentelle Nutzung. Während man beim Namen "Versenkkammer" auf Basis der Laborbücher nur spekulieren kann, dass das Zählrohr irgendwo versenkt werden sollte, sind die Hinweise bei den beiden Plöner Zählrohren deutlicher. In mehreren Briefen an seine Eltern erzählt Müller über geplante Experimente im Plöner See. Nach dem er bereits im Oktober 1928 über die viele noch zu erledigende Arbeit für die "Plöner Expedition" berichtete, schreibt er Ende November, dass die Expedition nach Plön in 8 bis 14 Tagen nun endlich stattfinden würde. Die Experimente hatte Geiger entwickelt und geplant. 1974 schreibt Müller diesbezüglich an Trenn:

[Es] zeigt [sich] jedoch, daß ein klarer Beweis, daß alle Restausschläge Höhenstrahlen zuzuschreiben sind, nicht erbracht worden ist. Um dies zu beweisen, entwarf Geiger eine Apparatur, die in absorbierendes Wasser getaucht werden konnte, und zwar in

 $^{^{161}}$ Über dieses Zählrohr findet man lediglich den Namen und eine Datierung auf den 19.12.1928, vgl. Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 170, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

den Plöner See bis zu mehr als 100m Tiefe. Diese Versuche sind nicht zur Durchführung gekommen, teils wegen schlechten Wetters, Eis usw., und später erlosch das Interesse, als Geiger die Berufung nach München oder Tübingen erwartete. 162

Im gemeinschaftlichen Laborbuch sind Notizen enthalten, die Müller gegenüber Trenn schon zwei Jahre vorher als Geigers identifizierte. Bereits 1972 schrieb Müller diesbezüglich:

Am 27.10.28 war ein neues Zählrohr fertig, das in den Plöner See getaucht werden sollte, um die Absorption von Höhenstrahlen in Wasser zu messen. Zu diesen Messungen ist es nicht gekommen; im Winter war es zu kalt und im Frühjahr brauchten die Biologen ihren Dampfer selbst. Und dann verlor Geiger wohl das Interesse, da bald danach die Verhandlungen über seinen Ruf nach Tübingen begannen. Ich übernahm dann das Protokollbuch und machte vom 6.12.28 einige Eintragungen [...]. 163

Tatsächlich findet man aber schon am 25.10.28 einen Eintrag über die Plöner Zählrohre in Geigers Handschrift. Diesen Eintrag kann man als Notiz über die Vorbereitung der Konstruktion interpretieren, die dann zwei Tage später abgeschlossen wird.

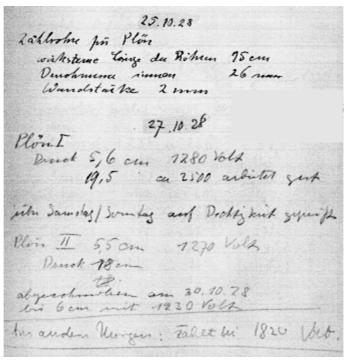


Abbildung 42: erster Eintrag von Geiger über die Zählrohre Plön I und Plön $II.^{164}$

 162 Briefwechsel Müller an Trenn, 14.12.1974, S. 1f, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

¹⁶³ Briefwechsel Müller an Trenn, 20.04.1972, S. 2, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. In nächsten Brief vom 8.5.72 bittet Müller Trenn darum, dass das Wort "Dampfer" gegen Motorboot getauscht werden solle.

¹⁶⁴ Laborbuch im Nachlass von Walter Müller, Eintragung vom 25. und 27.10.1928, S. 21b, Deutsches Museum Archiv München, NL024. "25.10.28. Zählrohre für Plön. Wirksame Länge der Röhren 15cm, Durchmesser innen 26mm, Wandstärke 2mm. 27.10.28. Plön I, Druck

Nach diesem Eintrag von Geiger übernahm Müller das Laborbuch. Der nächste Eintrag ist vom 6.12.1928 und beschäftigt sich mit dem in Abschnitt II.4.4 erläuterten Karusselapparat. Dennoch findet man eine durch einen Kasten abgetrennte Notiz: "Plöner Zähler zählen beide bei 1280 Volt."¹⁶⁵ Geiger wird daher wohl ein Zahlendreher in seiner letzten Notiz über die Zählspannung passiert sein (siehe Abbildung 42, ganz unten).

Wenige Tage vor Geigers Eintragungen findet man in Müllers Laborbuch kommentierte Skizzen zu einer elektrischen Schaltung "für die Tauchapparatur", die er an Zählrohr 37 testete, welches vormals intensiv für Höhenstrahlungsmessungen genutzt wurde und so wohl als zuverlässiges Zählrohr gegolten hat.

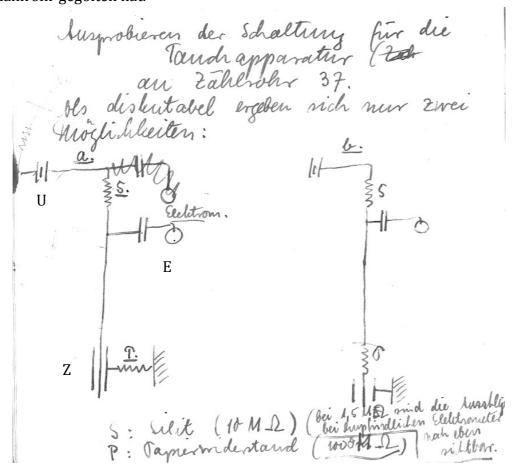


Abbildung 43: Eintrag in Müllers Labor direkt vor dem 22.10.1928. 166

^{5,6}cm[Hg], 1280 Volt, 19,5 [cm] ca 2500 [Volt,] arbeitet gut. über Samstag/Sonntag auf Dichtigkeit geprüft. Plön II 5,5cm, 1270 Volt, Druck 18cm, abgeschmolzen am 20.10.28 bei 6cm mit 1230 Volt. Am anderen Morgen: zählt bei 1820 Volt."

¹⁶⁵ Laborbuch im Nachlass von Walter Müller, Eintragung vom 6.12.1928, S. 23, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

¹⁶⁶ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 138. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Eingezeichnet sind Spannungsversorgung U, Elektrometer E und Zählrohr Z sowie Silitwiderstand S und Papierwiderstand P. "Ausprobieren der Schaltung für die Tauchapparatur an Zählrohr 37. Als diskutabel ergeben sich nur zwei Möglichkeiten: […].

Eine Doppelseite vor dieser Schaltskizze findet man einen unkommentierten Längsschnitt eines Zählrohres, welches in untypischerweise nicht waagerecht, sondern aufrecht gezeichnet worden ist. Zusätzlich zum Zähldraht sieht man einen zweiten Draht, der nach oben aus dem Zähler hinausgeführt wird, dessen Ende im Inneren der Zählkammer an zwei parallelen Platten liegt. Im Kontext der Schaltung und des Vorhabens am Plöner See könnte man diese Skizze als die der baugleichen Zählrohre Plön I und II interpretieren. Das Zählrohr selbst ist vermutlich in eine zusätzliche, wasserdichte Kammer eingebaut. Es hätte dann in seiner Kammer an einem isolierten Kabel ins Wasser hinabgelassen werden können und hinge dann in der skizzierten Position im Wasser. Entsprechende Versuche über die Ausrichtung des Zählrohrs und dessen vernachlässigbaren Einfluss auf die Zählrate wurden schon früher angestellt und sind im Laborbuch dokumentiert (siehe auch Abschnitt II.4.4).



Abbildung 44: vermutliche Skizze der Zählrohre Plön I und II in einer wasserdichten Kammer in Müllers Laborbuch. 167

Anfang November dokumentiert Müller die auch für andere Zählrohre nun üblichen charakteristischen Messungen zur Empfindlichkeit des Zählrohrs Plön I. Diese Eintragung passt zeitlich zu den Notizen von Geiger hinsichtlich der Fertigstellung der Konstruktion der Zählrohre am 30. Oktober 1928.

S: Silit (10 M Ω) P: Papierwiderstand (1000 M Ω). Bei 1,5 M Ω sind die Ausschläge bei empfindlichen Electrometer noch eben sichtbar." Auf der nächsten Seite kann man lesen: "Schaltung b wird anzuwenden sein, da die Apparatur ja in Wasser eingetaucht werden soll." Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 136. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Fahler Plon I. "

1 1 - 5 2 m

Unter risers 180 Voet: 55 in 1'

20 mg in 1,06 Ent f: 229 in 1'

46 in 1'

179. Eurphindlichkeit 3900.

Abbildung 45: Notizen zur Empfindlichkeitsmessung an Zähler Plön I zwischen 25. Oktober und 6. November 1928 168.

Mitte Dezember 1928 schreibt Müller jedoch erneut an seine Eltern, dass die Expedition wohl nicht mehr vor Weihnachten stattfinden würde: "Wir warten noch auf ein Kabel, das immer noch nicht da ist, obwohl es seit Wochen bestellt ist." 169 Am 4. Januar 1929 notiert er im Laborbuch, dass die Zähler Plön I und II beide bei 1130 Volt Betriebsspannung funktionieren würden. Kurz darauf berichtet er seinen Eltern: "Eigentlich hätten wir ja nach Plön fahren wollen, aber es ist natürlich wieder etwas dazwischen gekommen, und zwar die Krankheit von Prof. Zahn, der die Schaltung an einem Spezialteil der Apparatur ausarbeitet." Kurz darauf, am 20. Januar 1929 ergänzt er: "Ich denke, dass jetzt unser viel besprochener Plöner Versuch in Aktion tritt. Es ist jetzt alles fertig zusammen gestellt, ich muss nur noch alles im Institut ausprobieren. Der Plöner See wird dabei durch eine Badewanne ersetzt." Sieben Tage später konnten seine Eltern erneut lesen: "Endlich ist alles für unsere Expedition nach Plön vorbereitet. Jetzt warten wir nur noch auf Tauwetter, denn bei dem Eis können wir natürlich nichts anfangen. Aber wir sind doch endlich soweit, dass alles fertig da liegt." Das Tauwetter hatte offensichtlich im März 1929 noch immer nicht eingesetzt, denn er schreibt nun ein letztes Mal:

Der Plöner See wird demnächst eisfrei, das Motorboot der Biologischen Reichsanstalt ist nach Ostern schwer zu bekommen, also müssen wir möglichst bald unsere Versuche machen. Wir haben in Berlin übrigens auch schon eine ganz hässliche

¹⁶⁸ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 144. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Die Einheit Empfindlichkeit ist die schon in Abschnitt II.4.2 diskutierte Maßeinheit, welche die Anzahl der Zählereignisse auf Grund von 1mg Radium in 1m Entfernung zum Zählrohr angibt.

¹⁶⁹ Briefwechsel Müller an seine Eltern, Dezember 1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

Konkurrenz und müssen uns daher beeilen, die Lösung des Höhenstrahlproblems auf unser wissenschaftliches Konto zu bringen. 170

Trotz der gefürchteten, aber mir leider unbekannten "hässlichen" Konkurrenz in Berlin ist dies der letzte Hinweis auf die monatelang geplanten und vorbereiteten Experimente. Bis zur Durchführung oder gar zur Publikation ist es nie gekommen. Dennoch ist dies wohl die einzige Versuchsreihe, die zusätzlich durch das Laborbuch mit zeitgenössischen und retrospektiven Briefwechseln paraphrasiert und kontextualisiert werden kann.

4.4 Die fünf Publikationen zum Zählrohr

Bezüglich der experimentellen Arbeit in der Frühphase der Entwicklung schreibt Müller 44 Jahre später an Thaddeus Trenn:

Alle Versuche mit dem Zählrohr sind in meinem Arbeitszimmer ausgeführt bis zum Herbst 1928, als Geiger auch in seinem Laboratorium Zählrohre baute, wobei ich und eine Reihe von Doktoranden mitwirkten. [...] Diese Publikation [er meint Geiger & Müller 1929c, SK] ist übrigens, wie alle anderen gemeinsamen Arbeiten von Geiger allein verfaßt, und ich konnte nicht gut wesentliche Änderungen anbringen.¹⁷¹

Diese retrospektive Äußerung zusammen mit Müllers schon vorher zitierten Aussage, dass die Ergebnisse seiner Arbeit häufig nicht notiert, sondern mit Geiger lediglich besprochen wurden, lassen die Publikationen in einem anderen Licht erscheinen, als man ad hoc vermuten könnte. In der folgenden Analyse der Publikationen zum Zählrohr werde ich daher versuchen, die veröffentlichten Thesen, Experimente, Versuchsergebnisse, etc. in den zur Verfügung stehenden Laborbüchern von Müller und dem von Geiger zurückzuverfolgen und – wenn möglich – nachzuvollziehen. Ziel dieser Exegese ist es den in der Fachöffentlichkeit zwar nicht unsichtbaren, aber dennoch bezüglich der Urheberschaft des Zählrohrs marginalisierten Assistenten Müller in einer angemesseneren Form repräsentieren zu können.

"Elektronzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten"

Schon drei Monate nach der Entdeckung der neuen Zählmethode im April/Mai 1928 veröffentlichten Geiger und Müller in den Naturwissenschaften eine kurze Notiz (Geiger & Müller 1928b). Schon im Titel wird auf die Empfindlichkeit des neuen, auf den Namen Elektronenzählrohr getauften Instruments hingewiesen. Es vereine die Empfindlichkeit von Spitzenzähler mit einer großen Zähloberfläche heißt es am Anfang des zweiten Absatzes. Das zu Grunde liegende Prinzip bestünde darin, dass der axial gespannte dünne Draht mit einer isolierenden Haut

 $^{^{170}}$ Briefwechsel Müller an seine Eltern, März 1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{171}}$ Briefwechsel Müller an Trenn, 19.08.1972, S. 2, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

überzogen sein muss, was eine Steigerung der Spannung zwischen Gehäuse und Draht über das eigentlich Funkenpotential hinaus erlaube. Ein in das Elektronenstrahl Gehäuse eintretender würde einen kräftigen Ionisationsstrom in dieser Schicht hervorrufen, der aber infolge der dielektrischen Aufladung der Schicht sofort wieder abreißen würde. Als Beleg für die korrekte Funktionsweise des Gerätes wird die Proportionalität der Gehäuseoberfläche zur Anzahl der über ein Fadenelektrometer zu registrierenden Stromstöße angegeben¹⁷². Neben Korpuskularstrahlen könne auch y-Strahlung über die sekundäre "Elektronenstrahlung" festgestellt werden. Die Empfindlichkeit sei dabei so groß, dass das Zählrohr ohne "Metallpanzer" hunderte von Ausschlägen pro Minute zeige. Die Ursache dafür läge in der Höhenstrahlung, der Strahlung der Zimmerwände und der des Erdbodens. Mit einem allseitigen Eisenpanzer von etwa 25cm Dicke könne man aber die Anzahl an Ausschlägen auf etwa 0,6 pro cm² und Minute reduzieren¹⁷³. Die γ-Strahlung von 100g Kaliumchlorid könne mit einem Zählrohr mit 50cm² Oberfläche nachgewiesen werden¹⁷⁴. Schon 50mg im Innern des Zählrohrs würden jedoch eine Messung auf Grund der häufigen Ausschläge unmöglich machen. Weitere quantitative Messungen werden in Aussicht gestellt.

"Das Elektronenzählrohr" und das Laborbuch zwischen Juli und September 1928

1

aber maximal eine Eisenabschirmung von 18,9cm zu finden (vgl. Abbildung 36 auf S. 97). Auf Seite 59 im Laborbuch findet man direkt neben diesem Ausschnitt eine isoliert stehende Notiz "Restgang 0,8/qcm". Mehr Hinweise auf eine vermutete Abhängigkeit zwischen Anzahl an Ausschlägen und Oberfläche sind nicht zu finden.

174 Die schon mit Zählrohr 5 und 12 verwendete Menge an Kalium in Form von Kaliumchlorid mit 5g war ausreichend um eine Aktivität nachzuweisen, jedenfalls in Müllers Laborbuch. Die einzigen Zählrohre, welche eine explizit notierte Oberfläche von 50cm² hatten, waren die Schwesterzähler 14-16 (vgl. Abbildung 39 auf S. 101). Die 'wirksame Oberfläche' des Prototypen beträgt bei nachträglicher Berechnung jedoch genau 50cm². Eventuell wurden dann die Kalium-Messungen mit dem Prototyp oder dessen Umbau für die in der Publikation gemachten Behauptung als Beleg verwendet. Bei den Messungen mit dem umgebauten Prototypen betrug aber die Menge an Kaliumchlorid schon weit unter 1g. Genau 100g wurden lediglich bei der Vermessung von 100g Kaliumacetat mit Zählrohr 2 verwendet. Dessen Ergebnis hatte Müller aber verworfen.

¹⁷² Diese Abhängigkeit kann man auf Grund der Daten in Müllers Laborbuch zumindest nicht quantitativ belegen. Auf Grund der Arbeit mit Zählrohr 11 (Oberfläche 245cm², Nullrate 150 min⁻¹) und beispielsweise Zählrohr 12 (Oberfläche 90cm², Nullrate 30 min⁻¹) wäre höchstens eine "je größer die Oberfläche, desto mehr Ausschläge" Behauptung haltbar. Bezieht man Zählrohr 15 und 16 in die Bewertung mit ein, so ist dieser Zusammenhang zwischen Oberfläche und Anzahl an Ausschlägen auf Basis von Müllers Notizen auf keinen Fall linear.
¹⁷³ Entsprechende Messungen wurden mit Riesenzählrohr 11 gemacht. Im Laborbuch ist

Zwischen der ersten Veröffentlichung in den Naturwissenschaften und der zweiten in der *Physikalischen Zeitschrift* sind etwa 2 Monate vergangen¹⁷⁵, die im Folgenden kurz am Laborbuch paraphrasiert werden. Die Versuche bis September 1928 beschäftigen sich vorwiegend damit, Nachweisgrenze für die Strahlung von Kalium zu finden. Am 19. Juli notiert Müller am Ende einer Messreihe mit dem umgebauten Zähler 1 "1g [Kalium] in 1 cm Entf.[ernung:] 0,2 [Ausschläge pro Minute]". Er wiederholt die Messung mit einem größeren Präparat von 227g Kaliumchlorid und berechnet, dass anhand dieser Ergebnisse 1g Kalium 0,199 Ausschläge pro Minute verursachen müsse¹⁷⁶. Auf der nächsten Seite misst er an 0,1g Kalium. Hier sei aber die β -Strahlung bei einem Messergebnis von "32 [Ausschlägen] in 94 [Sekunden]" nicht nachweisbar¹⁷⁷. Außerdem wird ein neues Zählrohr 17 konstruiert (Messing, 0,14mm Wandstärke, Draht 0,2mm, 1140 Volt, Nullrate bei 16/min). Bei den Beschreibungen und einer kleinen unkommentierten Skizze scheint es sich ähnlich wie bei Müllers Ionisationskammer für hohe Drucke (Abbildung 28, S. 83) um ein doppelwandiges Zählrohr zu handeln, dessen innerer Zylinder gewechselt werden kann.

Anschließend vergleicht er das Messergebnis von zwei baugleichen Zählern, von denen der eine jedoch aus Aluminium und der andere aus Messing besteht. Neben der Messtabelle notiert er "22 / Minute, d.h. etwa 8-10 Teilchen mehr als zu erwarten. Al[uminum] radioactiv?" Auf der nächsten Seite notiert er seine Beobachtung erneut. Bei der Bestimmung der Nullrate sowie bei der Messung an 1/20 mg Radium zählt der Aluminium Zähler 10 Ereignisse mehr, als das Zählrohr aus Messing. Müller schreibt neben diese Liste erneut: "Al[uminium] radioactiv ??"¹⁷⁸ Er prüft weiter mit dem neuen Zählrohr 17 unter Eisenabschirmung und stellt wiederrum 6 bis 10 zusätzliche Ausschläge fest, wenn er in Zählrohr 17 einen Aluminiumzylinder als inneren Zylinder wählt. Nach mehreren Messwerten notiert er: "Annahme: Al. gibt 2 Ausschläge [pro Minute]. KCl ergäbe 170 Ausschläge. K allein 330 Ausschläge. Aktivität von Al: $6 \cdot 10^{-3}$ von Kalium."¹⁷⁹ Ende Juli 1928 schreibt Müller diesbezüglich an seine Eltern:

Als erfreuliche Tatsache kann ich Euch mitteilen, dass wir gestern die Radioactivität von Aluminium entdeckt haben. Das ist insofern von Bedeutung, dass seit 20 Jahren

¹⁷⁵ Eine differenziertere Angabe ist nicht möglich, da nur der Monat genannt wird, in dem der zweite Artikel in der *Physikalischen Zeitschrift* veröffentlicht wurde.

 $^{^{176}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 76f., Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{177}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 79, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{178}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 80, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹⁷⁹ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 83, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

kein neues radioaktives Element gefunden worden ist, wenigstens nicht mit Sicherheit. Da Geiger augenblicklich in England ist, weiß er noch gar nichts davon, wenn er natürlich auch als Miterfinder zu gelten hat, da wir ja die ganzen Versuche gemeinsam machen. Es ist ein gewisses interessantes Faktum, dass heute auf der ganzen Welt niemand außer der Familie Müller etwas von der Radioaktivität des Aluminiums weiß. Es beträgt übrigens etwa 1/10 der Aktivität des Kaliums und 0,000 000 000 000 1 der von der des Radiums. Die Strahlung scheint sehr hart zu sein, d.h. sehr durchdringend. Ihr könnt Euch denken, wie sehr ich mich über diesen neuen Erfolg freue. Er soll veröffentlicht werden am 22.9. auf der großen Physikertagung, wo er natürlich wieder einmal der Schlager des Tages werden soll. Ihr dürft also nicht zu viel darüber sprechen. ¹⁸⁰

Müllers offensichtliche Begeisterung über die in seinen Augen messtechnisch belegte Eigenaktivität des Aluminiumzählrohrs muss nach Geigers Rückkehr wohl erheblich gedämpft worden sein. Es findet sich nämlich kein weiterer Eintrag im Laborbuch oder gar eine Veröffentlichung, welche eine Radioaktivität von Aluminium thematisiert¹⁸¹.

¹⁸⁰ Briefwechsel Müller an seine Eltern, Juli 1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7. Die Notiz im Laborbuch über den Vergleich der Aktivität kann ich leider nicht nachvollziehen. Die Angaben von 1/10 im Brief im Vergleich zu 6/1000 im Laborbuch weichen deutlich voneinander ab.

¹⁸¹ Aus heutiger Sicht kann es sich auch nur um einen Fehlschluss gehandelt haben, denn alle radioaktiven Isotope von Aluminium können nur künstlich erzeugt werden. Nahezu 100% des weltweiten Aluminiums besteht aus dem stabilen Element Al-27.

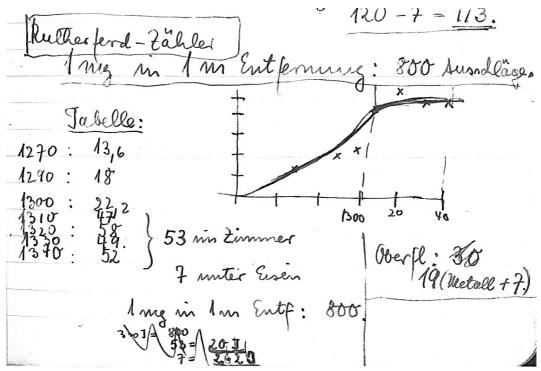


Abbildung 46: Notizen zu Messungen mit dem Rutherford Zähler (vermutlich Nr. 22).182 Zu lesen ist die Anzahl an Ausschlägen auf Grund von 1mg Radium in 1m Entfernung von 800. Gemessen wurde dies mit 1/20 mg Radium in 53cm Abstand (113 Ausschläge pro Minute). Außerdem eine Tabelle und ein zugehöriger Graph über das Verhältnis von angelegter Spannung und Ausschlags-Anzahl. Ab 1300 Volt erkennt man den heute als "Geiger-Plateau" bezeichneten Bereich des Arbeitspunktes.

Nach der Konstruktion eines Zählrohrs für Ernest Rutherford (Abbildung 46) beginnen ab dem 1. September 1928 Abschirmungsmessungen mit bis zu 50cm Eisen. Vermessen werden vorwiegend die Höhenstrahlung und

¹⁸² Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 93, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Details zur Konstruktion fehlen leider. Im (vermutlich) zugehörigen Brief schreibt Geiger an Rutherford am 17. August 1928: "Dear Professor Rutherford, by the same post I am sending you one of the new counting tubes and hope it will arrive in good working order. [...] there is not the slightest difficulty to get it going. The tube Nr 22 is rather a small one, but larger tubes need a great amount of lead or iron to protect them against stray radiation. [...]". Einen Monat später, am 21.9.1928 schreibt Geiger erneut: "[W]e have found lately, that the wires of our counting tubes only last for about a week or two. So I am afraid, that the tube which I have sent you, will also have stopped to work. We prepare the wires now in a different way and apparently with better success. I will send you an other tube shortly which I hope will be reliable." Cambridge University Library, Department of Manuscripts and University Archives, Ernest, Lord Rutherford: Correspondence and Papers, MS Add.7653 663 und 664. Tatsächlich ändert sich laut Laborbuchnotizen um den September herum die Behandlung des Drahtes. Anstatt der bis dato üblichen Säurebehandlung, findet man jetzt häufiger die Notiz, dass die Drähte mit Gasflamme oder Strom ausgeglüht wurden. Am 20. September 1928 notiert Geiger in sein Laborbuch: "0,2mm Stahl in Cu-Kapillaren geglüht". Am 23. September 1928: "Draht bei Atm.[osphären] Druck nochmals 3 Min bei 1,6 Amp.[ere] geglüht."

Radium. Außerdem findet man zunächst in Geigers Handschrift Skizzen zu Versuchen, die eine Orientierungsabhängigkeit des Zählrohrs (mittlerweile ist die lfd. Nr. bei 35) in Bezug auf die Anzahl der Ausschläge prüfen sollte. Eine spätere Darstellung von Müller sieht man in Abbildung 47. Eine Einschätzung von Müller, ob tatsächlich ein Unterschied in den Zählraten auf Grund der Änderung der Orientierung des Zählrohrs zu konstatieren ist, findet man nicht. Rein mathematisch gesehen wäre der Unterschied der Zählraten hinreichend genug um eine solche Behauptung zu stützen.

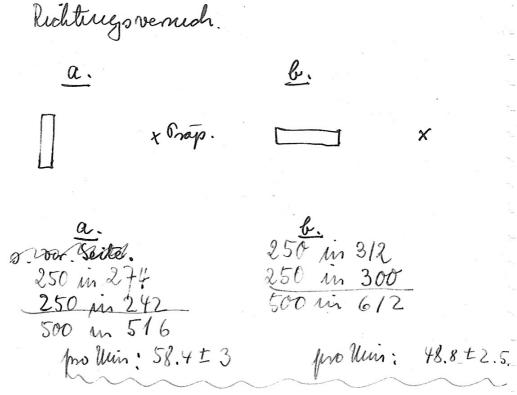


Abbildung 47: Skizze zu einem Richtungsversuch¹⁸³.

Inhaltsanalyse der 2. Veröffentlichung

Während der erste Artikel in den *Naturwissenschaften* eher einer kurzen Bekanntgabe gleich kommt, werden in der zweiten Veröffentlichung (Geiger & Müller 1928a) vom September 1928 einige Details besprochen. Zunächst wird erneut das Funktionsprinzip erläutert, das wiederum anhand der isolierenden Oberflächenschicht auf dem zentralen Draht erklärt wird. Bei einem blanken Draht würde der durch die Ionisationslawine entstehende Stromfluss nicht abreißen. Die kurzzeitige Aufladung der dielektrischen Schicht würde aber das elektrische Feld zusammenbrechen lassen und damit die Entladung abreißen lassen. An Empfindlichkeit sei das Zählrohr mit seiner großen und leicht variierbaren Zählfläche nicht zu übertreffen.

 $^{^{183}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 104, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Gleichzeitig würde ein Zählrohr mit "überraschender Sicherheit und Konstanz über lange Zeiten" arbeiten. Für den Draht eigne sich ein 0,2mm dicker Stahldraht, der in Salpetersäure (HNO3) bis zur deutlichen Schwärzung oxidiert werden solle. Alternativ könne man auch lackierte oder geglühte Drähte verwenden¹⁸⁴. Dieser solle dann mit Hilfe von Hartgummistopfen axial in einem Messingrohr gespannt werden, welches dann evakuiert und anschließend mit trockener Luft auf etwa 5cmHg gefüllt werden soll. Der negative Pol einer 1200V-Spannungsquelle solle am Rohr angeschlossen werden. Der Draht soll mit Fadenelektromenter und einem Erdungswiderstand mit 100 bis 1000 M Ω verbunden werden. Ein korrekt funktionierendes Zählrohr zeige dann über einen Bereich von 50V eine von der Spannung unabhängige Anzahl an Ausschlägen in Gegenwart eines Radiumpräparats. "Fadenbewegungen irgendwelcher Art" am Elektrometer, die mit den sehr großen und gleichmäßigen Ausschlägen auf Grund von Zählereignissen verwechselt werden könnten, würden auch bei langer Beobachtung nicht auftreten. Mit Hilfe einer Tabelle (Abbildung 48) werden drei Beispiele für mögliche Dimensionierungen von Länge, Durchmesser und Wandung eines Zählrohrs gegeben. Die Empfindlichkeit jedes Zählrohrs wird dabei durch die Anzahl an Ausschlägen charakterisiert, welche die y-Strahlung von 1mg Radium in 1m Entfernung in einer Minute hervorrufen würde. Zusätzlich wird die Zahl der spontanen Ausschläge mit und ohne Eisenmantel angegeben. Geiger und Müller nennen die Ausschläge ohne Abschirmung "natürlichen Effekt" oder auch "Reststrahlung". Reduzierung dieser Nullrate durch die Verwendung eines allseitigen 20cm dicken Eisenpanzers sei ein Beleg für die Höhen- und Umgebungsstrahlung im Labor als Ursache dieser Zählereignisse. Eine Eigenaktivität des Zählrohrmaterials wird aber nicht ausgeschlossen¹⁸⁵.

Im zweiten Teil werden die Anwendungsgebiete für das Zählrohr beschrieben. Messungen am schwach radioaktiven Kaliumchlorid seien mit dem Zählrohr effizienter möglich als bei der bisher üblichen evakuierbaren Ionisationskammer von Hoffmann. Das läge daran, dass im Gegensatz zur Ionisationskammer das Zählrohr α - und β -Teilchen äquivalent zählen würde. Daher sei eine deutlichere Differenzierung dieser Zählrate von der Nullrate auch bei weniger Kaliumchlorid möglich. Zur Messung der "Heßschen Höhenstrahlung" beschreiben Geiger und Müller ein mit 17cm Länge und 3cm Breite vergleichsweise sehr großes Zählrohr 186 , welches allseitig von Eisen abgeschirmt wird und im Keller des Instituts aufgebaut wurde. In

¹⁸⁴ Hier möchte ich nur an Müllers Eintrag vom 6. Juni 1928 erinnern, in dem er schreibt, dass Lackdraht als Zähldraht nicht funktionieren würde.

¹⁸⁵ Vielleicht ist dies ein indirekter Hinweis auf Geigers Meinung zur von Müller während seiner Abwesenheit 'entdeckten' Radioaktivität von Aluminium.

¹⁸⁶ Auf dieses Zählrohr (Nr. 3 in der Tabelle) findet man keine Hinweise im Laborbuch von Müller.

Abhängigkeit der Dicke der oberen Eisenschicht wurde die Zahl der Ausschläge gegeneinander aufgetragen. Es wird darauf hingewiesen, dass für die zu erreichende Genauigkeit der Messung nur die Anzahl der Ausschläge relevant sei. Indirekt wird also die Poisson-Verteilung der Ereignisse angesprochen. Daher sei der Aufwand einer Messung der Höhenstrahlung zur Zeit noch sehr aufwendig, da etwa 2000 Teilchen manuell aufgenommen werden müssen. Photographische oder automatische Registriermethoden wären daher wünschenswert, damit man größere Zählrohre verwenden könne, die mehr Impulse pro Minute liefern als man mit dem menschlichen Auge zählen könne. Denn gerade bei der Höhenstrahlung spiele die Schnelligkeit mit der eine Messung durchgeführt wird eine tragende Rolle. Zur Messung von Röntgenstrahlen sei das Zählrohr ebenso geeignet, da es wie auch bei der Messung von γ -Strahlung einen kleinen Raumwinkel mit hoher Empfindlichkeit vereine.

Der 2. Artikel im Spiegel des Laborbuchs

Schon wie im vorigen Abschnitt II.4.2 beschrieben findet man ab Anfang Juni 1928 in Müllers Laborbuch gehäuft Messungen zur Abschirmung von Höhenstrahlung durch Blei und Eisen sowie detaillierte Notizen zur Messung an Kaliumsulfat und -chlorid. In Geigers Laborbuch sind erst nach dem 20. September Eintragungen zu finden. Müller schreibt dazu an Trenn: "Einige Monate später richtete Geiger im Cheflabor eine private Zählrohrforschung ein. (Siehe 20.9.1928)" ¹⁸⁷. Daher scheint Müller dieser Aussage nach auch für diese Publikation die experimentelle Arbeit weitestgehend alleine geleistet zu haben.

Auffällig in dem Artikel sind die erneuten Hervorhebungen der Präparation des Drahtes und dessen ausschlaggebende Wirkung auf die Funktionsweise des Zählrohrs. Zwar werden zusätzlich die Bauteile sowie die grobe Beschaltung eines Zählrohrs benannt, doch wird der Konstruktionsprozess nicht thematisiert. Es werden jedoch die im ersten Artikel versprochenen quantitativen Versuche präsentiert. Zusätzlich werden Maße und Charakteristika, wie die dafür konstruierte Maßeinheit "Empfindlichkeit", von Zählrohren tabellarisch dargestellt (Abbildung 48).

¹⁸⁷ Müller an Trenn, 20.4.1972, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

1	2	3	4	5	6	7
Nr.	Länge cm	Innerer Durchm, cm	Wandstärke mm	Empfind- lichkeit	Zahl der spon Zählrohr ohne Schutz	Zählrohr mit 20 G Fe-Panzer
1. 2. 3-	4,2 5 17	1 1 3	0,07 0,15 1	300 450 5500	12 23 150	3,8 3,8 40

Abbildung 48: Tabelle aus (Geiger & Müller 1928a, 840). Nr. 1, 2 und 3 entsprechen den Zählrohren 35, 30 und 37 im Laborbuch. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig.

Vergleicht man die Daten der Zählrohre mit den Aufzeichnungen im Laborbuch, so findet man deren potentielle Pendants. Es könnte sich bei Nr. 1, 2 und 3 in der Tabelle um die Zählrohre 35, 30 und 37 handeln. Die zugehörigen Notizen zu den letzten beiden Zählrohren sind in Müllers Laborbuch aber erst nach dem 20. September notiert. Nicht erwähnt wird, dass es sich bei den letzten beiden Zählrohren - also die, die für die Kaliumund Höhenstrahlungsmessung verwendet worden sind - nicht wie beschrieben aus Messing, sondern nach Berechnung der Dichte aus Eisen bzw. Stahl gefertigt worden sind. Nur Zählrohr 35 bestand vermutlich aus Messing¹⁸⁸. Dennoch ist auch hier mindestens eine Unstimmigkeiten zu finden: Die Durchmesser von Zählrohr Nr. 3 in der Tabelle bzw. Nr. 37 im Laborbuch stimmen mit 3cm bzw. 2cm nicht überein. Auch die Länge kann nicht bestätigt werden, da die entsprechende Eintragung im Laborbuch nicht vorgenommen wurde (Abbildung 49, oben). Weitere Details zu Zählrohr 30 und 37 lassen sich den folgenden exemplarischen Ausschnitte Seiten entnehmen:

¹⁸⁸ Im Laborbuch ist zusätzlich die Masse von Zählrohr 35 (0,75g) und 30 (1,9g) u.a. angegeben, welches mit Hilfe des Materialvolumens Rückschlüsse auf die Dichte des Materials zulässt. Der Arbeitswiderstand wurde bei Zählrohr 35 laut Notiz über Papier realisiert, vgl. Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 101, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

```
2 Numeter estitzt.
                    Betriebspauning
ereugt durch Kohspann. agregat.
                                                          . Surphidlibbeit des Tables: 360
Weigen Unigenaus glad der Raklerry
der 20 mg in 2,18 m.
                                                                                                3600
       Wie deholing der Kohrntmelmernezen
mit Zahlrohr 37.
  42,4 am. Te.
      in 285
  ·223 in 356
206 in 303 \ 42.3
                         210 in 325
                                                                 Vinelbe Earler
                        222 in 3/3
432 in 638
219 in 3005
 425 in 603
                                                                                                 [150]
                      nud X.
                                                     21 in 281
                     142 in 231
                      167 in 3/3
                       85 in 106.
                      394 in 650
```

Abbildung 49: Ausschnitte aus Müllers Laborbuch bzgl. der Zählrohre 37 (oben) und 30 (unten).¹⁸⁹

Der Graph, der im Artikel die Abhängigkeit der Dicke des abschirmenden Eisenpanzers mit der Anzahl der Zählereignisse in Beziehung setzt, ist ebenfalls in Müllers Laborbuch als Skizze sowie als Wertetabelle zu finden (Abbildung 50 und Abbildung 51), jedoch schon Anfang September.

 $^{^{189}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 129 und 134f., Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

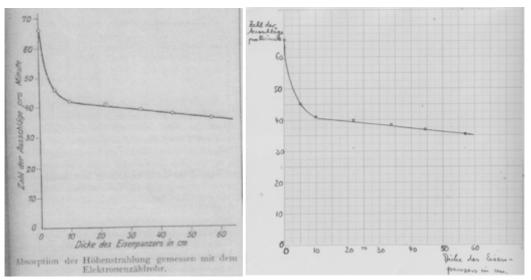


Abbildung 50: links: Abdruck (Geiger & Müller 1928a, 841. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig) und rechts: Skizze zur Abschirmung des Zählrohrs durch Eisen.

2	3. Ceptember		310 270 45
Nach oben:	lo our Eisen.	65/20	uin.) gezatet in) on 60 Teilda,
31			
portion dide:	Seilden in: 250 in 260 150 in 149		58,8 = 3 1000.
15	254 in 328 400 in 48 431 in 38	7 46,4 }	49,3±3,5 67,5±3,4 71,±3,5
10	400 in 331		H ±3,5
5 am Engi	: 400 ii	297.	81/min.
0 en Ein	and and the	239	105/min.
30,1 an Esse 34,8 cm Ess 50,4 cm Es	920 W	151 183	1261 Workers 46
31, 54, 5	148 ii 150 ii	240	38±2
	200 ii		35 37.

Abbildung 51: Zugehörige Daten zu Absorptionsmessungen der Höhenstrahlung in Eisen¹⁹⁰.

¹⁹⁰ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 95f. und Beiblatt, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Diese bisher präsentierten Indizien sprechen also dafür, dass Müller zumindest die Experimente, auf denen die ersten beiden Publikationen aufbauen, alleine durchgeführt hat.

"Das Elektronenzählrohr, seine Arbeitsweise und Anwendbarkeit"

Bei diesem kurzen Artikel (Geiger & Müller 1929a) handelt es sich um einen Bericht über einen Vortrag, den Geiger und Müller auf einer *DPG* Gautagung in Kiel am 16. Februar 1929 gehalten haben.

Der Artikel beginnt mit einer kurzen Beschreibung von Szintillationszählungen und Messungen mit dem Spitzenzähler. Beide Methoden würden sich durch ihre Einfachheit auszeichnen, wären aber gleichzeitig durch ihre geringe Zählfläche in ihren Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt. Diesen Nachteil würde das neu entwickelte Zählrohr nicht mehr besitzen. Es wird der Aufbau sowie das Funktionsprinzip kurz erläutert. Betont wird erneut die isolierende Schicht auf dem Draht, die zu einem Abreißen einer durch Elektronen induzierten Entladung führen würde. Die Empfindlichkeit des Zählrohrs ließe sich durch die Vergrößerung oder Verkleinung der Oberfläche in weiten Bereichen variieren. Die Registrierung von 1000 Ausschlägen pro Minute unter Einfluss von Radium sei möglich und keinesfalls schädlich für das Zählrohr. Ob wirklich alle β -Teilchen vom Zählrohr registriert werden, ließe sich mit zwei ineinander liegenden Zählrohren und der Koinzidenzmethode leicht zeigen. Dennoch käme es auf ein "richtig gebautes" Zählrohr an. Es mache auch im Vergleich zu üblichen Methoden wenig Mühe die Höhenstrahlung auf Meeresniveau mit hoher Genauigkeit nachzuweisen. Das gleiche gelte für den Nachweis der schwächsten zu der Zeit bekannten Aktivität von Kalium, die bei akustischer Demonstration besonders eindrucksvoll sei. Zudem sei der Nachweis von γ -Strahlung bis dato nur bis zu einer Radiummenge von 10µg möglich gewesen. Das Zählrohr biete jedoch die Möglichkeit den Nachweis mit 0,01µg zu führen. Dabei wird das Präparat in die Mitte eines speziell gebauten Zählrohrs gelegt um die isotrope γ-Strahlung in allen Raumwinkeln zu messen. Auch in weiteren nicht aufgeführten Fällen sei das Zählrohr auf Grund seiner großen Empfindlichkeit und wegen der Einfachheit und Sicherheit sehr nützlich.

"Technische Bemerkungen zum Elektronenzählrohr"

Dieser im August 1929 erschienene Artikel ist der umfangreichste, den Geiger und Müller zum Zählrohr veröffentlicht haben. Der Tenor ist jedoch der gleiche, wie in den anderen Artikeln. Zu Anfang werden wiederum die Einfachheit und die Anwendungsvielfalt des Zählrohrs herausgestellt. Es folgt ein Abschnitt über Konstruktionsdetails und deren Einfluss auf die

Funktionsweise des Zählrohrs. Dazu wird ein Graph präsentiert, der den Zusammenhang zwischen registrierten Teilchen pro Minute, dem Luftdruck im Innern des Zählrohrs und dem Rohrdurchmesser illustriert. Daraus geht hervor, dass die mittlere Zahl der Impulse ab etwa 75mmHg konstant zu sein scheint und proportional zum Rohrdurchmesser und damit auch zur Oberfläche des Zählrohrs ist. Dessen Skizze ist vermutlich irrtümlicherweise in Müllers zweitem Laborbuch, welches er schon 1927 führte, als Beiblatt enthalten (Abbildung 52).

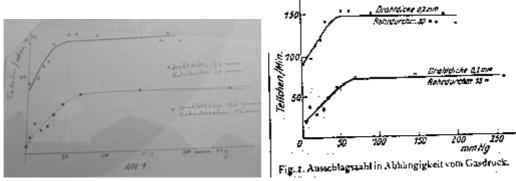


Abbildung 52: links: Laborbuchskizze¹⁹¹ und rechts: Artikelabbildung (Geiger & Müller 1929c, 489. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig) zur Abhängigkeit von Teilchenanzahl, Gasdruck und Drahtdicke sowie Rohrdurchmesser.

Anschließend wird die Spannung, bei dem der Zählbetrieb beginnt, in Abhängigkeit von Gasdruck und Gasart graphisch dargestellt und diskutiert. Ein zweites Diagramm zeigt die gleiche Situation, jedoch bei etwa 10 mal dünnerem Draht (0,03mm im Vergleich zu 0,4mm). Argon und Wasserstoff als Füllgas führen im Gegensatz zu Luft und Kohlenstoffdioxid zu einer kleineren notwendigen Zählspannung. Diese ist die Spannung, bei der ein Maximum an Ausschlägen festgestellt werden kann. Es wird an zwei Stellen erneut auf die Einheit 'Empfindlichkeit' eingegangen (Anzahl der Ausschläge bei 1mg Radium in 1m Entfernung pro Minute), die in Bezug zur Zählrohroberfläche gesetzt wird. Ein exemplarischer Wert beträgt 33 pro min und cm². Im Laborbuch von Müller sind auch diese publizierten Experimente mit Skizzen und Notizen dokumentiert (Abbildung 53).

-

¹⁹¹ Walter Müllers Laborbuch Nr. 2, 1927, Beiblatt, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

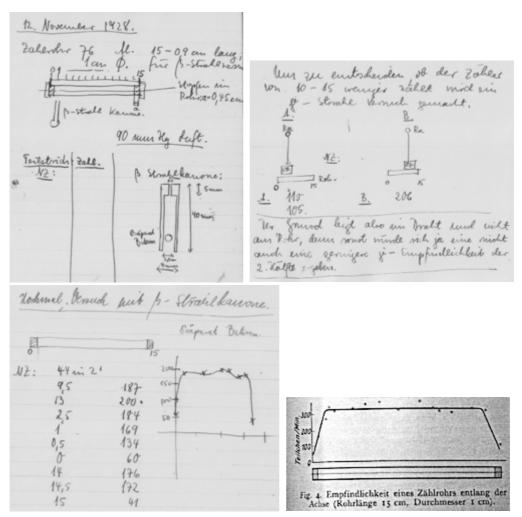


Abbildung 53: Laborbuchnotizen und –skizzen zur Ortsabhängigkeit eines Strahlers¹⁹² sowie unten rechts die entsprechende Abbildung in der Publikation (Geiger & Müller 1929c, 491. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig)

Ein Vergleich der Darstellung der Graphen hinsichtlich der Skalierung und den aufgetragenen Zählraten zeigt jedoch keine Übereinstimmung – weder in Größe noch in der Anzahl der Messpunkte. Die Vermutung, dass es sich um das gleiche Zählrohr handelt, lässt sich hingegen halten. Der Unterschied von 0,1cm im Durchmesser ließe sich durch eine entsprechende Wandung erklären: Im Laborbuch ist innerer und im Artikel äußerer Durchmesser notiert. Die Länge ist die gleiche.

Müllers Laborbuch ist zudem gefüllt mit Tabellen, die den Betrieb des Zählrohrs mit verschiedensten Gasen dokumentieren. Neben Luft ist Argon, Kohlenstoffdioxid, Kohlensäure und Wasserstoff sowie ein Wasserstoff-Luft Gemisch darunter (Abbildung 54, Abbildung 55a und b).

 $^{^{192}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 154, 157 und 162, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Labbrohr 5 mit Waserstoff gefillt.

100 mm Druck; -1390 Volt am dukeren

Lylinder.

Der Lables Labet bei dieser Spannung
jedoch nur schr venig quantitativ, auch sind die
kundlög tröle Prinnaprojeltern noch schribberis.

Weie Versiche mit Waserstoff von Atmosphärendruck. Lieren dimme der Prakte 0,03 mm.

Abbildung 54: Erste Eintragung in Müllers Laborbuch über ein alternatives Gas in Zählrohren am 2. Juli 1928.

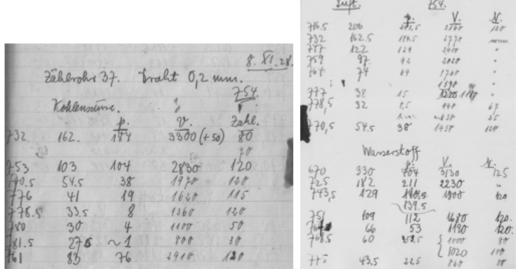


Abbildung 55a: ausführlichere Messreihe zu alternativen Gasen (CO_2 und H_2) im Zählrohr Anfang November 1928 193 .

Diese ersten Versuche mit einer alternativen Gasfüllung der Zählrohre sind jedoch im Juli zunächst gescheitert. Müller schreibt in diesem Ausschnitt: "Der Zähler zählt bei dieser Spannung jedoch nur sehr wenig quantitativ, auch sind die Ausschläge trotz Prismaprojektion noch sehr klein." ¹⁹⁴ Beim Zählrohr handelt es sich jedoch um ein älteres Zählrohr mit der laufenden Nummer 5. Danach wird sogar erneut Zählrohr Nr. 1 mit einem dünneren Draht versehen und ebenfalls zunächst mit Luft auf 500mmHg und dann mit Wasserstoff auf einen Druck von 760mmHg gefüllt. Auch dieser Zähler

 $^{^{193}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 149, 151, 152 und 158, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

¹⁹⁴ Das Wort "Prismaprojektion" könnte darauf hinweisen, dass Müller durch episkopische Projektion den Elektrometerfadens bzw. dessen Schatten vergrößert zur Zählung betrachtet hat

funktionierte nicht wie Müller erwartet hatte. Den Grund dafür findet er nicht und schließt diese Versuchsreihe zunächst ab.

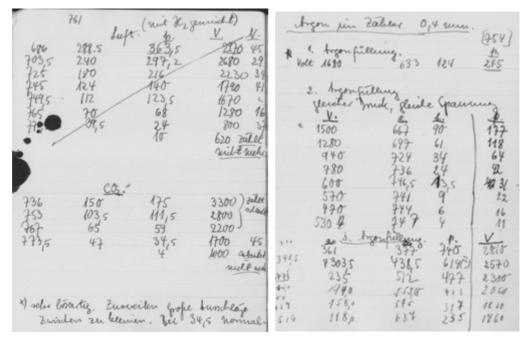


Abbildung 55b: ausführlichere Messreihe zu alternativen Gasen (CO_2 und Ar) im Zählrohr Anfang November 1928 195 .

Im November folgen jedoch ausführlichere Versuche mit weiteren Gasen an denen Geiger oder eine dritte Person wohl ebenfalls beteiligt war. Dies kann man anhand der vereinzelt andersartigen Handschrift vermuten (Abbildung 55a und b). Ähnliche Untersuchungen zur wechselseitigen Abhängigkeit von Zählspannung, Gasart und Drahtdicke führte Müller ebenfalls in den Experimenten im Rahmen seiner nur wenige Monate zurückliegenden Dissertation durch (Müller 1928a, 633).

Die Breite des Zählplateaus, also der Spannungsbereich, bei dem die Anzahl der registrierten Ausschläge konstant bleibt, ist dabei ein Maß für die Güte des Zähldrahtes. In Form einer Tabelle wird ein Beispiel für die Verteilung der Ausschlagszahl in der Region des Zählplateaus von 1200 bis 1600V gegeben. Alle Werte basieren auf einer Zählung von 400 Ereignissen, also mit 5% Standardabweichung. Eine vierte Grafik zeigt die Unabhängigkeit der Zählrate in Bezug auf die Position des Strahlers parallel zum Zähldraht (vgl. Abbildung 53). Das Verlassen des Zählplateaus oder einen falsch präparierten Draht erkenne man daran, dass spontane Ausschläge einsetzen oder Entladungen nicht mehr abreißen würden. Dem könne man vorbeugen, indem man den Ableitungswiderstand über $10^9\Omega$ wählt und keine Drähte benutzt, deren Durchmesser größer als 1mm ist. Dennoch könne man den

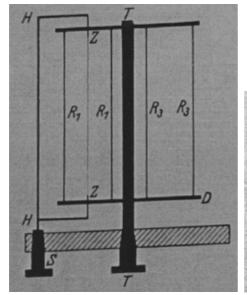
 $^{^{195}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 149, 151, 152 und 158, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Draht auch durch ein mehrere cm dickes Stahlrohr ersetzen, in welches man ein zu messendes radioaktives Präparat direkt einlegen könne, sodass ein Großteil der emittierten Strahlung zur Bestimmung der Aktivität genutzt werden kann¹⁹⁶. Den Grund für ein nicht funktionierendes Zählrohr müsse man zunächst beim Draht suchen. Dieser könnte blanke Stellen haben oder die isolierende Schicht könnte ungleichmäßig aufgetragen worden sein. Beide Optionen hätten eine ungewollte Abhängigkeit der Zählrate von der angelegten Spannung zur Folge. Es wird auch eine Arbeit von Kniepkamp erwähnt, der darauf hinweist, dass eine Vorbehandlung des Drahtes nicht notwendig sei. Das Zählrohr funktioniere also auch mit blankem Draht (Kniepkamp 1929). Die Präparierung des Drahtes solle aber laut Geiger und Müller trotzdem mit den etablierten Methoden vollzogen werden, die auch beim Spitzenzähler erfolgreich angewendet werden: Mit einer Flamme oder Strom kurz ausglühen oder mit Säure oxidieren¹⁹⁷.

Im nächsten Abschnitt folgt die Darstellung einer Untersuchung zum Einfluss des Rohrmaterials auf die Empfindlichkeit der Zählrohre. Dazu wird ein Karusselapparat vorgestellt mit dem vier verschiedene Metalle für das Zählrohr bei jeweils identischem Draht, Druck und Spannung analysiert werden können. Entsprechende Notizen findet man auch im Münchener Laborbuch, die eindeutig von Müller gemacht worden sind (Abbildung 56). Die Rohre hatten jeweils 2,9cm Durchmesser und eine Länge von 11cm. Eine Abhängigkeit vom verwendeten Material wird deutlich herausgestellt.

stellt Müller gegenüber Trenn heraus, dass genau dieser Umstand ein Beleg dafür sei, dass Müller keinen Einfluss auf den Inhalt der Veröffentlichungen hatte. Er schreibt: "In der gleichen Arbeit ist auch ein Widerspruch enthalten; nämlich einmal wird festgestellt, daß der Draht nicht über 1 mm stark sein soll (1. Absatz, S. 491) und im 2. Absatz wird der Draht durch ein Stahlrohr von mehreren Zentimetern Durchmesser ersetzt." Briefwechsel Müller an Trenn, 19.08.1972, S. 2, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{197}}$ Kniepkamp (1929) greift die Versuche regelrecht an: "Doch geben Geiger und Müller an, daß in dem Rohr nur dann eine Löschwirkung nach jedesmaligem Einsetzen des Ionisationsstromes eintritt, wenn der als Anode dienende Eisendraht mit einer schlecht leitenden Schicht überzogen ist, während bei blankem Draht die einmal eingeleitete Entladung nicht wieder abbricht." Geigers und Müllers Behauptungen seien mit Kniepkamps Erfahrungen sowohl mit früheren Aufbauten, in denen er Glimmlampen anstelle von Zählrohren benutzte, als auch mit Nachbauten von Zählrohren mit blankem Kupfer- und Platindraht nicht in Einklang zu bringen. Bei ausreichend großem Vorschaltwiderstand von min. $2\cdot 10^7~\Omega$ würde auch bei blankem Draht eine Löschwirkung einsetzen. Man könnte also vermuten, dass Heinrich Kniepkamp vom Institut für Physik der Landwirtschaftlichen Hochschule Berlin die 'hässliche' Berliner Konkurrenz ist, die Müller jüngst gegenüber seinen Eltern beklagt hat. Die Hochschule wurde 1934 in die heutige Humboldt Universität eingegliedert.



Resteffekt a	Tabelle Il und Empfindlichk us verschiedenem	eit von Zählrohren
Material	unter 20 cm Eisen	Zahl der Ausschläge unter Einwirkung von y-Strahlen
Paraffin	21	58 60
Aluminium	34	60
Eisen	34 28	74
Nickel		70
Messing	27 28	70 73
Zink		66
A CONTRACTOR OF THE PARTY OF TH	STREET, STREET	AN ESTABLISHED AND SERVICE STATES

Imde: ca	. 1926. Labort	michigan Committee
Suparatur ,	uter Eisen. 20 u	in Breitig, Eccu
a. Menning.		for Ulicia.
and Ra	235 in 265.	53,2 ± 3
6. Ecien.		58 ± 3
quil Rec	162 4 60	
c. H.	300 in 267	162
- 1	17/ m 60	171 53
d. Zn:	300 in 255	70,5 E 3
d. En: Mernig:	270 in 265	63,5 ± 3

	THE RESERVE THE PLANT OF
Never brack bos da o reglisapie etwa 3 Kunuter Larry gletzlich per 0 5 %	ler alle bralt
Larry glotzleck pro 0 5 2 to 2	i huy mit mortine.
9715 97712 9900 186 100	30,3 30,35 30,35 40.3
8- Januar 1929. 1079 3 958 4. 1492 1008 205 1018	(-0.0 27,2

Abbildung 56: Oben: Der Karusselapparat im Artikel mit Messwert-Tabelle (Geiger & Müller 1929c, 492. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig) sowie unten: die zugehörigen Eintragen im Münchener Laborbuch (unten links)¹⁹⁸ und Müllers Laborbuch (unten rechts)¹⁹⁹.

Es sticht deutlich heraus, dass keiner der Messwerte im dritten Laborbuch mit denen in der Veröffentlichung übereinstimmt. Am Anfang des vierten Laborbuchs von Müller findet man jedoch erneut Abschnitte zum Karussellapparat, die nun auch die bisher fehlenden Materialien, wie Blei, Nickel und Paraffin enthalten (Abbildung 57).

¹⁹⁸ Laborbuch im Nachlass von Walter Müller, Eintragung vom 6.12.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

¹⁹⁹ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 174, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

14 d 1000	Gerantezebnine.		
18. Januar 1929 Kanwellapparat. Orakt 0,03.	Paraffin suifach:	2/	58.
Warrentoff 500 muss.	blum doppet.	37	60
Paraffirund Widal.	te	27.8	74
may man ender	Ni Ni	27	70
Oaraffin: NZ: 1254 9136/2 126.5 122 1262/2 630.25-225	Nun.	27.8	72,5
128. 8292 36 638:28 225	En.	29	142
Ra. No some	0.0.	3034	107
131		NZ.	Ra.
193 8391 29 081 72,3		1.0.	

Abbildung 57: Laborbuchausschnitte zur Karusselapparatur im vierten Laborbuch von Müller²⁰⁰.

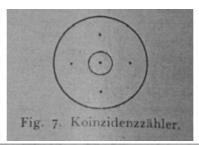
Man findet auf der nächsten Laborbuchseite die Versuche, die auch im Artikel nach denen zum Karusselapparat beschrieben werden (Abbildung 58). Es handelt sich um Koinzidenzversuche mit einem doppelwandigen Zählrohr mit insgesamt 5 Drähten.

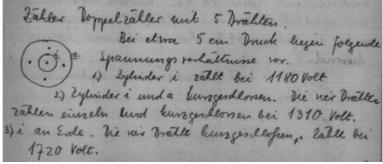
Laut Artikel handelt es sich um ein dünnwandiges Aluminiumrohr mit 1cm Durchmesser im Innern. Dies ist bemerkenswert, da ein paar Absätze zuvor eine Zählanomalie für Aluminium konstatiert wurde, wonach die Zählrate etwa 30% größer als die Erwartung war²⁰¹. Es werden Koinzidenzmessungen für Höhen- und γ -Strahlung gemacht. Die Zählimpulse von äußerem und innerem Zähler werden über ein Relais auf dem selben laufenden Papierstreifen notiert und dann ausgewertet. Im unteren Laborbuchausschnitt findet man den Hinweis auf die Verwendung eines Kopfhörers, über den die Anzahl der Impulse wohl akustisch bestimmt wurde. Der schwer zu kalkulierende Raumwinkel der Strahlung, sekundäre Strahlung sowie das Auftreten von scheinbaren Koinzidenzen, die zeitlich nicht aufgelöst werden können, lassen das Ergebnis mit jeweils knapp 10% koinzidenten Zählereignissen laut Artikel ernüchternd ausfallen. Müller schreibt im Laborbuch: "Versuch 1. 4 Drähte kurzgeschlossen [...] Beide Zähler arbeiten. Der äußere Zylinder ergibt etwa 4 mal soviel Ausschläge wie der innere. Etwa 30% der Ausschläge des inneren Zylinders koinzidieren mit solchen des äußeren. Versuch 2. Messung an zwei gegenüberliegenden Drähten. Alle Ausschläge koinzidieren. "202

 $^{^{200}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 4, 1929, S. 2, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{201}}$ Diese Anomalie hatte Müller schon im Juli 1928 gegenüber seinen Eltern und im Laborbuch festgestellt.

 $^{^{202}}$ Laborbuch im Nachlass von Walter Müller, Eintragung vom 6.12.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024.





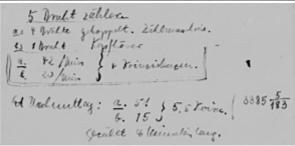


Abbildung 58: veröffentlichte Zeichnung (oben, Geiger & Müller 1929c, 493. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig) und Skizze mit Notizen im Münchener Laborbuch (Mitte)²⁰³ und in Müllers Laborbuch (Unten)²⁰⁴. Die Handschrift in den Laborbüchern scheint jedoch in beiden Fällen Müllers zu sein.

Danach wird ein Zählrohr beschrieben, welches aus den zwei unterschiedlichen Metallen Aluminium und Blei besteht. Ziel dieser Konstruktion sei die Prüfung einer Richtungsabhängigkeit von sekundärer Strahlung. Müller schreibt dazu:

Ergebnis: Bei einem aus 2 Halbzylindern zusammengesetzten Zählrohr ergibt sich für die Ra[dium]-γ Strahlung ein deutlicher Richtungseffect [sic!]. Er beträgt die Teilchenzahl 200, wenn das Blei dem Ra zugewandt ist, 280, wenn das Al[uminium] dem Ra zugewandt ist. In Wahrheit dürfte der Effect etwas größer sein, da die Zählmaschine bei 360 Teilchen, wie im vorliegenden Falle, sicher nicht quantitativ arbeitet, jedenfalls aber noch weniger als bei den 280 Teilchen. Hiermit scheint bei dickeren Zylindern die Hoffnung einer Richtungsbestimmung für die Höhenstrahlung

²⁰³ Laborbuch im Nachlass von Walter Müller, Eintragung vom 6.12.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024.

²⁰⁴ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 181, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

gegeben zu sein. S.[iehe] a.[uch] frühere Versuche, wo schon bei dünnen Blechen die Höhenstrahlung mehr Ausschläge ergab, wenn das Al oben war.²⁰⁵

Im zitierten Ausschnitt des Laborbuchs ließt man Müllers Fazit aus seinen Experimenten mit dem Halbzylinder-Zählrohr, wie er auch im Artikel beschrieben wird²⁰⁶. Der in Abbildung 59 abgedruckte Laborbuchausschnitt beschreibt hingegen die in Aussicht gestellte Anwendung auf Messungen zur Höhenstrahlung. Die Dicke der beiden Materialien ist hier jeweils 1cm. Der Radius beträgt 6cm, obgleich auf Grund der irreführenden Skizze auch der Durchmesser gemeint sein könnte. Notiert sind Uhrzeiten und kumulierte Teilchenanzahlen bei verschiedener Orientierung des Zählrohrs. Im weiteren Verlauf der Aufzeichnungen wird eine Winkelabhängigkeit der hier vertikalen Achse des Zählrohrs experimentell geprüft.

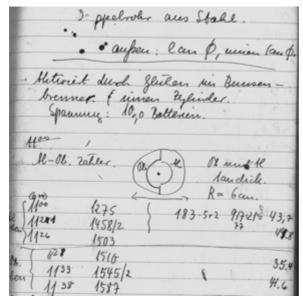




Abbildung 59: links Laborbuch²⁰⁷- und rechts Artikeldarstellung des Halbzylinder-Zählers (Geiger & Müller 1929c, 492. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig).

Der Artikel schließt mit der Bemerkung, dass nicht bewiesen werden konnte, dass ein Zählrohr die absolute Anzahl an zu registrierenden Teilchen quantitativ bestimmt. Ein solcher Beweis wäre auch schwer zu führen, obgleich auch keine Indizien für eine gegenteilige Annahme sprechen würden.

 $^{^{205}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 4, 1929, S. 13f., Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

²⁰⁶ Außerdem findet man den Hinweis, dass er 10 [Anoden]batterien zur Spannungsversorgung benutzt hat. Typische Anodenbatterien lieferten eine Spannung von 120V. Insgesamt hatte Müller damit nachvollziehbar erscheinende 1200 V in Reihenschaltung zur Verfügung.

²⁰⁷ Walter Müllers Laborbuch Nr. 4, 1929, S. 13f. und S.35, Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

"Demonstration des Elektronenzählrohrs"

Der letzte der gemeinsamen Artikel von Geiger und Müller ist in der gleichen Ausgabe der physikalischen Zeitschrift abgedruckt, wie der vorige. Es handelt sich um eine einspaltige, kurze Notiz über die Empfindlichkeit des Zählrohrs und der Demonstration eines automatischen Zählwerks sowie dessen episkopischer Projektion zu Präsentationszwecken. Das Zählwerk würde die Messung an geringsten Mengen von Radium (bis 10^{-6} mg) über eine lange Zeitspanne einfach ermöglichen, wie Neufeldt²⁰⁸ gezeigt habe. Bisher hat die Untergrenze für solche Messungen bei 10^{-2} mg gelegen, die somit um 4 Zehnerpotenzen bei gleicher Genauigkeit unterboten werden konnte.

Hinweise auf ein Zählwerk bzw. eine Zählmaschine sind in Müllers Laborbuch schon früh ab etwa Juli 1928 zu finden, aber nachträglich gestrichen (siehe auch Abbildung 75 und Abbildung 76, S. 159f.). Diese Streichung könnte bedeuten, dass die Experimente mit dieser Maschine noch nicht sehr positiv ausgefallen sind. Die Notiz "40mA bei 8 Volt" könnte der Parameter sein, bei dem ein elektromagnetisches Relais einen Zählimpuls triggert. Da die typische Beschaltung eines Zählrohrs einen etwa 1000-fach geringeren Strom liefert, ist eine verstärkende Röhren-Schaltung dafür notwendig. Aufzeichnungen über eine solche Schaltung findet man weder in Publikationen noch in Laborbuchnotizen. Im Februar 1929 berichtete er schließlich seinen Eltern, dass die automatische Zählvorrichtung Tag und Nacht laufen würde. Weitere Details zur automatischen Zählung sind in Abschnitt II.4.12 zu finden.

4.5 Alles nur geklaut? - Hess & Lawson

Beschäftigt man sich mit dem zeitgenössischen experimentellen Kontext der Entwicklung des Zählrohrs, so findet man ein paar wenige Aufsätze von weiteren Physikern, die nicht direkt aus Geigers näherem Umfeld stammten. Der Ballonfahrer, spätere Nobelpreisträger und Höhenstrahlungspionier Viktor Hess (1883-1964) war zur Zeit der Entwicklung des Geiger-Müller Zählrohrs Ordinarius an der Universität in Graz. Nach der ersten Vorstellung des Zählrohrs auf der Kieler Tagung des DPG Gauvereins Niedersachsen am 7. Juli 1928 fand einer der nächsten öffentlichen Vorträge von Geiger und Müller in Hamburg statt. Müller schreibt im Januar 1929 an seine Eltern:

Der Grazer Ordinarius, der wegen einer wissenschaftlichen Expedition wohl nichts von dem schönen Brief seines Instituts an uns wusste - denn sonst hätte er sich wohl

²⁰⁸ Bei Herrn H. Neufeldt handelt es sich um einen (späteren?) Doktoranden von Geiger, der 1931 in Tübingen seine Dissertation abschloss (Neufeldt 1931). Inwieweit die im Artikel angesprochenen Messungen schon Bestandteil seines Dissertationsprojektes waren, lässt sich nicht sagen. Bemerkenswert jedoch ist, dass Geiger zwei publizierten Ergebnissen der Arbeit in der selben Zeitschrift widersprochen hat (Geiger 1932). Weiter ist unklar, ob Herr Neufeldt in irgendeiner Verbindung zur Kieler Firma Neufeldt & Kuhnke stand, die das Zählrohr ab Ende 1929 produzierte.

nicht so vor uns blamiert - stellte den Anspruch, seit 1916 eine Apparatur zu besitzen, die dasselbe leisten sollte. Geiger entgegnete dann, dass diese Apparatur nur ein genauer Abklatsch einer Apparatur [gemeint ist der Kugelzähler, SK] sei, die er bereits 1912 veröffentlicht habe. Mit der aber der ungeheure Grad von Genauigkeit und Präzision nicht zu erreichen sei, den unser Zählrohr hätte. Im übrigen sei es bedauerlich für die Wissenschaft, dass in den letzten 12 Jahren keine Ergebnisse aus der schönen Grazer Apparatur herausgeholt worden seien. Wenn dieser arme Herr Hess aus Graz nun erst von dem Brief seines Instituts an uns erfährt, wird er wahrscheinlich ganz geknickt sein. 209

Tatsächlich scheint Hess' Einwand auf den ersten Blick gerechtfertigt zu sein. Es handelt sich aber nicht um eine 'Grazer Apparatur', sondern um eine aus Wien. Viktor Hess hatte zusammen mit Robert Lawson am *Wiener Institut für Radiumforschung* der *Österreichischen Akademie der Wissenschaften* einen halbkugelförmigen Zähler aus Kupfer konstruiert und dessen Entwicklung 1916 in den Mitteilungen des Instituts veröffentlicht.

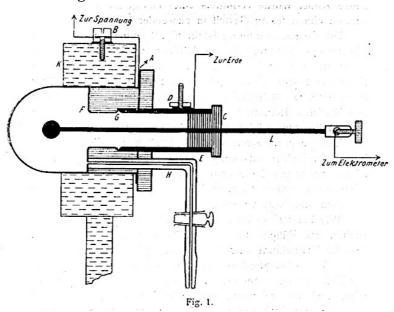


Abbildung 60: Der Zähler nach Hess & Lawson (Hess & Lawson 1916, 5)²¹⁰. Gehäuseradius etwa 9mm, innerer Kugelradius 2mm, angelegte Spannung 1480V. Mit freundlicher Genehmigung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.

²⁰⁹ Müller an seine Eltern, Januar 1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Zu dem angesprochenen Brief aus Graz schrieb Müller schon im September an seine Eltern: "Es interessiert Dich vielleicht, dass wir neulich einen Brief aus Graz bekommen haben, in dem uns die dortige Physikerschaft mitteilt, sie habe Versuche mit dem Zählrohr gemacht, ohne es allerdings in Gang zu bringen. Sie baten uns um nähere Angaben, da sie beabsichtigen, Höhenstrahlungsmessungen zu machen. Wir haben ihnen dann geantwortet, dass wir die Einzelheiten des Verfahrens in Hamburg bekannt geben würden, im übrigen aber die betr. Höhenstrahlversuche bereits ausgeführt hatten u. ebenfalls in Hamburg vortragen würden." Müller an seiner Eltern, 7.9.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

²¹⁰ Die Größenangaben sind nur schwer einzuschätzen, da bis auf wenige Ausnahmen alle Maße aus der Zeichnung entnommen werden sollten, die mit 1,3facher Vergrößerung in dem Artikel, dessen Originalformat nur abgeschätzt werden kann, skizziert sind. Der Fixpunkt für meine Abschätzung der Dimensionen ist daher der Hinweis, dass die Kugelanode eine Fahradlagerkugel mit 4mm Durchmesser gewesen sei (Hess & Lawson 1916, 4f.).

Grund der Entwicklung war der Nachvollzug der von Müller gegenüber seinen Eltern erwähnten Messungen zur Stoßionisation photographischen Registrierung von α-Teilchen von Rutherford und Geiger mit dem Kugelzähler aus dem Jahr 1912 und die Erweiterung der Messmethode auf β-Strahlung. Zu diesem Zweck hatten Hess und Lawson eine Ionisationskammer ähnlich der von Rutherford und Geiger verwendeten Kammer konstruiert. Nach ersten Versuchen zeigten sich kleine Entladungen, durch Elster-Geitel'sches unregelmäßige die ein Fadenelektrometer aufgezeichnet wurden. Nachdem durch eine nicht näher spezifizierte Metallschicht der Einfluss von α- und β-Strahlung auf die Kammer unterbunden wurde, wurde ein Radium- oder Mesothor-Präparat in das Zimmer gebracht. Die steigende Anzahl der kleinen Entladungen von ca. 1 Volt bei geringer werdender Entfernung der Präparate schien den Verdacht auf der Einfluss von γ-Strahlung des Radiums auf die Zählkammer zu rechtfertigen: "Ihre Zahl änderte sich annähernd verkehrt proportional mit dem Quadrat der Entfernung zwischen Präparat und Zählkammer." (Hess & Lawson 1916, 3). Geiger und Rutherford hatten selber schon 1912 vor Geigers Rückkehr aus England die Verwendung des Kugelzählers und das Prinzip der Stoßionisation für die Zählung von β-Strahlung in Betracht gezogen und einen Artikel dazu veröffentlicht (Abbildung 61).

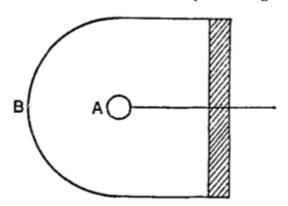


Abbildung 61: Längsschnitt des Kugelzählers (Geiger & Rutherford 1912, 620) "It consisted of a metallic hemisphere, near the centre of which was a spherical electrode A supported by a metal rod. The α particles entered in the hemisphere through the opening B which was covered with a thin sheet of mica." Mit freundlicher Genehmigung der Taylor & Francis Verlagsgruppe.

Geiger scheiterte kurz darauf in Berlin am Nachbau dieses Zählers auf Grund einsetzender Funkenentladungen und konstruierte das später 'Spitzenzähler' genannte zylindrische Instrument zur Zählung von β-Strahlung.

Der Inhalt der Arbeit von Hess & Lawson

Das Gerät zur Zählung von γ-Strahlen von Hess und Lawson hatte tatsächlich viele technische Ähnlichkeiten zum Zählrohr von 1928: Das Kugel-Gehäuse lag auf negativem Hochspannungspotential von 1450 Volt, welches über Batterien realisiert wurde. In der Zählkammer herrschte ein Unterdruck von 41mmHg. Die Kammer wurde mit wochenlang über hochprozentiger Schwefelsäure getrockneter Luft gefüllt, die über ein mit Phosphorpentoxid beschichtetes Rohr in die Kammer geleitet wurde. Die beiden Autoren weisen ausdrücklich darauf hin, dass nur mit sorgfältig getrockneter und staubfreier Luft reproduzierbare Ergebnisse erhalten werden könnten. Die so erzielbaren, durch y-Strahlen induzierten Entladungen könnten in ihrer Amplitude durch die angelegte Gehäusespannung leicht bis auf 10 Volt angehoben werden. Eine weitere Erhöhung wäre nicht ratsam, da man sich dem Bereich der Funkenentladungen nähern würde (Hess & Lawson 1916, 7f.). Nach der Beschreibung ihrer Apparatur stellen Hess und Lawson ausführlich die Ionisationsprozesse in der Zählkammer dar. So sei nicht die y-Strahlung direkt die Quelle der Stoßionisation, sondern die sekundär im Gehäuse erzeugten β-Strahlen. Die Abspaltung von Elektronen am Kupfer der Zählerwand und der Ionisationsprozess der Luft seien dabei prinzipiell analoge Vorgänge. C.T.R. Wilsons Ionisationsexperimente in seiner Nebelkammer würden zeigen, dass sich auf beiden Seiten einer Kupferplatte β-Strahlungsbündel von 1 bis 3cm Radius sowie vereinzelte charakteristische Röntgenstrahlungsspuren mit 1mm Länge ausprägen würden. Auch in Abwesenheit des Radiums stellten die Forscher etwa 12 bis 13 Ausschläge pro Minute fest:

Die Zahl dieser "natürlichen Stöße" pro Zeiteinheit blieb bei konstanten Versuchsbedingungen außerordentlich konstant; sie betrug im Mittel aus je 10 Minuten etwa 12 bis 13 Stöße pro Minute und wurde mit verschiedenen Zählapparaten [...] immer wieder bestätigt gefunden.

Diese Konstanz ist an und für sich schon ausreichend, um die Möglichkeit auszuschließen, daß diese "natürliche Zahl" etwa denselben Ursprung hat wie die "natürlichen Störungen", welche bei der Benützung der Geiger'schen Zählmethode mittels Spitzenentladungen [...] bemerkt worden sind; [...].

[Die leichte Schwankung der natürlichen Stöße] scheint - wenigstens zum Teil erklärbar zu sein durch eine zeitweise geringe "Verseuchung" des Zimmers, in welchem wir arbeiteten, da wir wiederholt bemerken konnten, daß die Methode auch die Anwesenheit sehr geringer Mengen von Radiumemanation im Zimmer erkennen läßt. (Hess & Lawson 1916, 13f.)

Spitzenentladungen schließen beide aus, da die innere Oberfläche des Zählers und die der Kugel sorgfältig poliert wurden. Die Ebonitfassung der Kupferhalbkugel wurde an den Ecken abgerundet. Bemerkenswert ist noch, dass der mit 1,5g stattliche Radiumvorrat des Instituts etwa 10m entfernt aufbewahrt wurde. Um den Einfluss dieser Strahlungsquelle zu eliminieren wurde der gesamte Vorrat in einen weit entfernten Kellerraum des Instituts

gebracht, um die Laufstrecke der Strahlung und die Mauerdicke beträchtlich zu vervielfachen. Eine Änderung der natürlichen Anzahl von Impulsen konnte jedoch nicht festgestellt werden. Weitere Versuche beschäftigen sich mit der Charakterisierung der von außen kommenden Strahlen durch Abschirmung des Zählers mit Bleiplatten verschiedener Stärke. Die Tatsache, dass bei einer Abschirmung von bis zu 10cm Blei im Mittel noch 9,6 Ausschläge pro Minute registriert wurden, lässt die Autoren vermuten, dass es sich um eine Strahlung handeln müsse, die noch energiereicher als die γ-Strahlung von Radium C ist²¹¹. Eine weitere Hypothese ist auch eine durchdringende Komponente der von Hess entdeckten Höhenstrahlung und eine ähnliche Strahlung, die aus der Erde heraus tritt:

Wir wollen zunächst eine weitere Möglichkeit, nämlich die in geschlossenen Gefäßen stets beobachtbare durchdringende Strahlung besprechen, welche auch als Ursache der "natürlichen Zahl" denkbar wäre.

Die hierüber in den letzten Jahren erschienenen zahlreichen Arbeiten haben wenigstens sichergestellt, daß die am Erdboden in geschlossenen Gefäßen herrschende Ionisation zum Teil der γ-Strahlung des Erdkörpers (innerhalb von Gebäuden auch der γ -, beziehungsweise β -Strahlung des Materials der Mauern), zum Teil aber auch einer von oben kommenden Strahlung zuzuschreiben ist. [...] (Hess & Lawson 1916, 17)

Eine potentielle restliche Zahl an natürlichen Stößen könnte durch eine potentiell weichere β-Komponente des Kupferblechs herrühren. Als Obergrenze für die Halbwertszeit eines solchen Isotops wird auf Basis von Stößen durchschnittlich 12 natürlichen pro Minute und einem Kupfervolumen von 0,09cm³ der Wert von 5 · 10¹⁴ Jahren angegeben.

Die einzelnen Messungen der Anzahl an Impulsen werden zusätzlich statistisch ausgewertet, indem der Zerfallsprozess mit dem Zerfallsgesetz (als die Bateman'sche Formel²¹² bezeichnet) beschrieben wird. Dazu werden Messintervalle von 10 Sekunden gebildet, über die die Anzahl der Stöße aufsummiert wird. Zudem werden mit vier unterschiedlichen Radiummengen zwischen 1,1mg und 8,7mg ein in den Fehlergrenzen konstantes Verhältnis zwischen Stoßzahl und Radiummenge sowie mit Einschränkung die $1/r^2$ -Charakteristik für die Entfernung zwischen Präparat und Zähler festgestellt. Diese Tatsache könne man - wohl ganz im Sinne des Radiuminstitutes in Wien - gut für Eich-Prozesse von Radium und anderen radioaktiven Präparaten verwenden.

Im letzten Teil der Arbeit werden detailliert die Variation von Druck und Spannung diskutiert. Der Druck in der Kammer wurde von etwa 3mmHg bis 41mmHg variiert. Die Spannung wurde analog dazu so verändert, dass die Amplitude der Stöße für jede Messung konstant bleibt. Das Ergebnis dieser

²¹² Das mathematische Modell, welches den radioaktiven Zerfall (Gleichung 1 in Abschnitt I.2) beschreibt, wurde von Harry Bateman 1910 eingeführt, vgl. Bateman 1910.

²¹¹ Die heutige Bezeichnung des Isotops wäre Bismut-214.

Untersuchung zeigt einen linearen Anstieg der Stoßanzahl pro Minute bei steigendem Gasdruck. Außerdem folgt noch eine experimentelle Betrachtung des Verhältnisses von Impulsamplitude und der Größe des Arbeitswiderstandes.

Physikalische Reflektion der Arbeit von Hess & Lawson

Auch auf den zweiten Blick sind also die funktionellen Ähnlichkeiten zum Geiger-Müller Zählrohr und auch mögliche Schlussfolgerungen hinsichtlich der Ursache für die festgestellte Nullrate bestechend. Auch in Müllers retrospektiv beschriebener Vorgehensweise bei der Entwicklung seines Zählrohrs sind einige Punkte auffallend ähnlich. Ein offensichtlicher phänotypischer Unterschied bleibt jedoch noch zu klären: Die Bauform und das resultierende elektrische Feld. Die Feldstärke des Zählers von Hess und Lawson ist im Vergleich zum Geiger-Müller Zählrohr bei gleicher Spannung eine viel geringere, aber hat einen höheren Feldgradienten. Letzterer würde so auch beim Hess-Lawson Zähler zu einer stärkeren Beschleunigung der negativen Ionen zum Draht hin führen, was wiederum Stoßionisationseffekte zur Folge hätte. Die negativen Ionen können aber im Vergleich zum Zählrohr sehr viel weniger Energie aus dem elektrischen Feld aufnehmen, da sie schon 2mm vor dem Feldursprung auf die Anoden-Kugel im Zentrum des Zählers auftreffen. Beim Zählrohr verhindert der Anodendraht lediglich die letzten 0,15mm an Beschleunigung der Ionen in Richtung Feldmittelpunkt (siehe Abbildung 62 sowie Abbildung 60 auf S. 129).

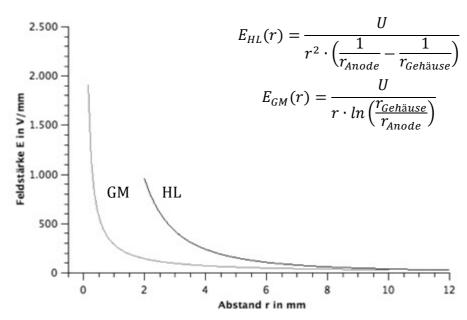


Abbildung 62: Vergleich der Feldstärken E in Abhängigkeit des Abstands r zur Anode. Zähler nach Hess und Lawson (HL): Gehäuseradius 9mm, Anodenradius 2mm, U=1450 V. Geiger-Müller Zählrohr Prototyp (GM): Gehäuseradius 10mm, Anodenradius 0,15mm, U=1200 V.

Zusätzlich ist die wirksame Oberfläche des Geiger-Müller Zählers mit 50cm² etwa 10 mal so groß, wie die des Halbkugelzählers von Hess und Lawson mit nur 5cm². Die Anzahl an ausgelösten Elektronen aus dem Gehäusematerial ist somit geringer. Beim Hess-Lawson Zähler werden also im Vergleich zum Geiger-Müller Zählrohr weniger Sekundärelektronen im Innenraum erzeugt, die kurz vor Auftreffen auf die Anode auch sehr viel weniger Energie besitzen, um weitere Gasmoleküle durch Stoß ionisieren zu können. Aus einer physikalisch-technischen Perspektive war der Zähler von Hess und Lawson daher dem Geiger-Müller Zähler eher unterlegen²13.

Inwieweit Müller oder Geiger die Arbeit aus Wien tatsächlich als Inspiration oder Vorlage für eigene Experimente verwendet haben, lässt sich jedoch nur schwer beurteilen. Ein Indiz, welches gegen die Kopie durch Müller spricht ist die Rezeption des Artikels und die Relevanz, welche die Arbeit von Hess und Lawson in den späten 1920er Jahren noch hatte. Als Standardgerät für die elektrische Zählung von radioaktiver Korpuskularstrahlung hatte sich der Spitzenzähler über die Jahre hinweg etabliert. Die Geräte von Townsend und Kirkby sowie Rutherford und Geiger, die auf Basis der Stoßionisation arbeiteten, haben in der Zeit auf Grund der bestehenden Zweifel durch die offensichtlich ständig auftretenden Artefakte an Bedeutung verloren. Zudem wurde der Artikel von Hess und Lawson in der 'Hauszeitschrift' des Wiener Radiuminstituts veröffentlicht und das im Jahr 1916 als der erste Weltkrieg in ganz Europa tobte. Durch den Kriegsdienst war wohl auch Zeit und Muße für das Studium von wissenschaftlichen Artikeln der Hauptkriegspartei Österreich-Ungarn nur bedingt vorhanden. 1957 schreibt Müller, dass wohl die Schwierigkeiten der Herstellung eines runden, glatten Gehäuses der Grund gewesen sei, warum sich der Hess-Lawson Zähler nicht durchgesetzt hat²¹⁴.

Es wird aber deutlich, dass Hess und Lawson Aspekte des Handlungswissens und der materiellen Kultur für den Erfolg oder Misserfolg bei Experimenten mit ihrem Zähler in das Zentrum ihrer Publikation stellen. Umfangreiche Passagen des Artikels thematisieren in einem hohen Detailgrad Konstruktion

Zähler aus Kupfer war, bestanden die Zählrohre in der Regel aus Messing oder Stahl. Reines Kupfer (und auch Aluminium) schließt Müller zumindest als geeignetes Material für Spitzenzähler aus, da man es nicht richtig 'aktivieren' konnte. Dieser Prozess des Aktivierens beschreibt die Tätigkeiten, die notwendig waren, um den Funkenüberschlag in Spitzenzählern möglichst lange zu verhindern. Eine genauere Beschreibung dieser Tätigkeit, die über die Säurebehandlung oder das Ausglühen hinaus geht, kann Müller aber nicht geben. Da Müller sich aber bei der Konstruktion an den Parametern des Spitzenzählers orientiert hat, kann man auch auf Basis der fehlenden Laborbuchnotizen hinsichtlich Kupfer vermuten, dass er die gleiche Prämisse für das Zählrohr angenommen hat und daher keine Kupfer-Zählrohre konstruiert hat, vgl. Müller an Wildhagen, 10.05.1957, S. 3, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

²¹⁴ Müller an Wildhagen, 10.05.1957, S. 4, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

und Umgang des Zählers. Die Oberflächen von Kathode und Anode müssten sorgfältig poliert werden, die Luft müsse zum einen staubfrei und zum anderen intensiv mit Schwefelsäure und Phosphorpentoxid getrocknet und alle Kanten innerhalb der Zählkammer müssen abgerundet sein. Im Vergleich zu Artikeln von Rutherford, Geiger und Müller strotzt die Veröffentlichung von Hess und Lawson noch vor weiteren Details, die das komplette Gerät in dessen Aufbau und Justage genau beschreiben.

4.6 Das Zählrohr unter Plagiatsverdacht. Myssowsky & Nesturch

Ein ähnliches Schicksal durchlebte auch ein anderes Experiment, aber schon zwei Jahre vorher. Schon Anfang 1914 veröffentlichten zwei Forscher vom physikalischen Institut der Universität in St. Petersburg eine weitere Arbeit zur Wiederholung der Experimente von Geiger und Rutherford über die photographische Registrierung von α-Teilchen von 1908. Der Artikel erschien Anfang 1914 in den Annalen der Physik in deutscher Sprache (Myssowsky & Nesturch 1914). In deutscher Literatur ist über die beiden Forscher leider nicht viel zu finden. Meinen Recherchen nach ist dies der erste Artikel von Lew Myssowsky (1888-1939) gewesen. Bis auf den (auch sehr fraglichen) Vornamen Kyrill ist über Nesturch nichts zu finden. In Anbetracht der Zeit und der nahen Oktoberrevolution ist dies aber nicht erstaunlich. 1922 wurde Myssowksy Leiter des Radiuminstituts in St. Petersburg und war führender Wissenschaftler der russischen Community der Höhenstrahlungsforschung, deren Arbeit parallel zu der von Walther Bothe, Werner Kolhörster, Hans Geiger, Robert Millikan und Bruno Rossi in den 1930igern stattfand.

Inhalt des Artikels

Die beiden Physiker widmen sich in ihrer Arbeit den "natürlichen Störungen", die von Rutherford und Geiger 1908 beschrieben und den Wänden des Zylinderkondensators zugeschrieben wurden. Myssowsky und Nesturch haben durch ihre Untersuchungen feststellen können, dass dies nicht der Fall sei und vielmehr von der Beschaffenheit die Störungen Elektrodenoberflächen und der Straffheit des axial gespannten Drahtes abhängen würden. Dabei benutzten sie einen Zylinderkondensator, dessen äußeres Gehäuse auf negativem Potential lag. Sie stellten auch fest, dass Druck, Spannung und Radius des Kondensators direkt im Zusammenhang zur Anzahl der 'Störungen' stehen. Aufgrund des sorgfältigen Polierens der Oberflächen des Kondensators gelang es den beiden Russen auch Rohre über 2cm Durchmesser zu bauen, was Rutherford und Geiger kategorisch ausgeschlossen hatten, da sonst die Zahl der natürlichen Störungen zu zahlreich werden würden. Bezüglich des Halbkugelzählers und des Spitzenzählers äußern Myssowsky und Nesturch ähnliche Bedenken: Die natürlichen Störungen können auch bei kleinerem Durchmesser der Gehäuse nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Daher sei Geigers Behauptung, dass er mit dem Spitzenzähler alle z.B. von Radium emittierten Teilchen registrieren könne und die Messung nicht durch andere Einflüsse beeinträchtigt wird, nicht statthaft. Alle elektrischen Methoden, die bis dato vorgeschlagen wurden, seien daher im Vergleich zur Szintillationsmethode nicht glaubwürdig.

Geigers Reaktion auf den Artikel

Im April 1914 widerspricht Geiger in den Annalen den Behauptungen von Myssowksy und Nesturch auf Rutherfords Vorschlag hin. Rutherford schrieb vor dem Widerspruch an Geiger:

I have not seen the paper you [Geiger, SK] mention in the *Annalen*, but I presume it is the same people of which an abstract was in *Le Radium*. I only laughed when I read it, for I think we both agree that there is not the least doubt about the correctness of our counting experiments [...] I think you had better send a short reply to their paper [...] If you will allow a word of advice, I would indicate indirectly that you consider their experimental methods untrustworthy.²¹⁵

Geiger nahm Rutherfords Vorschlag anscheinend an. In beiden Fällen – der Ionisationskammer von Rutherford und Geiger und Geigers Spitzenzähler – sei es den beiden Russen nicht gelungen, "die richtigen experimentellen Bedingungen für die Zählungen zu erhalten. Es spricht wohl schon allein die gute Übereinstimmung des damals gefundenen Zahlenwertes mit dem später durch Szintillationsversuche erhaltenen Wert ausreichend für die Richtigkeit der ersten Versuche." (Geiger 1914, 815)

Wie schon in den Abschnitten II.3.2 und II.3.3 ausführlich diskutiert wurde, waren unkontrollierbare Entladungen lange Zeit das größte Problem bei der Arbeit mit dem Spitzenzähler und auch dem früheren Zähler von 1908. Die Verwechslungsgefahr solcher Artefakte mit tatsächlichen Zählereignissen war ein ernstzunehmendes Problem. Laut Müller lag der Grund dafür an der "richtigen Aktivierung der Spitze"²¹⁶. Gemeint ist damit das Ausglühen oder später das Ätzen der Spitze.

Thaddeus Trenn hat in der 1970ern Jahren Walter Müller mit dem Vorwurf konfrontiert, dass es gravierende Ähnlichkeiten zwischen seiner Arbeit und der von Myssowsky und Nesturch gäbe. Müller erwiderte darauf, dass er die Arbeiten der Russen zu der Zeit nicht gekannt habe und erst in den 1960ern in Stanford auf die Arbeit gestoßen sei. Der Grund dafür läge darin, dass es ein negativer und nicht konstruktiver Beitrag zur Zählertechnik gewesen

²¹⁵ Rutherford an Geiger (15.3 und 18.3.1914), zit. nach: Abele (2002), S. 41.

²¹⁶ Müller an Wildhagen, 10.05.57, S. 3., Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Siehe auch Fußnote 213 auf S. 136.

sei²¹⁷. 20 Jahre vorher gab er jedoch gegenüber Wildhagen an, diesen Artikel zu kennen und betont, dass er vermute, Myssowksy und Nesturch hätten unbewusst ein arbeitendes Zählrohr vom 1928er-Typ gehabt:

Manche Teile Ihrer Arbeit hören sich genau so an, als seien sie von mir 15 Jahre später verfaßt. Man stelle sich vor, daß 1913 jeder Physiker ohne einen Finger zu rühren den Gedankenblitz hätte haben können "Jawohl, was die beiden Rußen [sic!] da schreiben ist ganz vernünftig. Nur sind die vielen elektrischen Ausschläge, von denen sie schreiben, gar nicht wild, sondern sie haben etwas zu bedeuten. Möglicherweise ist es die von Heß im Vorjahr in großen Höhen gefundene Kosmische Strahlung, deren Ausläufer sich auch noch nahe der Meereshöhe, wo St. Petersburg liegt, bemerkbar machen.'218

Der Anspruch der russischen Physiker war es aber allen Anschein nach nicht ein neues Gerät vorzustellen, sondern nur die Funktionsweise zweier Geräte zur elektrischen Zählung radioaktiver Teilchen nachzubauen und deren Funktionsweise kritisch zu überprüfen.

4.7 Darstellung der Funktionsweise des Zählrohrs in den fünf **Publikationen**

Geiger und Müller nehmen in ihren Zählrohr-Artikeln kaum Stellung zur Funktionsweise des Zählrohrs. Es wird lediglich das zu Grunde liegende Prinzip grob geschildert. Im ersten Artikel heißt es, dass die Spannung bis oberhalb des Funkenpotentials gesteigert werden müsse. Ein einkommendes oder an der Rohrwand durch γ-Strahlung ausgelöstes Elektron würde einen kräftigen Ionisationsstrom hervorrufen, der aber auf Grund der auf dem Zähldraht aufgebrachten Oxidschicht sofort wieder abreißen würde. Die einzelnen Stromstöße können mit einem Fadenelektrometer leicht sichtbar gemacht werden. Die Ausschlagszahl sei dabei proportional zur Oberfläche (Geiger & Müller 1928b).

Der zweite Artikel ergänzt ein paar wenige weitere Aspekte. So sei die Aufladung der Oxidschicht auf dem Draht infolge des durch die Stoßmultiplikation fließenden hohen Ionisationsstroms für das Abreißen der Entladung verantwortlich. Außerdem wird erwähnt, dass das Rohr mit etwa 5cmHg Gasdruck und etwa -1200 Volt Gehäusespannung funktionieren würde. Der Draht müsse zum einen mit einem Fadenelektrometer und zum anderen über 100 bis 1000 M Ω mit der Erde verbunden werden (Geiger & Müller 1928a).

In der vierten Publikation wird korrigiert, dass man den Erdungswiderstand nicht kleiner als $1G\Omega$ wählen dürfe. Zudem solle man den Drahtdurchmesser nicht größer als 1mm wählen. Daneben werden Koinzidenzmessungen erläutert (Geiger & Müller 1929c).

²¹⁷ Müller an Trenn, 27.05.1972, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

²¹⁸ Müller an Wildhagen, 10.05.57. S. 4., Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

Im fünften Artikel wird ergänzt, dass man anstelle der elektrometrischen Registrierung über ein Fadenelektrometer das Signal auch verstärken könne, um es akustisch oder über eine mechanisches Zählwerk zu registrieren (Geiger & Müller 1929b).

Eine detaillierte Stellungnahme zum physikalischen Mess- und Zählprinzip des Zählrohrs wird, wie gezeigt, nicht veröffentlicht. Aus moderner Sicht ist die Erklärung der Funktionsweise über die Oxidschicht wenig durabel. Beim Zählrohr handelt es sich um einen Zylinderkondensator, dessen Dielektrikum zu einem großen Anteil aus Luft bei Unterdruck und zu einem kleinen Teil aus der isolierenden Oxidschicht bestünde. Das Zählrohr kann man dann als hohen Isolationswiderstand für Gleichstrom ansehen²¹⁹. Eine solche Oxidschicht wird mit Hilfe von Säure oder einer Flamme auf den Draht aufgebracht. Der Stahldraht bzw. der Eisenanteil des Stahls reagiert mit (Salpetersäure oxidierender Säure HNO_{3} Schwefelsäure Phosphorsäure H₃PO₄, ...) oder durch den Einfluss von Wärme (Ausglühen mit Strom oder Bunsenbrenner) mit dem Luftsauerstoff²²⁰. Dennoch wäre aus heutiger Sicht eine solche Oberflächenschicht auf dem Draht nicht primär ausschlaggebend für die Funktion eines rudimentären Zählrohrs²²¹. Geiger und Müller stellen die Oxidschicht aber immer in das Zentrum ihrer damaligen Erklärung der Funktionsweise. Der Grund für diese Betonung könnte aber in der Beschaffenheit des Drahtmaterials liegen. Für ein möglichst störungsarmes Funktionieren eines Zählrohrs ist ein sehr homogenes Feld auf der gesamten Länge des möglichst homogen gefertigten Zähldrahtes notwendig. Müller schreibt diesbezüglich an Trenn:

Geigers Vorliebe für Drähte mit Oxydhaut [sic] ist offensichtlich leicht zu erklären. Nach Antritt meiner Stellung am 1.4.1928 hatte ich die Aufgabe, ein Problem des Compton Effektes anzugreifen, bei dem Koinzidenzen [mit] Spitzenzählern gemessen werden sollten.[...] Natürlich benahm sich der Spitzenzähler fies, wie das so üblich war, kam aber dann doch zur Raison. Da erzählte mir Geiger, daß in einer Arbeit von Curtiss [...] wesentliche Verbesserungen des Spitzenzählers durch Behandlung der Spitze mit Säure erzielt worden waren, und daß ich das auch versuchen solle. Der Erfolg war leicht nachzuweisen, und die Spitzenzähler mit Oberflächenschicht benahmen sich wesentlich besser. [...] [Bei meiner alten Ionisationskammer] lag es nahe, die Wirkungsweise in der gleichen Weise zu verbessern, wie bei dem Spitzenzähler nach der Curtiss-schen Methode. Tatsächlich war es leichter, das Zählrohr zu betreiben, wenn der Draht entsprechend vorbehandelt war.²²²

Auf Grund der zeitlichen Nähe zwischen diesen Experimenten mit dem Spitzenzähler und der Entwicklung des Zählrohrs sowie Müllers direkter,

²¹⁹ Bei modernen Elektrolytkondensatoren spricht man auch von Oxidschichtdielektrikum.

²²⁰ Der Sauerstoff oxidiert das Metall und wird dabei reduziert. Ähnliches passiert bei der Säurekorrosion. Das Eisen reagiert mit Wasserstoffionen zu Eisen-II-Kationen.

²²¹ Wie schon erwähnt und auch Müller und Geiger schon im vierten Artikel bemerken, wurde von Kniepkamp bereits 1929 festgestellt, dass Zählrohre auch mit blankem Draht funktionieren würden (Kniepkamp 1929).

²²² Müller an Trenn, 19.8.1972, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

aber retrospektiver Hinweis auf einen Zusammenhang sollte die Funktionsweise des Spitzenzählers in Abgrenzung zum späteren Geiger-Müller Zählrohr geklärt werden. Zudem behauptet Peter Galison, wie ich schon zu Anfang dieser Arbeit festgestellt habe, dass das Zählrohr lediglich eine konsequente Weiterentwicklung des Spitzenzählers gewesen sei und kein wirkliches neues Messinstrument (weitere Details zum Draht und Konsequenzen für den Nachbau in Abschnitt II.5).

4.8 Technische Aspekte des Geiger'schen Spitzenzählers

Wie schon in Abschnitt II.3.3 dargestellt veröffentlichte Geiger 1913 die Entwicklung des Spitzenzählers. Im Gegensatz zur Ionisationskammer von Rutherford und Geiger von 1908 und dem Kugelzähler von 1912 arbeitet der Spitzenzähler bei Atmosphärendruck und positivem Gehäusepotential.

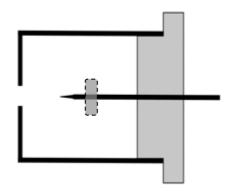


Abbildung 63: Längsschnitt eines Spitzenzählers mit einer später häufig verwendeten Wulst.

Größenangaben zu diesem Instrument habe ich in keiner Publikation finden können. Walter Bothe ist jedoch sporadisch auf Konstruktionsdetails in seiner Würdigung der Geiger'schen Zählmethoden eingegangen:

Der eine große Vorteil des Spitzenzählers gegenüber seinen Vorläufern ist die einfache Handhabung. Die brauchbaren Zählspannungen, die in der Gegend von 1000 Volt liegen, bedecken leicht einen Bereich von 100 Volt und mehr. [...] Zu den nachhaltigsten Eindrücken des Verf.[assers] aus der ersten Zeit seiner Arbeit bei Geiger gehört es, wie man mit den einfachsten Handwerksgriffen aus einigen Stückchen Messingrohr, Wollastondraht[223], Hartgummi, Klebwachs, einer Nähnadel, einer "Elektrisiermaschine" und einem Tuschestrich auf Papier eine Vorrichtung aufbauen konnte, mit der man α - und β -Teilchen zählen konnte. Das Überraschendste an dem Spitzenzähler war nämlich, daß er nicht allein auf schwere Teilchen, sondern auch auf einzelne bewegte Elektronen ansprach, deren fortlaufende Zählung so zum ersten Male gelang. [...] Die Herstellung der Spitze erforderte anfangs etwas Übung und auch Glück. Später zeigte sich, daß man eine einwandfreie "Spitze" in völlig reproduzierbarer Weise dadurch herstellen kann, daß man an ein dünnes Platin-

 $^{^{223}}$ Wollaston-Draht ist ein dünner Platin-Draht mit bis zu 1,5 μ m Dicke mit dessen Herstellung sich der Brite William Wollaston am Anfang des 19. Jahrhunderts beschäftigt hatte.

drähtchen ein Kügelchen von etwa 1/10 mm Durchmesser anschmilzt. (Bothe 1942, 594)

Bei der Verwendung von Spitzenzählern im Kontext der Koinzidenzexperimente von Bothe und Geiger in den frühen 1920er Jahren erwies es sich zudem als günstig eine isolierende Wulst unterhalb der Spitze anzubringen, um Durchschläge zwischen der Kathode unterhalb der Spitze und dem Gehäuse zu vermeiden.

Physikalische und technische Unterschiede in der Funktionsweise der frühen elektrischen Zählmethoden bis 1928

Meiner Auffassung nach gehört der Spitzenzähler zu einer von zwei Arten von elektrischen Zählern für radioaktive Strahlung: Im Gegensatz zu den vier anderen Zählern (Rutherford & Geiger 1908b, 1912, Hess & Lawson 1916 und Geiger & Müller 1928b) arbeitet der Spitzenzähler mit positivem Gehäusepotential. Das bedeutet, dass Auslöseeffekte von Elektronen, wie sie bei den vier anderen Zählern maßgeblich für deren Funktionsweise sind, nicht bzw. nur in einem sehr geringen Umfang auftreten können, da Elektronen lediglich aus der negativ geladenen Spitzen ausgelöst werden können. Im Vergleich zum Gehäuse hat diese jedoch eine sehr viel kleinere Oberfläche. Zudem arbeitet der Spitzenzähler bei Atmosphärendruck. Eine mittleren freien Weglänge in Vervielfachung der der Zählerinnenraum tritt somit nicht ein. was demnach auch keine hohen Geschwindigkeiten bzw. kinetische Energien der Ionen ermöglicht. Zudem werden auch nur die im Vergleich zu den negativen Ionen schwereren positiven Ionen zur Spitzen beschleunigt. Die höhere Masse und die geringe Beschleunigungsstrecke führen dazu, dass keine zweite Generation an Ionen produziert werden kann. Die Funktionsweise beruht eher auf dem Effekt der Spitzenentladungen, der zu der Zeit auch für die Messung von Hochspannungen in der Elektrotechnik genutzt wurde. Im Vergleich zu den vier anderen Zählern hat der Spitzenzähler jedoch ein weitaus stärkeres, aber inhomogenes elektrisches Feld, welches in Richtung Spitze an Stärke zunimmt. Je feiner diese Spitze ausgearbeitet ist, desto stärker ist das elektrische Feld. Legt man eine Spannung zwischen Gehäuse und Spitze an, die kurz vor dem Durchschlagspotential liegt, reicht schon eine geringe Ionisation, beispielsweise durch α - oder β -Strahlung aus, um eine vollständige oder teilweise Entladung (Korona-Entladung) auszulösen. Die Teilchen können aber nur durch eine wenige mm² große Öffnung in den Zähler eintreten. Würde man die Öffnung größer machen, wurde dies die Feldgeometrie erheblich stören. Die Teilentladung führt zu einem kurzzeitigen Zusammenbrechen des elektrischen Feldes, was genau wie bei den anderen Zählern durch ein Fadenelektrometer registriert werden kann. Über einen hohen Arbeitswiderstand wird der Spitzenzähler nach der

Entladung wieder aufgeladen. Die Ionisationsfähigkeit von γ -Strahlung reicht hingegen nicht aus, um eine Entladung auszulösen. Für diesen Zweck wurden vor der kleinen Öffnung Bleiplatten positioniert aus denen die energiereiche γ -Strahlung Elektronen auslösen kann. Im Vergleich zu einem β -Strahler funktionierte dies aber auf Grund der geringeren Teilchenanzahl nur bei starken γ-Strahlern und Röntgenstrahlung.

Die schwer dimensionierbare Spitze wurde mit der Zeit durch die von Bothe beschriebenen Platinkügelchen ersetzt, dessen Radius einfacher feststellbar und zudem nahezu konstant war. Dies gewährleistete die Reproduzierbarkeit des Geräts, dessen Handhabung noch in den späten 1920er Jahren als schwierig abgetan wurde. Müller schrieb dazu 1957 an Eduard Wildhagen:

Mit dem Geigerschen Spitzenzähler war nicht leicht zu arbeiten. Es war sehr schwer, eine Spitze richtig zu aktivieren und über längere Zeiten in Betrieb zu halten, die Spannung mußte sehr genau eingehalten werden, da sich sonst der empfindliche Bereich änderte, und am schlimmsten war es, daß man häufig wilde Entladungen bekam, die nicht durch die Strahlung sondern durch nicht ganz geklärte andere Vorgänge hervorgerufen wurden und manch [sic] jede Messung unmöglich machten oder zum mindesten verfälschten. Gleichwohl sind mit dem Geigerschen Spitzenzähler durch die Experimentierkunst vor allem von Geiger selbst und anderen, wie Bothe und Frl. Meitner hervorragende wissenschaftliche Ergebnisse erzielt worden. ²²⁴

Nach den erfolgreichen Koinzidenzversuchen von Bothe und Geiger 1924/25 und Geigers Wechsel nach Kiel beschäftigten sich dort mindestens zwei Personen und zunächst auch Müller weiterhin mit dem Spitzenzähler. Otto Klemperer war mit seinem ehemaligen Doktorvater Geiger nach Kiel gewechselt. Klemperer hatte 1923 mit einer Arbeit Über die lichtelektrische Geschwindigkeitsverteilung an der Friedrich-Wilhelms-Universität (heute Humboldt-Universität zu Berlin) promoviert. 1928 veröffentlichte er unter anderem zusammen mit Geiger drei Arbeiten, die sich dediziert mit dem Spitzenzähler und dessen Funktionsweise befassten. Dabei wurde auch die Funktion des Spitzenzählers bei Unterdruck und negativ geladenem Gehäuse (also den Operationsmodi des Elektronenzählrohrs) und der Einfluss von verschiedenen Kathodenmaterialien (Spitzen) auf das Funkenpotential thematisiert (Geiger & Klemperer 1928, Klemperer 1928b, Klemperer

²²⁴ Müller an Wildhagen, 10.05.1957, S.3, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

1928a)²²⁵. Kurt Hild hatte sogar noch 1930 bei Geiger über den Spitzenzähler promoviert (Hild 1930)²²⁶.

Auch beim Spitzenzähler werden in den Publikationen Details über Konstruktion und Nutzung verschwiegen, wenngleich im Nachgang beispielweise durch Müller gerade diese Kenntnisse als zentral herausgestellt werden. Er selbst hatte Erfahrungen mit dem Spitzenzähler sammeln können und sollte Verbesserungen in der Konstruktion prüfen, die nach seiner Darstellung zur Entwicklung des späteren Geiger-Müller Zählrohrs geführt haben. Das Wort "Experimentierkunst" könnte aber bei dem gleichzeitigen Mangel an detaillierten Aufzeichnungen auch so interpretiert werden, als dass Experimentieren wie ein künstlerischer Beruf durch Praxis tradiert werden muss und nicht durch das Lesen von Publikationen erlernt werden kann. Geiger wäre im Fall des Spitzenzählers dann der jeweilige Lehrer, der seinen Assistenten Müller und Klemperer oder ehemaligen Kollegen Bothe und Meitner die Kunst des Experimentierens mit dem Spitzenzähler vermittelt hat.

4.9 Auf der Suche nach einem Zählrohr

Status quo der Quellenanalyse

Bei der Rekonstruktion der Handlungsabläufe und der Kette von Ereignissen, des Zählrohrs notwendig sind, um den Entstehungsprozess nachzuvollziehen, kann man bisher auf drei Primärquellen zurückgreifen. Zum einen liegen fünf Laborbücher vor, die Walter Müller vor und während der Experimente mit dem Zählrohr geführt hat. Deren Analyse ergab, dass in den zwei Laborbüchern von 1928 bis 1929 etwas über 100 Zählrohre beschrieben oder erwähnt werden, die im Laufe der knapp 1,5 Jahre in Kiel angefertigt wurden. Andere 'sekundäre' Laborbücher, die von Kollegen und anderen Physikern geführt wurden, können ebenfalls Hinweise enthalten. Potentielle Kandidaten wären Personen, die von Geiger schon während der ersten Experimente ein Zählrohr bekommen haben. Definitiv waren dies Hermann Behnken von der PTR in Berlin und Ernest Rutherford, der mittlerweile Leiter des Cavendish Laboratory in Cambridge war. Es sind

²²⁵ Nachdem Otto Klemperer (1899-1987) nach Geigers Wechsel nach Tübingen in Kiel als Institutsdirektor vertreten hatte, wurde ihm 1933 die Lehrerlaubnis entzogen, da er dem damals neuen nationalsozialistischen Gesetz zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums zu 50% Jude war. Er emigrierte mit Geigers Hilfe nach England und arbeitete zunächst am Cavendish Laboratory bei Ernest Rutherford und wurde 1946 als Professor ans Imperial College nach London berufen, wo er bis zu seinem Tod lehrte, vgl. Die vertriebenen Persönlichkeiten und Wissenschaftler der Kieler Universität, http://www.uni-kiel.de/nszeit/bios/klemperer-otto.shtml (11.11.2013).

²²⁶ Noch in den späten 1930er Jahren gab es Arbeiten, die sich mit der genauen Funktionsweise des Spitzenzählers auseinander gesetzt haben, so z.B. Dasannacharya & Moorthy 1937.

außerdem Hinweise vorhanden, dass die Universität in Graz schon früh ein Zählrohr bekommen hat. Vermutlich gehörte auch Geigers ehemaliger Kollege Walther Bothe zu den Empfängern eines ersten Zählrohrs. Zumindest Bothes Laborbücher sind für eine diesbezügliche Analyse verfügbar.

Die zweite Informationsquelle sind sonstige schriftliche Aufzeichnungen von Walter Müller. Dies sind vorrangig die schon teilweise zitierten Briefe, die er während seiner Kieler Zeit seinen Eltern geschrieben hat sowie der Briefwechsel, den er mit Thaddeus Trenn in den 1970er Jahren und mit Eduard Wildhagen in 1956 geführt hat. Hans Geigers Korrespondenz, soweit diese noch vorhanden ist, steuert hier ebenfalls einige Details bei, die vor allem die elektrische Schaltung betreffen.

Die dritte Ressource ist die Analyse der fünf Artikel, die Geiger und Müller 1928/29 veröffentlicht haben sowie deren Rezeption. Für meine Zwecke und besonders in diesem speziellen Fall sind diese primären Schriftstücke weniger wichtig, da Müller gegenüber Wildhagen angibt, dass Geiger alle Veröffentlichungen zum Zählrohr alleine und ohne Mitwirkung von Müller verfasst hat. Müller wird nur gemäß der damaligen Tradition als Co-Autor genannt. Müller bedauerte diesen Umstand schon damals, da einige Fehler in den Artikeln seien. Womöglich ist dies auch ein Teil der Erklärung dafür, warum so gut wie keine Details zur Konstruktion eines Zählrohrs im Artikel zu finden sind.

Die Suche nach einem Artefakt

Ein Originalzählrohr von 1928/29 ist nach meinen Recherchen in Deutschland nicht mehr erhalten. Als in Frage kommende Orte können die Arbeitsstätten von Hans Geiger in Kiel, Tübingen und Berlin sowie das Deutsche Museum in München angenommen werden. Die Gebäude der Christian-Albrechts-Universität an der Fleckenstraße in Kiel wurden während des zweiten Weltkrieges zerstört. Artefakte aus Geigers dort angesiedelten, ehemaligen Institut sind daher nicht mehr vorhanden. In Tübingen und Berlin sind ebenso keine Zählrohre oder andere Geräte aus Geigers Bestand gefunden worden²²⁷. Im Bestreben ihre Ausstellung zur Atomphysik zu erneuern, war das Deutsche Museum 1959 auf der Suche nach Originalapparaten von Geiger. Nach längerer Recherche bei verschiedenen alten Schülern von Geiger, wie Max Pollermann, dem damaligen Direktor des Forschungsreaktors in München-Garching und Helmut Volz vom Institut für theoretische Physik der Universität Erlangen

²²⁷ An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Hans-Joachim Schulz von der Max Planck Gesellschaft in Berlin bedanken, der sich sehr für meine Recherchen eingesetzt hat und mit mir einen Nachmittag im Januar 2012 auf dem Dachboden der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Berlin nach Geräten aus Geigers Bestand der alten TU Charlottenburg gesucht hat.

wandte sich das Museum schließlich an die Universität Tübingen. Sie erhielten im gleichen Jahr vom Direktor des dortigen physikalischen Instituts Hubert Krüger vier Spitzenzähler, zwei Zählrohre mit Fenster sowie ein Zählwerk mit dem Hinweis, dass der pensionierte und von Geiger sehr geschätzte Mechanikermeister Josef Speidel von weiteren Geräten keine Kenntnis hätte. Rudolf Geiger, Professor für Klimatologie und Bruder von Hans Geiger, schrieb dem Museum, dass es keinerlei Aufzeichnungen seines Bruders mehr geben würde, da sein Haus in Babelsberg nach Kriegsende zerstört wurde²²⁸. Es befand sich im Einzugsgebiet der Potsdamer Konferenz und wurde teilweise demontiert, um an anderen Gebäuden Reparaturen vorzunehmen.

Mögliche weitere Fundorte wären die Radiumanstalt in Wien und die Universität in Cambridge. In einem Brief an seine Eltern erwähnt Müller indirekt, dass neben der Universität in Graz auch die in Edinburgh schon vor dem ersten öffentlichen Vortrag im Juli 1928 ein Zählrohr erhalten habe²²⁹. Für Experimente an schwach radioaktiven Substanzen wie Kalium hat Georg von Hevesy an der Universität in Kopenhagen ebenfalls im Januar 1929 ein Zählrohr bekommen. Es handelte sich dabei um Zählrohr 32. Im darauffolgenden April wollte er seinen Assistenten H. Seith für eine Woche nach Kiel zur Arbeit mit Geiger schicken²³⁰. Walther Bothe als ehemaliger Forschungskollege von Hans Geiger in Berlin ist auch im engeren Kreis derer, die ein Zählrohr von Geiger erhalten haben könnten. Bothe hatte 1914 bei Max Planck in theoretischer Physik an der PTR in Berlin promoviert und arbeitete auch nach dem ersten Weltkrieg und Kriegsgefangenschaft bis 1929 weiter in Berlin. Ab 1924 bis etwa 1926 arbeiteten Geiger und er an den mit dem Nobelpreis prämierten Koinzidenzexperimenten zum Compton-Effekt mit Spitzenzählern. Als enger Freund und wohl ebenso handwerklich geschickt käme er als potentieller Empfänger eines Zählrohrs in Betracht. Ein Indiz, was dagegen sprechen könnte, ist, dass Müller in seinen Laborbüchern und Briefen Anmerkungen gemacht hat, wenn er ein Zählrohr vorbereitet und verschickt hat. Anstelle einer Nummer haben die designierten Zählrohre besondere Namen bekommen, wie beispielsweise "Rutherford I' oder "Behnken II' (vgl. Abschnitt II.4.3. Ein Vermerk, der auf Bothe hinweist ist nicht zu finden. In die gleiche Richtung geht die Einschätzung von Dieter Fick²³¹: Bothe hätte seine Zählrohre aus Stolz eher selber gebaut, als ein solches Geschenk von seinem alten Lehrer und Kollegen Geiger anzunehmen.

²²⁸ Deutsches Museum Archiv München, VA1907. Geiger wohnte mit seiner Frau Elisabth in der August Bier Str. 9 in Potsdam-Babelsberg.

²²⁹ Müller an seine Eltern, 7.9.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{230}}$ vgl. Geiger an v.Hevesy, 07.01.1929 und 27.02.1929, Niels Bohr Archive Kopenhagen, George Hevesy Scientific Correspondence 1910-66, ID 01/02/001.

 $^{^{231}}$ Dieter Fick, Fritz Haber Institut Berlin und Philipps-Universität Marburg, beschäftigt sich detailliert mit Bothes Biografie.

Tatsächlich findet man in Bothes neutem Laborbuch, welches die Zeitperiode 1928/29 abdeckt, ein paar wenige Notizen zu Zählrohren und Koinzidenzmessungen. Am 26.11.1928 schreibt er als ersten Eintrag in ein neues Buch über zwei Zähler aus Aluminium (3cm Durchmesser, 10cm Länge). Im weiteren Verlauf tauchen immer wieder nur diese beiden Zählrohre I und II auf (29.5.29 und 15.10.29). Dies belegt zwar, dass Bothe Zählrohre vom Geiger-Müller Typ hatte, aber vermutlich nur diese zwei aus eigener Werkstatt²³². Zumal war Aluminium bei den Zählrohren von Geiger und Müller eher untypisch, da die meisten Zählrohre aus Messing und Stahlblech gefertigt wurden und Müller mehrere widersprüchliche Ergebnisse von Messungen mit Zählrohren aus Aluminium erhalten hatte (vgl. Fußnote 213, S.134).

Ein Zählrohr aus dem Jahr 1928 existiert jedoch tatsächlich noch. Kurz vor seinem Tod im April 1976 hat Walter Müller auf Anfrage von Paul Forman²³³ der Sammlung der *Smithsonian Institution* ein Zählrohr zusammen mit den fünf Laborbücher gespendet, die zuvor Trenn für seine Analyse genutzt hatte. Das Smithsonian hat umfangreiche Analysen²³⁴ mit dem Zählrohr angestellt. Darunter waren eine chemische Analyse des Dichtungsmaterials, Röntgenaufnahmen des Zählrohrs und ein Versuch der historischen Einordnung mit Hilfe der Laborbücher sowie ein Interview mit Müller selbst. Letzteres wurde von Lawrence Badash²³⁵ (1934-2010) von der *University of California* in Müllers letztem Wohnort Santa Barbara durchgeführt. Im Juli 2011 konnte ich in der Sammlung des Archivs des Smithsonian das Zählrohr in Augenschein nehmen²³⁶.

4.10 Das Zählrohr Artefakt N-10015

Das Zählrohr in der Sammlung des Smithsonian wird unter der Nummer N-10015 geführt. Es hat einen äußeren Durchmesser von 15mm, ist 100mm lang und hat einen inneren Durchmesser von 14mm sowie entsprechend

²³² vgl. Laborbuch 9 von Walther Bothe, MPG-Archiv Berlin, III. Abt., Rep. 6, Nr. 113.

²³³ Paul Forman (*1937) war zu der Zeit Kurator der *Division of Medicine and Science* am *National Museum of American History* der *Smithsonian Institution* in Washington, D.C. in den USA. Der Briefwechsel zwischen Müller und Forman sowie Forman und Trenn ist noch erhalten und in der *Smithsonian Institution* verwahrt.

²³⁴ Conservation Analystical Laboratory (CAL) der Smithsonian Institution, 1977, CAL 2753 und CAL 2753/1.

²³⁵ Nicht nur Badashs Nähe zum Wohnort von Müller machten ihn zu einem geeigneten Interviewenden. Badash hat sich zu der Zeit mit der Geschichte der frühen Radioaktivitätsforschung und der Entwicklung von nuklearen Waffen in den USA beschäftigt (vgl. Badash 1969, Badash 1985).

²³⁶ An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei Gregory Good vom *Center for History of Physics* des *American Institute of Physics* (AIP) in College Park, MD und Roger Sherman, einem Kurator der *Division of Medicine and Science* des Smithsonian bedanken. Das AIP unterstützte die Reise zudem finanziell. Good und Sherman haben mich bei der Suche nach dem Zählrohrartefakt intensiv unterstützt.

0,5mm Rohrwandung. Der nach außen geführte Draht hat einen Durchmesser von 1mm und besteht vermutlich aus Kupfer. Das Rohr selbst ist augenscheinlich aus Messing auf dem mit rotem Lack eine Zahl an einem Ende zu finden ist. Die Dichtung hat eine hell gelbe bis braune Färbung und weist leichte Risse am Übergang zur Gehäusewand auf. Der Anschluss zur Vakuumpumpe wurde über eine Glaskapillare realisiert, die nach dem Evakuieren abgeschmolzen wurde.

Die rote Zahl auf dem Gehäuse wurde vom Smithsonian als ,10' gelesen, was im Widerspruch zu den Aufzeichnungen in den Laborbüchern steht. Zählrohr Nr. 10 hat eine deutlich zum Röntgenbild des Artefakts verschiedene Form. Bezieht man sich nur auf die innere Struktur der Bauteile, so ist das Artefakt eher ein Zählrohr aus der Baureihe der Zählrohre 14-16. Schaut man die rote Zahl auf dem Gehäuse genauer an, so kann man an der ,0' einen kleinen Haken entdecken, der in Anbetracht der schwierigen Markierung auf dem runden Gehäuses auch als Bogen einer ,6' zu lesen ist. Die so als ,16' zu interpretierende Zahl stimmt dann mit den entsprechenden Aufzeichnungen im Laborbuch überein (Abbildung 64)²³⁷.



Abbildung 64: Zählrohr Nr. 16 im Archiv der Smithsonian Institution, Juli 2011. Links: Draufsicht, rechts: Detailaufnahme der Markierung.

Die chemische Analyse der Dichtung, die vom Smithsonian durchgeführt wurde, hat meine bisherigen Vermutungen zu diesem Zeitpunkt jedoch nicht erfüllt:

The sealant was found to consist of a formulation based upon drying oil or semi-drying oil (such as soybean oil) and filled with barium sulfate. [...] the following were not detected: calcium carbonate, lead white, zinc white, gypsum (plaster of Paris). [...] X-ray fluorescence analysis confirmed that barium is a major component of the sealant.²³⁸

²³⁷ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 73. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

 $^{^{238}}$ Conservation Analytical Laboratory (CAL) der Smithsonian Institution, 1977, CAL 2753 und CAL 2753/1.

In Abbildung erkennt man deutlich zwei unterschiedliche 65 Dichtungsmaterialien. Während ohne Röntgenbild von außen nur die Bariumsulfat-Öl-Schlämmung sichtbar ist, erkennt man im Laborbuch und auf der Röntgenaufnahme eine weitere Dichtungsschicht, die sich in beiden Darstellungen von der äußeren Dichtung als schraffierter Bereich bzw. hellerer Schatten abhebt. Es handelt sich dabei nach Laborbuchanalyse um Hartgummi (Ebonit), welches ca. 1cm tief im Rohr versenkt wurde. Neben der Dichtigkeit ist die zweite Funktion die Aufnahme und Isolation des Anodendrahts und der Glaskapillare. Schaut man genauer auf den Röntgenschatten der Ebonitstopfen, so erkennt man ebenfalls die beiden Kanäle, die für die Kapillare und den Draht in den Stopfen gebohrt worden sind. Über die gesamte Länge des Stopfens haben sie einen festen Durchmesser von etwa 25mm bzw. 17mm. Der Anodendraht selber ist laut Laborbuch wohl eher aus Stahl und nicht aus Kupfer, wie in der Analyse des Smithsonian vermutet wird. Eine letzte Bestätigung konnte das Labor des Smithsonian jedoch auf Grund des großes Unterschieds im Durchmesser der Materialien nicht per Röntgenbild erhalten: "The wide variety of materials and thickness [...] produces problems of differential absorption resulting in extreme film densities."239 Hartgummi wird als Halterung für den Draht angesprochen, aber auch in Frage gestellt. Aus Gründen der Konservation des Artefakts sollte die Dichtung jedoch nicht verletzt werden.

²³⁹ Conservation Analytical Laboratory (CAL) der Smithsonian Institution, 1977, CAL 2951.

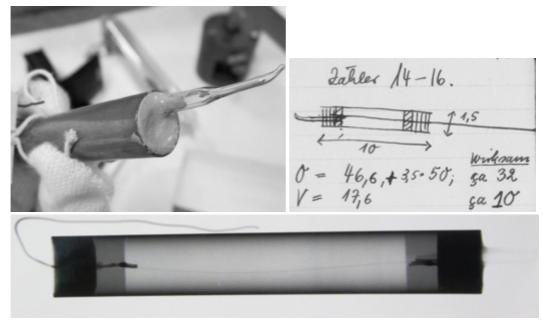


Abbildung 65: Zählrohr Nr. 16, links: Dichtung mit Glaskapillare des Artefakts, rechts: Ausschnitt aus dem Laborbuch mit Angaben zur Größe der Oberfläche und des Volumens²⁴⁰, unten: Röntgenaufnahme des Artefakts²⁴¹. Mit freundlicher Genehmigung der Smithsonian Institution Washington, DC.

Ein Detail, welches erst bei dem Versuch des quellengetreuen Nachbaus offenbar wurde, ist die Verbindung von äußerem Kupferdraht und dem Anodendraht. Wäre letzterer ebenfalls aus Kupfer, so wäre das Weichenlöten der Verbindung mit Zinn eine denkbare Option. In den zugehörigen Laborbüchern findet man jedoch für keines der konstruierten Zählrohre einen Eintrag, der auf Kupfer als Material für den Anodendraht hinweist²⁴². Typisch sind viel mehr Stahl, Eisen und seltener Platin – also Materialien, die ihre Brauchbarkeit schon als Spitze für Spitzenzähler bewiesen haben. In Abbildung 66 sieht man den leichten Röntgenschatten der Glaskapillare, den des Anodendrahtes und des Kupferdrahtes. Alle drei Bauteile sind im Ebonitstopfen eingelassen, welcher mit der Bariumsulfat-Öl-Schlämmung vergossen wurde. Zusätzlich kann man deutlich ein weiteres Material anhand der andersartigen Schattierung ausmachen, welches die Drähte miteinander

²⁴⁰ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 73. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. ,wirksam' bedeutet in diesem Fall vermutlich ohne die Stopfen in die Berechnung mit einzubeziehen.

²⁴¹ Conservation Analytical Laboratory (CAL) der Smithsonian Institution, 1977, CAL 2753 und CAL 2753/1.

²⁴² Zudem schreibt Müller am 10.5.1957 an Eduard Wildhagen im Kontext des Spitzenzählers, dass für die Spitze Platin, Wolfram und vorbehandeltes bzw. geglühtes Eisen, nicht aber Kupfer oder Aluminium, verwendet wurden, S.3, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Die enge zeitliche und thematische Verbindung von Spitzenzähler in Müllers früherer Arbeit und der Entwicklung des Zählrohrs lässt eine ähnliche Materialauswahl vermuten.

zu verbinden scheint. Auffällig ist, dass der Schatten ähnlich intensiv, wie der des Bariumsulfats ist. Denkbar wäre daher ein Lot mit hohem Bleianteil, welches zur Verbindung des Drahtes hätte benutzt werden können.

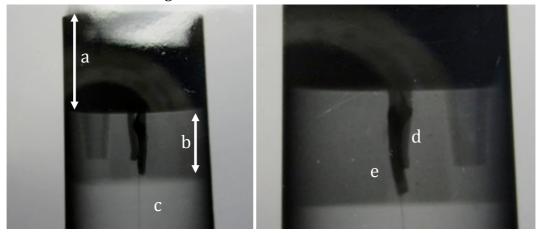


Abbildung 66: Detailaufnahme des Röntgenbildes vom Zählrohr Artefakt aus zwei verschiedenen Blickrichtungen. Bariumsulfat-Öl-Dichtung (a), Ebonitstopfen (b), Anodendraht (c), Aufhängung des Drahtes (d) und ein drittes Material, welches Draht und Aufhängung verbindet (e).

In Abbildung 67 sieht man die andere Seite des Zählrohrs. Auf dieser Seite wird der Kontakt zum äußeren Kupfer-Anschlussdraht hergestellt. Auffällig hier ist ein weiterer Schatten, der im zentralen Kanal des Stopfens zu sehen ist. Durch ihn hindurch geht der Schatten des Kupferdrahtes, der wiederum mit dem vermuteten Bleilot mit dem Zähldraht leitend verbunden ist. ²⁴³

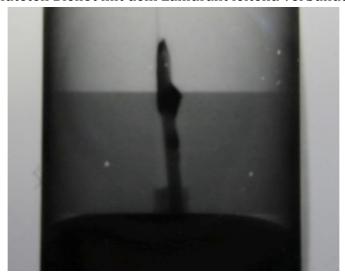


Abbildung 67: Im Vergleich zu Abbildung 66 ist hier die gegenüberliegende Seite des Zählrohrartefakts als Röntgenbild im Detail dargestellt.

²⁴³ Zusätzlich ist noch bemerkenswert, dass das Lot und vielleicht auch der Kupferdraht aus dem Stopfen in den Zählraum des Rohres hineinragen und damit den Zählbetrieb wohl erheblich gestört haben. Der größere, inhomogene Durchmesser reduziert die Feldstärke zumindest in diesem Bereich sehr stark.

Wie Geiger oder Müller diese im Vergleich zu den Skizzen im Laborbuch sehr elaborierte Version eines Zählrohrs gebaut haben, kann auf Basis der reinen Quellenanalyse nicht geklärt werden. Besonders der Aspekt des Bariumsulfats kann nicht anhand der Laborbücher rekonstruiert werden. Dennoch hat mich die Analyse des Artefakts zu einer Kategorisierung von unterschiedlichen Zählrohr-Generationen angeregt.

4.11 Die Zählrohr-Generationen

Insgesamt kann man anhand der Laborbuch- und Artefakt-Analyse rein phänotypisch drei verschiedene Bauformen der frühen Zählrohre konstatieren, die ich entwicklungstypisch als Generationen auffasse: Den Prototypen des Zählrohrs, das von Trenn und Forman diskutierte Zählrohr Nr. 10 sowie das Artefakt im Smithsonian und seiner Entsprechung im Laborbuch (Abbildung 68, Abbildung 69).

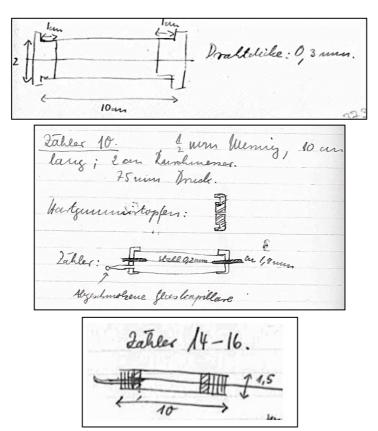


Abbildung 68: Laborbuchskizzen der designierten Zählrohrgenerationen²⁴⁴.

²⁴⁴ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S.21, S.48 und S.73. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

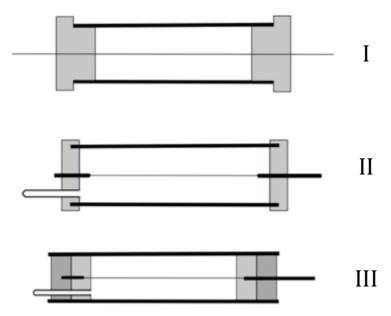


Abbildung 69: Schemata der drei ersten Zählrohrgenerationen. Prototyp, Zählrohr 10 und Zählrohr 14-16.

Zur ersten Generation gehören ebenfalls noch das Zählrohr 1 und Zählrohr 2, welche distinkt unterschiedliche Maße im Vergleich zum Prototypen aufweisen. Demnach wäre der Prototyp ein Zählrohr 0. Für die Zählrohre 3 bis 9 sind die Notizen nicht ausreichend um eine Zuordnung vorzunehmen. Daher ist es nicht sicher, sondern nur wahrscheinlich, dass Zählrohr Nr. 10 das erste Zählrohr in der abgeänderten Bauform ist. Zudem ist in der Tabelle in Abbildung 70 keine Notiz für Nr. 10 vorhanden, was ein Indiz für die bauliche Änderung sein könnte.

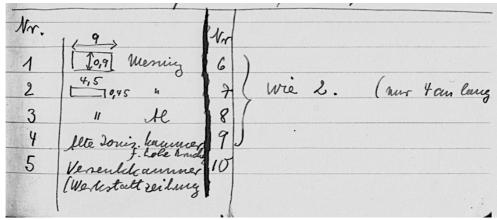


Abbildung 70: kurze Auflistung von Müller über die ersten neun Zählrohre vom 6. Juni 1928.²⁴⁵ Nr. 4 war Müllers "Alte Ionis.[ations]kammer f.[ür] hohe Drucke", Nr. 5 war eine "Versenkkammer (Werkstattzeichnung" deren Zweck auch im Folgenden nicht näher erläutert wird.

²⁴⁵ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 41. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Ähnliche Vorbehalte gelten für die Zählrohre der dritten Generation und die Kategorisierung der Zählrohre 11 bis 13. Nr. 11 war das Riesenzählrohr mit einer außergewöhnlichen Länge und Zählrohr 12 der β -Strahl-Zähler. Über ein Zählrohr 13 findet man keine Eintragungen (vgl. Abschnitt II.4.2 und Fußnote 154 auf S. 99).

Das "Bauteil' bzw. der Teil der Konstruktion, welches/r sich in diesen drei Generationen konsequent ändert, ist die Dichtung. Damit hängen insbesondere vier Bauteile zusammen. Zum einen ändert sich die Form der Ebonitstopfen vom zylindrischen "T", über eine flache Scheibe mit eingelassener Nut bis zur etwa 1cm versenkten, zylindrischen Variante in der dritten Generation. Die zweite offensichtliche Änderung ist der Draht. Während er in Generation I einfach in die Stopfen axial eingelassen wurde, findet man bei Generation II schon einen Draht, der an einem zweitem, dickeren Draht angebracht ist, der wiederum durch den Stopfen nach außen führt. Das gleiche Prinzip findet man bei Zählergeneration III, was zwar nicht in der Skizze, aber auf dem Röntgenbild (Abbildung 65) deutlich zu sehen ist. Das dritte Detail, was sich ändert, aber nicht direkt in allen Zeichnungen ersichtlich ist, ist das Dichtungsmaterial. Es verbindet das Ebonit mit dem Messinggehäuse luftdicht. Zu sehen ist diese Dichtung nur in der dritten Generation mit einer zusätzlich isolierenden Funktion. Ein viertes Detail ist die Kapillare, die den Innenraum des Zählers mit der Vakuumpumpe verbindet, um den notwendigen Unterdruck herzustellen. Diese Kapillare ist bei einem Großteil der Zähler aus Glas gewesen. Eine weitere Skizze im Laborbuch zeigt aber auch eine Kupferkapillare (Abbildung 41, S. 101). Dies ist eher erstaunlich, da durch das Abschmelzen der Kapillare und die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers, die übliche Wachsdichtung leicht hätte Schaden nehmen können. Ein luftdichtes Abquetschen der vermeintlich "weichen" Kupferkapillare wäre nur mit sehr hohen Drucken und dementsprechend hohem Aufwand möglich. Nach der Laborbuchanalyse hat sich herausgestellt, dass Müller ebenfalls Probleme mit dieser Art von Kapillare gehabt hatte (siehe Abschnitt II.4.2).

Die Skizze des Prototypen hat keine solche Kapillare, was für die Verwendung einer Vakuumglocke zur Herstellung des Unterdrucks analog zu seinen früheren Experimenten spricht. Eine entsprechende Skizze findet man in einem früheren Laborbuch (Abbildung 71).

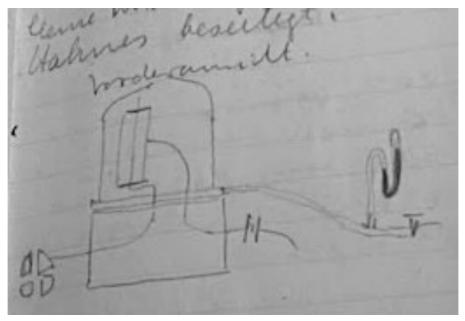


Abbildung 71: frühe Skizze von Müller zum experimentellen Aufbau seinen *Ionisationskammer-Experimenten* mit einer Vakuumalocke, Schaltzeichen für ein Quadrantenelektrometer (links) und eine *Spannungsquelle* (mittig) sowie einem Manometer und Hahn (rechts) ²⁴⁶.

Im späteren Verlauf des Laborbuchs von 1928 findet man eine schon diskutierte Zeichnung, die Zählrohr Nr. 1 in einer zweiten Variante zeigt (Abbildung 37, S. 96). Wenige Seiten später kann man im Eintrag zum 9. Juli 1928 lesen, dass Zählrohr 1 ein Glimmerfenster und einen neuen Draht mit 0,03mm Durchmesser erhalten hat. Man erkennt in der Abbildung zusätzlich die Drahtvariation aus der zweiten Generation der Zählrohre.

Die Beschreibung der Abdichtung in zeitgenössischen Quellen

Alle diese Veränderungen hatten den Zweck die Dichtigkeit der Zählrohre zu verbessern und diese auch über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten. Offensichtlich wurde dies beim Nachbau der Zählrohre. Die Drahtvariation hat zur Folge, dass der dünne scharfkantige Stahldraht, das Dichtungsmaterial bei der Durchführung durch den Stopfen nicht so leicht beschädigen kann. Zusätzlich muss man die Stopfen der ersten und zweiten Generation an ihrem Übergang zum Messing großzügig mit Dichtungsmasse versehen. Zwar ist dies beim Stopfen der zweiten Generation schon viel leichter, als beim

²⁴⁶ Walter Müllers Laborbuch Nr. 1, 1926/27, S. 17. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. Über der Skizze sowie auf der vorigen Seite steht in Müller Handschrift: "9. 10. Februar. [1926] Bruch eines Glasrohres. Hierdurch [...] gänzlicher Umbau der Apparatur. Glasglocke durch gelindes Erwärmen dicht entfernt. Neue Durchführung durch den Messingteller. (kürzere Glasröhre) Neues Manometer [...] Mac Cloud wurde wegen seines geringen Meßbereiches durch ein einfaches Manometer ersetzt. Stativ auf dem das ganze System liegt: Holzkasten 28x18x28. 2 gegenüberl[iegende] Flächen 28x18 fehlen. Eine kleine Undichtigkeit wurde durch Neueinfetten des Hahnes beseitigt. Vorderansicht: [...]".

Stopfen der ersten, dennoch wird diese Schwierigkeit erst in der dritten Generation gänzlich beseitigt. Diese auf meinem Nachbau beruhenden Erkenntnisse lassen jedoch die Frage nach der Art des Dichtungsmaterials offen. Über die Zusammensetzung des Materials findet sich in den zugehörigen Laborbüchern keine Angabe. In den beiden ersten Laborbüchern zu den früheren Experimenten findet man diesbezüglich nur ein paar Anhaltspunkte. Zum Abdichten der Vakuumglocke mit dem Rezipienten (vgl. Abbildung 71) benutzte Müller "Glockenfett", welches aus Bienenwachs und Vaseline im Verhältnis 1 zu 5 bestand²⁴⁷. Es wird auch "weißes Siegelwachs" erwähnt, welches er aber nur zum Verbinden der Drähte in Generation zwei und drei verwendet habe. In seiner Dissertationsschrift schreibt er diesbezüglich lediglich "Wachs" ohne eine nähere Beschreibung. Hess & Lawson (1916) haben zur Abdichtung ihres Halbkugelzählers Picein benutzt. Hamblin & Johnson (1937) schlagen in ihrer Anleitung zum Selbstbau von Geiger-Müller Zählrohren eine Wachs-Burgunderharz Mischung im Verhältnis 2 zu 5 vor. Die schon in Abschnitt II.4.10 im Kontext der Artefakt-Analyse thematisierte Öl-Bariumsulfat Schlämmung als Abdichtung findet man in keiner zeitgenössischen Quelle.

4.12 Hinweise auf Peripheriegeräte in Primärquellen

Neben dem Instrument selbst benötigt man einige Peripheriegeräte, um das Zählrohr zu betreiben und für Experimente nutzen zu können. Neben der angesprochenen Vakuumpumpe zur Evakuierung Zählrohrinnenraums wird noch eine Hochspannungsversorgung benötigt, die Volt Gleichspannung liefert sowie eine Registrierungsbeschaltung mit der die durch radioaktive Strahlung verursachten Spannungseinbrüche am Zählrohr registriert werden können. Der genaue Aufbau dieser Schaltungen ist in den Laborbüchern und Publikationen bestenfalls spärlich vorhanden. Lediglich in einem Brief an Hermann Behnken findet man eine von Geiger angefertigte Zeichnung zur Beschaltung des für Behnken angefertigten Zählrohrs Nr. 68 (Abbildung 72).

²⁴⁷ Walter Müllers Laborbuch Nr. 1, 1926/27, S. 44. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

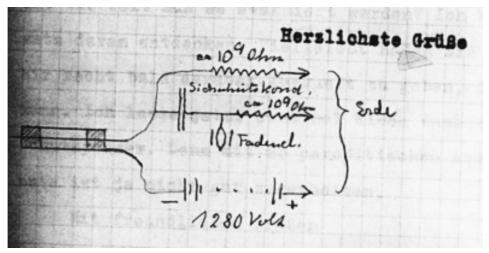


Abbildung 72: Geigers Schaltskizze zum einfachen Betrieb eines Zählrohrs²⁴⁸ (Nr. 68 in Müllers Laborbuch) mit zwei " 10^9 Ohm" = 1 G Ω -Widerständen, einem "Sicherheitskond.[ensator], Spannungsquelle mit 1280 Volt und "Fadenel.[ektrometer]".

Hevesys Zählrohr

Weitere und sehr detaillierte Hinweise erhält nur der zu der Zeit in Freiburg und später Frankfurt tätige Radio-Chemiker Georg von Hevesy von Geiger. Hevesy war von 1910 bis 1913 bei Rutherford in Manchester angestellt, als auch Geiger dort tätig war. Geiger hatte ihm im August 1928 ein Zählrohr für seine Forschung angeboten. Gleichzeitig hat er eine der wenigen Einladungen ans Institut ausgesprochen, die anscheinend der Schenkung des Zählrohrs bedingt:

Falls Sie einen geeigneten Assistenten oder Doktoranden haben, schicke ich Ihnen gerne ein Zählrohr. Sie brauchen nur ein Fadenelektrometer einfachster Art und ca. 2000 Volt Gleichspannung und reichlich Blei oder Eisen zum Abschirmen der Wandstrahlung usw.. Versuch macht nicht die geringsten Schwierigkeiten. Ihr H.G.²⁴⁹

Einen Monat später gibt Geiger weitere Hinweise:

Lieber Herr von Hevesy, wenn Sie die Spannung nur für den Spitzenzähler bezw. das Zählrohr gebrauchen, so möchte ich Ihnen entschieden dazu raten, sich eine kleine Gleichrichteranlage bis zu etwa 2000 Volt zusammenzustellen. Wir arbeiten praktisch nur damit und sind sehr zufrieden. Hochspannungsakkumulatoren sind sehr teuer und bedürfen immer vieler Wartung. Die Gleichrichteranlage würde Sie mit allem Zubehör kaum 200,- M[ar]k. kosten.

Handschriftlich ergänzt er unter dem maschinenschriftlichen Teil:

²⁴⁸ Briefwechsel Geiger - Behnken, 11.11.1928, Archiv der PTB Braunschweig, Akte 758.2 (mit freundlicher Genehmigung). Geigers alter Kollege von der PTR in Berlin, Hermann Behnken, bekam kurz zuvor das Zählrohr mit der laufenden Nr. 68 (22cm² wirksame Oberfläche, 0,13mm Wandung). Im zugehörigen Briefwechsel zwischen Oktober und November 1928 bittet Geiger Behnken Eichmessungen mit dem Zählrohr für Röntgenstrahlung durchzuführen. Skizze nebst Zahlenangaben seien aber vertraulich zu behandeln, so Geiger.

 $^{^{249}}$ Geiger an v.Hevesy, 6.8.1928, Niels Bohr Archive Kopenhagen, George Hevesy Scientific Correspondance, ID 01/02/001.

[W]enn sie vielleicht später mit Zählrohr oder Spitzenzähler Präzisionsmessungen machen wollen, kann es sein, dass eine völlig konstante Spannung nötig wird. In diesem Fall würde ich Ihnen aber zu Anodenbatterien raten, die bei guter Behandlung fast 2 Jahre halten und kaum Wartung brauchen.²⁵⁰

Im Januar 1929 bekommt Hevesy schließlich Zählrohr Nr. 32, "das schon zwei Monate alt ist und auch jetzt noch gut arbeitet"²⁵¹. Hevesy äußerte anscheinend die Bitte, ob sein Assistent Dr. Seith nach Kiel komme dürfe um mit dem Zählrohr zu arbeiten. Geiger sagt ihm für den 22. April 1929 zu²⁵².

Die elektrische Schaltung

Vor dem 5. Mai 1928 hat Müller im Kontext der Spitzenzähler Experimente eine kleine Schaltung an den Rand seines Laborbuchs skizziert. Bis auf die fehlenden Angaben zu Größenordnungen in Müllers Variante ist sie mit Geigers Schaltung identisch (vgl. Abbildung 29, S. 85). Geiger schreibt im selben Brief, dass sich als Sicherheitskondensator zum Schutz des Fadenelektrometers vor möglichen Durchschlägen "ein Stück Glimmer beiderseits mit Staniol [sic] beklebt"253 gut eignen würde. Zur Registrierung der Spannungsimpulse schlägt Geiger ein Fadenelektrometer vor. Welcher Typ, also ob ein Hoffmann'sches, eines nach Elster und Geitel, ein Quadrantenelektrometer nach Thomson oder nach Dolezalek oder lediglich ein der kleinen Skizze am ehesten entsprechendes einfaches Wulf'sches Elektroskop, ist nicht eindeutig festzustellen.

 $^{^{250}}$ Geiger an v.Hevesy, 15.9.1928, Niels Bohr Archive Kopenhagen, George Hevesy Scientific Correspondance, ID 01/02/001.

²⁵¹ Geiger an v.Hevesy, 7.1.1929, Niels Bohr Archive Kopenhagen, George Hevesy Scientific Correspondance, ID 01/02/001.

 $^{^{252}}$ Geiger an v.Hevesy, 20. und 27.2.1929, Niels Bohr Archive Kopenhagen, George Hevesy Scientific Correspondance, ID 01/02/001.

²⁵³ Geiger an Behnken, 11.11.1928, Archiv der PTB Braunschweig, Akte 758.2. Stanniol ist eine damals gebräuchliche Bezeichnung für dünne Zinnfolie. Heute würde man damit höchstens noch Aluminiumfolie für den Haushalt identifizieren. Glimmer ist ein Mineral, das auch für die Fenster in den Zählrohren benutzt wurde.

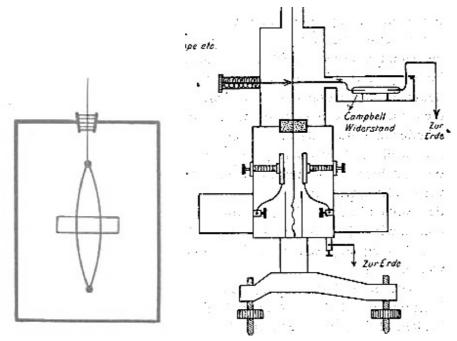


Abbildung 73: Links: Elektroskop nach Wulf (Geiger & Makower 1920, 32. Mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg) zum Vergleich mit Geigers Skizze (Abbildung 72). Rechts: Fadenelektrometer nach Elster und Geitel (Hess & Lawson 1916, 7. Mit freundlicher Genehmigung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien). Kommentiert sind drei Bauteile: "Campbell Widerstand" und zwei Mal "Zur Erde".

Im Prinzip werden bei einem Fadenelektrometer Spannungen in einem dünnen leichten Faden oder Draht im elektrischen Feld des Kondensators registriert. Die Auslenkung des Drahtes aus der Ruheposition durch Influenz ist ein Maß für die anliegende Spannung. In Müllers Aufbau war der genaue Wert der Spannung aber nicht von primärem Interesse, sondern viel mehr die Anzahl der Ausschläge pro Minute. Geigers Kategorisierung als "ein einfaches Fadenelektrometer" gegenüber Hevesy würde hier also passen. Ein konstantes Anliegen der Spannung wird zudem durch den Kondensator im Schaltkreis verhindert.

Eine übliche Methode zur Realisierung von hohen Widerständen mit $1G\Omega$ und mehr war die von Campbell etablierte Verwendung von Wasser, welches je nach gewünschter Leitfähigkeit mit Alkohol versetzt wurde. In den Laborbüchern zu Müllers Dissertation und im letzten, fünften Laborbuch zum Zählrohr findet man auch die Anmerkung, dass er schmale Papierstreifen mit Bleistiftstrichen, also Graphit mit entsprechender Länge, verwendet hat, die den gleichen Zweck erfüllen sollen (Abbildung 74).

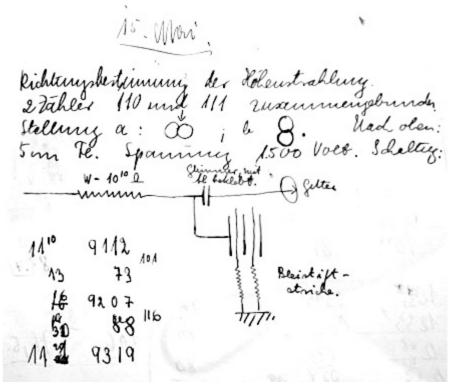


Abbildung 74: Eintrag im Laborbuch über eine elektrische für zwei Zählrohre mit Bleistiftstrichen als Erdungswiderstand ²⁵⁴.

Im dritten Laborbuch findet man auf Seite 138 im Kontext einer schon in Abschnitt II.4.3 diskutierten Zählrohrbeschaltung (Abbildung 43, S. 104) die Notiz "Papierwiderstand (1000 M Ω)" und "Silit (10 M Ω)"²⁵⁵, was eine entsprechende Verwendung der Bleistiftstriche auch beim Zählrohr vermuten lassen könnte²⁵⁶.

Die automatische Zählung der Impulse

Bei der Nutzung des Zählrohrs für Messungen, die Müller durchgeführt hat, gibt es zwei experimentelle Probleme: entweder die Zählrate ist auf Grund der großen Abschirmung durch Eisen und Blei bei Höhenstrahlungsmessungen sehr gering und bedarf viel Zeit und Konzentration oder sie ist viel zu hoch, um sie manuell zählen zu können. Letzteres wäre zum Beispiel

²⁵⁴ Walter Müllers Laborbuch Nr. 5, 1929, S. 21. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution. "15. Mai [1929] Richtungsbestimmung der Höhenstrahlung. 2 Zähler 110 und 111 zusammengebunden. Stellung a: [...]; b [...]. Nach oben: 5 cm Fe[rrum]. Spannung 1500 Volt. Schaltung: W-[iderstand] $10^{10}\Omega$. Glimmer mit Al[uminium] beklebt. Gitter. Bleistiftstriche."

 $^{^{255}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 138. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

²⁵⁶ Silit war ein zu der Zeit übliches Material für (im Vergleich zu Drahtwiderständen platzsparende) Hochlastwiderstände, die unter anderem zum Dimmen von elektrischer Beleuchtung und als Heizelemente zum Einsatz kamen, da sie Temperaturen bis 1400°C ohne Beschädigung aushalten können, vgl. Benetsch 1913.

bei Radium oder anderen radioaktiven Isotopen der Fall, deren Aktivitäten i.d.R. weit über der von dem zu Anfang verwendeten Kalium liegen. Besonders die intensive Beschäftigung mit der Höhenstrahlung und die notwendige kleine Streuung der Messwerte, erforderte eine hohe Zählrate trotz der großen Abschirmung. Müllers Notizen zeigen, dass er zunächst immer die Zeit bestimmt hat, in der 100 Ereignisse gezählt wurden. Bei späteren Höhenstrahlungsmessungen notierte er jeweils die Uhrzeit und die in dieser Zeitspanne auftretende Anzahl an Ereignissen. Ein Zählereignis manifestierte sich dabei durch einen Ausschlag eines Fadenelektrometers. Bereits im August 1928 findet man einen Eintrag in Müllers Laborbuch über eine Zählmaschine.

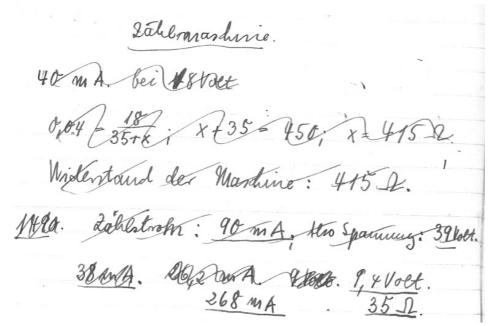


Abbildung 75: Eintrag über eine Zählmaschine vermutlich im August 1928²⁵⁷.

Auf Grund der Streichung des Eintrags kann man aber vermuten, dass diese Versuche keinen Erfolg gehabt haben. Gegenüber seinen Eltern kündigt er nämlich erst im Dezember 1928 den Bau einer Zählmaschine an. Im Laborbuch findet man entsprechende Einträge nach dem 19. Dezember:

²⁵⁷ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 84. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

Lahlmashine.

Nichel: 1374 1702. # 223 228
1795/3

1870/4
1870/4
1825
81/3

Abbildung 76: zweiter Eintrag über eine Zählmaschine im Dezember 1928 mit ersten Messwerten²⁵⁸.

Im Februar 1929 schrieb er diesbezüglich, dass "die automatische Zählvorrichtung" Tag und Nacht laufen würde²⁵⁹. Im März darauf konnten seine Eltern dann lesen:

Unsere Versuche machen wir jetzt mit einem Messschreiber. Ich habe mal einen Probestreifen beigelegt. Zwei Zählrohre sind gleichzeitig in Gang u. die Anschläge werden automatisch auf dem selben Papierstreifen geschrieben. Ich stelle tägl. etwa 120 m solcher Streifen her u. habe abends das Vergnügen, die Streifen auszuwerten. Besonders interessieren die Fälle, wo beide Zähler gleichzeitig Ausschläge ergeben. Auf dem Streifen ist das z.B. bei der roten "23" der Fall. Hier ist ein Elektron vom einen Zähler durch 5cm Eisen in den anderen hineingeflogen, eine Leistung, die noch nicht bekannt ist, denn die schnellsten jetzt bekannten Elektronen durchschlagen etwa 3 mm Eisen. Doch genug von dem Fachgesimpel.²⁶⁰

Man erhält hier die Informationen, dass ein Messschreiber genutzt wurde, der die Impulse automatisch auf einen laufenden Papierstreifen geschrieben hat. Diese Methode bedarf einer Röhrenschaltung, da der Schreiber durch ein elektromagnetisches Relais geschaltet werden muss. Ein Hinweis darauf, dass Röhrenschaltungen benutzt wurden gibt es in den Laborbüchern nur durch die häufige Verwendung des Wortes "Relais" und auch beispielsweise in Abbildung 74 durch das Wort "Gitter"²⁶¹. Zudem ist dies neben den entsprechenden Veröffentlichungen (vgl. Abschnitt II.4.4) ein Beleg darauf, dass Geiger und Müller Koinzidenzversuche mit den Zählrohren durchgeführt haben.

 $^{^{258}}$ Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 171. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

²⁵⁹ Müller an seine Eltern, Februar 1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

²⁶⁰ Müller an seine Eltern, März 1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

²⁶¹ Gemeint ist das Gitter einer Röhre, welches den Stromkreis zwischen Anode und Kathode in der Röhre bei entsprechendem Stromfluss im Sekundärkreis schließt.

Im Iuni 1929 ändert Müller seine Wortwahl: "Ich schreibe diesen Brief im während das automatische Zählwerk fröhlich Institut. seine Höhenstrahlteilchen zählt."262 Im entsprechenden (fünften) Laborbuch dieser Zeitspanne findet man seitenweise vierstellige Zahlenkolonnen, die bei verschiedensten Experimenten zur Höhenstrahlung aufgenommen wurden. Eine manuelle Zählung auf einem Papierstreifen kann man daher ausschließen. Eine mögliche Verbesserung des Aufbaus käme eher in Frage. Während das Auswerten und Interpretieren der Messstreifen trotz der automatischen Zählung immer noch sehr zeitaufwändig war, hätte die Nutzung eines ebenfalls Relais-gesteuerten Zählwerks die Arbeit des Experimentators lediglich auf das Aufbauen der Apparatur und am Ende der Messung das Ablesen des Wertes beschränkt (vgl. Abbildung 80, S. 173).

Die Hochspannungsversorgung

Die Hochspannungsquelle hat Müller vermutlich am Anfang seiner Experimente zunächst durch einen Transformator realisiert, dessen Wechselspannung im Sekundärkreis gleichgerichtet wurde. Später nutzte er dann Anodenbatterien, die eine weitaus stabilere Gleichspannung lieferten. Entsprechende Hinweise sind auch im weiter oben beschriebenen Briefwechsel zwischen Geiger und Georg von Hevesy zu finden. Nachteil war jedoch, dass solche Anodenbatterien eine Spannung von maximal 150 Volt liefern konnten. Für den Betrieb der Zählrohre mussten so bis zu zehn kostspieliger Batterien in Reihe geschaltet werden. Anodenbatterien boten jedoch im Vergleich zu Transformatorschaltungen die Möglichkeit, die Spannung in kleinen Schritten von 10 Volt regeln zu können. Dies erklärt solche im späteren Verlauf des Laborbuchs auftretenden kleinen Spannungsvariationen und den notwendigen Wechsel zu Anodenbatterien. Zudem wird diese Art der Spannungsversorgung von Müller in einem Brief an seine Eltern schon im November 1928 erwähnt:

Ich glaube, ich schrieb Euch schon mal, dass ich verschiedene Gase im Zählrohr untersuchte. Als Ergebnis hat sich nun gezeigt, das[s] die Betriebsspannung in Argon bei etwa 300 Volt liegt. Dass heisst aber, dass die Kosten für eine vollständige Zählrohranlage auf etwa 50.- Mk. herabgedrückt werden, allerdings ausser dem Zählrohr. [...] Auch für Schulen wäre die ganze Apparatur durchaus erschwinglich, ich würde z.B. der Hildaschule ein Rohr dedizieren können. Da die Hildaschule meines Wissens über 4 Anodenbatterien, 2 Verstärkerröhren u. 1 Lautsprecher verfügt, würden keinerlei Ausgaben entstehen, wohl aber wäre die Möglichkeit gegeben, vor einer ganzen Klasse die schwächsten Strahlungen in donnernde Knalle umzusetzen. 263

²⁶² Müller an seine Eltern, Juni 1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Hervorhebung von mir.

²⁶³ Müller an seine Eltern, 26.11.1928, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

Für je eine Verstärkerröhre wäre eine Anodenbatterie notwendig und für die notwendige Hochspannung am Zählrohr die zwei verbleibenden. Rechnerisch käme man auch hier auf 150 Volt pro Batterie.

5. Der Nachbau und der Nachvollzug

Für einen quellengetreuen Nachbau scheinen also auf Basis der Laborbuchanalyse in Abschnitt II.4, dessen genaue Kenntnis zum Verständnis dieses Abschnitts vorausgesetzt wird, fast alle notwendigen Informationen vorzuliegen. Mit dem Prozess des eigenhändigen Nachbaus des Prototypen, Zählrohr 10 und Zählrohr 14-16 soll der Evolutionsprozess anhand der drei in Abschnitt II.4.11 präsentierten Generationen nachvollzogen werden, um insbesondere das Problem der Abdichtung näher zu analysieren. Dieses Vorgehen ersetzt den bei der Replikationsmethode üblichen Nachvollzug von assoziierten Experimenten und der anschließenden Analyse. Diese Entscheidung fußt einerseits darauf, dass erst gegen Ende der Phase des Nachbaus der Konstruktionsalgorithmus so weit von mir stabilisiert wurde, dass eine verlässliche Produktion von Zählrohren möglich wurde. Andererseits gibt es wenig dokumentierte Experimente, die im Rahmen meiner Studie hätten nachvollzogen werden können. Vor dem Hintergrund, dass meine Nachbauten im konkreten Fall eines frühen Nachvollzugs beispielsweise von den dokumentierten. aber sehr aufwendigen Abschirmungsexperimenten mit Eisen und Blei nicht funktioniert hätten, war das finanzielle Risiko zu groß und retrospektiv gesehen auch für die Arbeit meiner Einschätzung nach nicht notwendig. Der Nachvollzug von dokumentierten Experimenten passiert lediglich im Kontext Funktionsprüfung mit Hilfe von Kalium und Radium. Zudem hat es ein für das Geiger-Müller Zählrohr zentrales und charakteristisches Experiment im Gegensatz zu z.B. Millikans (Panusch 2012) und Coulombs Arbeiten (Heering 1998) nicht gegeben. Der Schwerpunkt der Analyse liegt daher nicht auf der Erschließung der Messpraxis sondern auf der der Konstruktion und Evolution der verschiedenen Zählrohrgenerationen.

Das Gehäuse

Das Gehäuse wird aus einem Messingrohr mit entsprechender Wandung und 20mm Außendurchmesser (bzw. 15mm beim Nachbau der 3. Generation) gefertigt. Beim Prototyp fehlt im Laborbuch die Angabe der Wandungsstärke. Da aber bei Zählrohr 10 ein Rohr mit ebenfalls 20mm Durchmesser verwendet wurde, liegt der pragmatische Rückschluss nahe, dass das gleiche Rohr auch für den Prototyp hätte verwendet werden können. Bei jedem Zählrohr wurden die Kanten mit einem Kegelsenker entgratet und anschließend sorgfältig von innen mit Pfeifenreiniger poliert. Ein Glimmerfenster habe ich nie in eines meiner Nachbauten eingebaut²⁶⁴.

²⁶⁴ Und dies, obwohl Hinweise darauf in Müllers Notizen zu finden sind. Es ist aber nie notiert, wo genau die Fenster im Gehäuse oder im Stopfen angebracht wurden, welchen Durchmesser sie hatten oder wie dünn das verwendete Glimmer denn tatsächlich war. Zudem hätte hier auch die nicht dokumentierte, luftdichte Verklebung der Fenster

Die Endstopfen

Die Endstopfen der Zählrohre wurden gemäß Laborbuch aus Hartgummi (Ebonit) gefertigt. Die jeweilige Form wurde mit einer Drehbank und einem dafür angefertigtem Werkzeug aus einem Vollzylinder gedreht²⁶⁵. Dabei habe ich mich Stück für Stück an den inneren Durchmesser der Messingrohre angenähert, um eine möglichst genaue Passung zwischen Stopfen und Zählrohrgehäuse zu gewährleisten. Bei den Stopfen der 2. Generation war die Fertigung der Stopfen am kompliziertesten, da das Herstellen einer passgenauen Nut im Vergleich zu den anderen beiden Stopfen-Varianten messtechnisch und handwerklich am aufwändigsten war. In allen drei Varianten wurden die Kanten mit feinem Schleifpapier entgratet sowie die Bohrlöcher für Draht und Glaskapillare mit dem Kegelsenker vor allem an der Innenseite leicht abgerundet. Die Oberfläche, die später die Begrenzung Zählrohrinnenraums bildet. wurde anschließend mit Schleifpapier sorgfältig poliert. Danach wurden die Stopfen unter Wasser abgespült, vom Schleifstaub befreit und in einem Ofen getrocknet, damit die Restfeuchte auf nahezu Null reduziert werden kann²⁶⁶. Neben der Abdichtung der Zählrohre wurden die Zähldrähte mit deren Hilfe axial gespannt.

Die Abdichtung

Während der Prototyp des Zählrohrs vermutlich unter einer Vakuumglocke betrieben wurde, wurden die späteren Zählrohre ohne dieses Hilfsmittel betrieben. Das Zylindergehäuse musste daher zusätzlich zu den Ebonitstopfen mit einer Dichtmasse gegen die äußere Atmosphäre abgedichtet werden. Dieses Detail der Konstruktion wird weder in Publikationen noch in den zugehörigen drei Laborbüchern von 1928/29 thematisiert. Daher scheint hier ein Blick in den näheren experimentellen Kontext des Zählrohrs notwendig. Als zeittypisches Dichtungsmaterial bin ich in verschiedenen Quellen (z.B. auch in Hess & Lawson 1916) auf Pizein (auch

rekonstruiert werden müssen. Zudem sind Experimente mit Glimmerfenster-Zählrohren in den zur Verfügung stehenden Quellen bis Ende 1929 nicht dokumentiert.

²⁶⁵ Ich habe dafür 3 unterschiedlich dicke Ebonit-Vollzylinder mit den Durchmessern 10mm, 20mm und 34mm verwendet. Diese habe ich von der *Schönberger Ebonite Manufaktur GmbH* in Hitzacker (Elbe) bekommen. Die Firma wirbt mit einer traditionellen Herstellung des Materials ohne moderne Zusätze.

²⁶⁶ Der Schritt der sorgfältigen Trocknung der Stopfen hat sich im Nachhinein als der entscheidende Punkt für das Funktionieren meiner Nachbauten herausgestellt. Frühe Nachbauten der 3. Generation haben zunächst nie erwartungsgemäß funktioniert. Erst als ich die Stopfen intensiv in einem Ofen getrocknet und anschließend eingebaut habe, haben auch die Nachbauten der 3. Generation funktioniert. Das Problem bis dahin waren wohl durch die leichte Restfeuchte verursachte Kriechentladungen zwischen Gehäuse und Draht auf der Ebonit-Oberfläche.

Picein) gestoßen²⁶⁷. Die Ionisationskammern für Müllers frühere Experimente hat er laut Publikation mit "Wachs" (Müller 1928b) abgedichtet. Ein Blick in die drei Laborbücher von 1926/27 identifiziert dieses 'Wachs' als eine Wachs-Kolophonium Mischung mit einem nicht näher definiertem Mischungsverhältnis²⁶⁸. Eine weitere Informationsquelle war ein Artikel von Hamblin & Johnson (1937). Der Artikel thematisiert meinen Recherchen nach das erste Mal detailliert die Konstruktion eines einfachen Zählrohrs²⁶⁹. Für die Abdichtung wird ebenfalls eine Wachs-Kolophonium Mischung vorgeschlagen, aber in diesem Fall mit einer Mengenangabe von '2 zu 5'. Die Herstellung und Anwendung dieser Mischung gestaltete sich vergleichsweise einfach. Nachdem das Burgunderharz im flüssigen Wachs²⁷⁰ gelöst und die Mischung aufgekocht wurde, konnte die leicht abgekühlte, aber noch warme, viskose Masse mit einem Glasstab auf die abzudichtenden Stellen aufgetragen werden.

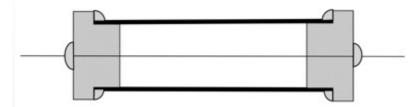


Abbildung 77: Abzudichtende Stellen (gelb) beim Nachbau des Zählrohrprototypen. Hinzu käme noch die Glaskapillare, die mit Hilfe der Wachsmischung gut in den Ebonit-Stopfen eingeklebt werden kann.

²⁶⁷ Dabei handelt es sich um eine schwarze Kohlenwasserstoff-Verbindung, die durch Erwärmung flüssig wird. Die starke Geruchsentwicklung beim Abdichten der Zählrohre mit dem flüssigen Pizein und die im Vergleich zu Wachs schwerere Handhabung hat mich neben der Nähe zu Müllers experimenteller Praxis dazu bewogen, die Wachsmischung zu nutzen. Trotzdem möchte ich an dieser Stelle Wolfgang Engels (HistEx Oldenburg) für die freundliche Bereitstellung des Materials danken.

²⁶⁸ Eine entsprechende Mischung von Bienenwachs und Burgunderharz bzw. Kolophonium ist auch unter der Bezeichnung Siegelwachs bekannt. Kolophonium erhält man, indem man Burgunderharz aufkocht und so den Flüssigkeitsanteil reduziert. Durch die Beimischung von Bienenwachs wird das sehr spröde Kolophonium weicher und flexibler. In Abgrenzung dazu besteht Siegel<u>lack</u> aus Bienenwachs und Schellack. Beiden Mischung kann eine geringe Menge Lärchenterpentin und Pigmente (z.B. Umbra oder Zinnober) zur Bindung und Färbung beigesetzt werden.

²⁶⁹ Im Vorwort des Artikels heißt es: "We are not aware of the existence of any publication which sets out to describe in sufficient detail the construction of a counting mechanism, to lay stress upon essential particulars, and to point out the numerous pitfalls in operation. This paper is an attempt to present a *complete* description of a basic counting apparatus which should enable anyone to reproduce it without difficulty." (Hamblin & Johnson 1937, 553) Die Motivation dieser beiden <u>Chemiker</u> des Instituts für physikalische und anorganische Chemie der Universität Bristol sich mit diesem Thema zu beschäftigen bleibt jedoch offen.

²⁷⁰ Zum Schmelzen des Bienenwaches habe ich einen Schmelztiegel, ein Stövchen und ein Teelicht verwendet. Frühere Versuch mit einem Bunsenbrenner haben zwar auch funktioniert, aber das Wachs hat dabei zu stark gesiedet. Die Gefahr der Entzündung des Wachs im Tiegel konnte durch die sehr viel geringere, aber dennoch ausreichende Wärmezufuhr des Teelichts vermieden werden. Diesen wertvollen Hinweis verdanke ich Martin Panusch.

Die Nachbauten der 2. Generation hatten zusätzlich die schon angesprochene Nut in den Stopfen, in welche ich die Wachsmischung gegossen habe, bevor das Zählrohrgehäuse im Nut-Feder Prinzip eingelassen wurde. Bei den Nachbauten der dritten Generation gestaltete sich die Abdichtung am einfachsten: Nachdem die Glaskapillare mit dem Wachs benetzt und in den Stopfen eingeklebt wurde, wurde der etwa 1cm versenkte Ebonit-Stopfen mit der Wachsmischung vergossen. Während nach dem Abkühlen der Dichtung der 3. Generation die nachgebauten Zählrohre absolut luftdicht waren, kostete dies bei den Zählrohren der vorigen beiden Generationen sehr viel Mühe und Geduld. Vor allem der scharfkantige dünne Stahldraht der ersten Generation hat immer wieder die Dichtung beschädigt. Zumindest dieses Problem trat bei den Nachbauten der 2. Generation durch die Draht-Variation nicht mehr auf. Zum Test der Konstanz des Unterdrucks habe ich statt der üblichen Glaskapillare einen Glas-Hahn in ein Zählrohr eingeklebt. Auch nach mehreren Tagen war im Zählrohr ein geringer Druck vorhanden als außerhalb²⁷¹.

Die Bariumsulfat-Öl Dichtung

Mit der Abdichtungsvariante der 3. Generation ergibt sich jedoch ein apparatives und ein materielles Problem: Einerseits war der Austausch des Zähldrahtes im Vergleich zu den beiden Vorgängergenerationen nicht mehr möglich. Dieser Vorgang ist für die ersten Zählrohre in Müller Laborbuch einige Male zu finden. Müller tauschte Stahldrähte verschiedener Dicken aus und teste auch Platin, lackierte Drähte und Silber als Alternativen. Andererseits entspricht schon die Farbe der Dichtung der nachgebauten dritten Generation nicht der des Artefakts im Smithsonian (Abbildung 65, S. 148). Wie bereits erwähnt, zeigte die chemische Analyse sowie das Röntgenbild, dass die Hauptbestandteile der Dichtmasse Bariumsulfat (BaSO₄) und ein Öl sind. Für eine solche Bariumsulfat-Öl-Suspension kommen auf Grund der erforderlichen Festigkeit des Materials nur trocknende Öle in Betracht. Am sinnvollsten schien mir die Verwendung von Leinöl, das im Kunsthandwerk zur Mischung von Ölfarben verwendet wurde und wird. Der Trocknungsprozess dauert aber bei der im Vergleich zur Malerei großen Schichtdicke vermutlich mehrere Jahre. Um die Trocknung zu beschleunigen, wurden und werden Sikkative als Katalysator den Ölfarben beigemischt, die Schwermetalloxide von Blei, Mangan, Kobalt oder Zink enthalten. Indiz für diese Art der Verwendung im Artefakt sind die starke

²⁷¹ Eine quantitative Bestimmung der Konstanz war mit den mir zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich. Ich habe die Zählrohre mit einer modernen Vakuumpumpe mit Rezipient und Manometer evakuiert. Das gesamte Volumen von Pumpe und den Rohrleitungen war aber im Vergleich zum Volumen des Zählrohrs um ein Vielfaches größer. Kleine Änderungen des Drucks hätte das Manometer so nicht anzeigen können.

Vergilbung und die Risse 272 , die in der Dichtung deutlich sichtbar sind. Warum das Leinöl gerade mit Bariumsulfat aufgeschlämmt wurde, kann ich nur vermuten. Ein Grund könnte gewesen sein, dass Bariumsulfat kurzwellige Strahlung im UV-, Röntgen- und γ -Bereich stark absorbiert. Zu sehen ist dies auch im Röntgenbild (Abbildung 65, S. 148). Ein potentieller Einfluss von Strahlung, die nicht durch die Gehäusewand eintritt, hätte so minimiert werden können. Unklar bleibt jedoch, ob diese Eigenschaft des Bariums Müller damals bereits bekannt gewesen ist.

Meine Versuche verschiedene Leinöle, Rizinusöl und Sojaöl mit Bariumsulfat sowie mit und ohne Sikkative zu trocknen, sind jedoch gescheitert. Eine feste Konsistenz, wie sie die Dichtung des Zählrohrartefakts aufweist, konnte für einen Nachbau nicht hergestellt werden. Auch meine Nachbauten der dritten Generation haben daher die auf Basis der Laborbücher authentischer erscheinende Wachs-Dichtung.

Der Zähldraht

Für den Zähldraht habe ich bei jedem Nachbau Stahldrähte mit 0,2mm und 0,3mm Durchmesser verwendet²⁷³. Ich habe zunächst Drähte aus dem Bestand der hiesigen Physiksammlung genutzt, die schon leicht bis stark korrodiert und deformiert waren waren. Mit Hilfe eines Bunsenbrenners und Schleifpapier habe ich die Drähte vom Rost befreit und begradigt, bevor ich sie der von Müller im Laborbuch und Korrespondenz beschriebenen Säurebehandlung ausgesetzt habe. Als Säure habe ich analog zu Müllers Notizen zum Prototypen zunächst Phosphorsäure (H₃PO₄) benutzt, aber keinen sichtbaren Effekt erzielen können. Schwefelsäure (H2SO4) in hoher Konzentration hat den dünnen Stahldraht sichtbar angegriffen und oxidiert. Aber auch das von Müller im Laborbuch notierte 30-Sekunden-Bad in Salpetersäure (HNO₃) zeigte ähnliche Wirkung. Alternativ habe ich, wie von Müller ebenfalls thematisiert wurde, den Draht mit Hilfe eines Bunsenbrenners oder einer Gleichstromquelle bis zur Rotglut erhitzt. Besonders durch das Ausglühen des Drahtes konnte eine gerade Form erreicht werden. Die so konstruierten Nachbauten der Zählrohre der ersten Generation mit 0,3mm Stahldraht haben mit dieser Vorbehandlung gemäß den Erwartungen funktioniert. Um die Zählrohre der zweiten und dritten Generation nachbauen zu können, habe ich noch 0,2mm und 25µm anfertigen lassen²⁷⁴. Der vermutlich ahistorische hohe Stahldraht

²⁷² In der Malerei würde man diese Risse Krakelee nennen.

²⁷³ Platin wird zwar als Material für die Spitze von Spitzenzählern auch von Müller verwendet, aber konnte nicht als Material für den Zähldraht nutzbar gemacht werden, wie die Laborbuchanalyse gezeigt hat.

²⁷⁴ Den Stahldraht habe ich bei der Firma *Goodfellow* mit folgenden Spezifikationen bekommen können: Fe/Cr18/Ni10/Mo3, 0,2mm, Härtegrad wie gezogen und Fe/Cr18/Ni8, 0,025mm, Härtegrad geglüht.

Präzisionsgrad des Drahtes hatte den Vorteil, dass keinerlei Korrosion und Unebenheiten auf dem Draht optisch feststellbar waren. Diese Drähte haben jedoch schon ohne die Säurebehandlung im Zählrohr ihren Dienst getan. Müller schreibt dazu an Trenn:

Eine Vorbehandlung des Drahtes ist nicht nötig, wenn ordentliche, dem Feinmechaniker Standard entsprechende Drähte verwendet werden. (vorzugsweise aus Pt oder Chromeisen) ²⁷⁵

Zwei Jahre vorher betont er aber zusätzlich noch:

Tatsächlich war es leichter, das Zählrohr zu betreiben, wenn der Draht entsprechend vorbehandelt war. Daß diese Vorbehandlung nicht unbedingt nötig war, wurde sehr bald auch von anderer Seite erkannt (H. Kniepkamp, Phys. ZS 30, 237, 1929) wie in der Publikation von Geiger und mir erwähnt ist. ²⁷⁶

Im Nachgang meiner Experimente wäre dieses Phänomen zu erklären: Für einen optimalen Zählbetrieb muss das elektrische Feld im Zählrohr äußerst konstant sein. Dies erreicht man unter anderem dadurch, dass der Abstand zwischen Gehäuse und Draht sowie der Durchmesser des Drahtes äußerst konstant sind. Kleine Grate oder Unebenheiten würden zu Teilentladungen führen, die das Herstellen eines Zählbetriebs erschweren. Die Behandlung mit Säure oder das Ausglühen des Drahtes vermindert diese Grate, die natürlich bei feinmechanisch gefertigten Drähten nicht auftreten. Auch Hess und Lawson betonen bei der Beschreibung der Herstellung ihres Halbkugelzählers, dass die Oberflächen der Kugelelektroden sorgfältig poliert werden müssten, um Entladungen zu vermeiden.

Die in den Skizzen von Zählrohr 10 und 14-16 (Abbildung 68, S. 150) bzw. im Röntgenbild von Zählrohr 16 (Abbildung 66, S. 149) sichtbare Änderung des Drahtes im Vergleich zum Prototyp wird in den anderen zur Verfügung stehenden Quellen nicht weiter thematisiert. Im Gegensatz zum Prototypen besteht die Anode hier aus zwei unterschiedlichen Drahtmaterialien: Einem dünnen Zähldraht aus Stahl sowie einem nach außen geführten, dickerem Draht aus Kupfer. Die zwei unterschiedlichen Materialien machen es unmöglich eine Verbindung mit ordinärem Lötzinn herzustellen. Ein erster Lösungsansatz von mir war die Herstellung einer Quetschverbindung. Dazu habe ich mit einem 0,5mm Bohrer ein Loch in den plan geschliffenen Kupferdraht gebohrt und den dünnen Draht mit einer Quetschzange in diesem Loch fixiert. Zwar hat diese Lösung zufriedenstellend funktioniert, aber das Röntgenbild des Artefakts spricht gegen diese Option. Wie schon bei der Artefakt-Analyse angesprochen, ist deutlich ein drittes Material im Röntgenbild zu sehen, welches einen intensiveren Röntgenschatten wirft als das Ebonit. Eine Alternative zum Weichlöten mit Zinn wäre Hartlöten mit Gas

²⁷⁵ Müller an Trenn, 14.12.1974, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{276}}$ Müller an Trenn, 19.08.1972, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Bei dem referenzierten Artikel handelt es sich um (Kniepkamp 1929).

und Silberlot. Erste Versuche diese Verbindung herzustellen haben ebenfalls funktioniert. Es war aber nicht möglich einen dünnen Film ähnlich dem auf dem Röntgenbild herzustellen. Die Drähte in Müllers Ionisationskammer aus seiner Dissertationszeit hat er mit "weißem Siegellack" angeschmolzen. Welche Bestandteile oder Eigenschaften diesen Siegellack auszeichnen und für diesen Zweck prädestinieren, wird aus den Aufzeichnungen heraus aber nicht klar. Die vierte Alternative neben Zinnlot, Quetschverbindung und Silberlot, die ich ausprobiert habe, war Zinnlot mit hohem Bleianteil. Diese Variante hat ebenfalls funktioniert. Die Verbindung der beiden Drähte war zwar zugfest, jedoch nicht gänzlich stabil. Daher habe ich für die Nachbauten der zweiten und dritten Generation die Quetschverbindung gewählt²⁷⁷. Den Draht habe ich in den Stopfen befestigt, indem ich den Stopfen mit einem dünnen Bohrer (der Durchmesser muss kleiner sein als der des Kupferdrahtes) komplett und anschließend mit einem etwas größeren Bohrer (der Durchmesser muss etwas größer sein als der des Kupferdrahtes) zur Hälfte durch- bzw. angebohrt habe. So konnte der Draht durch ein kleines, angequetschtes Stück Kupfer im Stopfen fixiert werden (vgl. Abbildung 84, S. 177).

Gasfüllung und Evakuierung

Die Zählrohrnachbauten jeder Generation waren mit getrockneter Luft gefüllt. Andere Gasfüllungen, wie Argon, Wasserstoff oder Helium habe ich nicht getestet. Während ich zunächst den Unterdruck in den Zählrohren mit einem Rezipienten hergestellt habe, habe ich Müllers Variation des ersten Zählrohrs mit zusätzlicher Glaskapillare recht schnell umgesetzt, da man bei Nutzung des Rezipienten nicht sehr flexibel die Versuchsanordnung ändern kann. Zwar kann man den Normaldruck recht schnell wiederherstellen, aber das erneute Herstellen der getrockneten Luft dauerte mitunter ein paar Tage. Mit gut abgedichteten Zählrohr-Nachbauten war aber der Betrieb außerhalb der Vakuumglocke tadellos möglich. Zum Anschluss der modernen Vakuumpumpe habe ich Glaskapillaren verwendet²⁷⁸. Unter die trotzdem

²⁷⁷ Eine fünfte Möglichkeit findet sich in dem Artikel von Hamblin & Johnson (1937). Hier wird vorgeschlagen, dass ein Gewinde in die im Rohr versenkten Stopfen geschnitten werden soll, in das eine Messingschraube eingesetzt werden kann. An diese Schraube soll auf der einen Seite der Zähldraht und auf der anderen Seite der Anschlussdraht aus Kupfer angelötet werden. Als Material für den Zähldraht wird aber Wolfram vorgeschlagen, dessen Ende in eine Tropfen Lot getaucht werden soll, um Schraube mit Draht zu verbinden. In späteren Funktionsnachbauten der dritten Generation habe ich diese Variante auch mit Stahldraht erfolgreich umsetzen können, wenngleich die Verbindung zwischen Messing und Stahl streng genommen eher 'geklebt' als gelötet ist. Neben den Ebonitstopfen habe ich auch Stopfen aus Acrylglas erfolgreich genutzt. Zum Schneiden der Gewinde habe ich handelsübliche Gewindeschneider für Metall verwendet.

²⁷⁸ Alternativ habe ich auch dünne Kupferkapillaren auf die gleiche Weise ausprobiert. Auf Grund der fehlenden erläuternden Aufzeichnungen in Müllers Laborbuch (vgl. Abbildung 41

noch genutzten Vakuumglocke des Rezipienten habe ich zunächst eine Petrischale mit Phosphorpentoxid (P₂O₅) zur Trocknung der Luft gestellt, den Druck auf etwa 10mbar verringert und den Aufbau für ein paar Tage stehen gelassen. Auf Grund der gesundheitlichen Risiken sowie der notwendigen Richtlinien-konformen Lagerung des eigentlich quellennäheren Phosphorpentoxid habe ich später stattdessen 98%tige Schwefelsäure in einem Becherglas verwendet. Beide Varianten gehen mit Aufzeichnungen im Laborbuch (P₂O₅) oder dem ferneren experimentellen Kontext (z.B. Hess & Lawson 1916) konform. Zur Kontrolle der Luftfeuchte habe ich ein Hydrometer zur groben Abschätzung der Luftfeuchtigkeitsänderung mit unter die Vakuumglocke gestellt. Nach der Trocknungsphase wurden die Zählrohr-Nachbauten über die Glaskapillare an das Pumpensystem angeschlossen. Nachdem der Druckausgleich über den Glashahn erfolgt war, wurde die Glaskapillare mit einem kleinen Gasbrenner abgeschmolzen²⁷⁹.

Weitere Modifikationen

Über den Prozess der Evakuierung der Zählrohre ist in den Primärquellen von Müller und Geiger wenig zu finden. In dem schon zitierten Briefwechsel zwischen Geiger und Hermann Behnken im November 1928 schreibt Behnken nach Erhalt des Zählrohrs:

[...] Ich vermute nun, daß das Rohr undicht geworden ist und nun Atmosphärendruck hat. Wie kann ich es wieder auspumpen und wie weit muß es evakuiert werden? Ich kann keinen Pumpenansatz daran entdecken. Vielleicht haben Sie die Freundlichkeit, mir recht bald Auskunft zu geben, damit ich weitermachen kann.²⁸⁰

Geiger antwortete drei Tage später auf einer Postkarte, dass Behnken das Zählrohr einfach an ihn zurückschicken solle, ohne auf seine Frage nach Details der Konstruktion und Handhabung einzugehen. Die wenigen Zählrohr-Skizzen im Laborbuch haben aber immer entweder keine eingezeichnete Kapillare zur Evakuierung oder keine von außen sichtbare. Auch die kleine Skizze auf dem zugehörigen Brief zeigt lediglich ein

auf S. 103) konnte ich diese Variante aber nicht erfolgreich anwenden. Weder das Abklemmen noch das Abschmelzen der Kupferkapillare hat das Zählrohr erfolgreich abgedichtet. Das Erhitzen der Kupferkapillare hat zudem dazu geführt, dass die Wachsdichtung sich verflüssigt hat.

²⁷⁹ Entgegen meiner Erwartung hat dieser Arbeitsschritt problemlos funktioniert. Das heiße flüssige Glas hat durch den Außendruck die Kapillare in wenigen Sekunden luftdicht verschlossen. Kontrolliert habe ich dies, indem ich während des Abschmelzvorgangs das Zählrohr im Betrieb hatte. Hätte sich der Druck um i.d.R. mehr als 10mbar geändert, hätte das Zählrohr seine Funktion eingestellt. Durch die Verwendung des Glashahns an der Pumpe konnten so mehrere Nachbauten der Zähler nacheinander abgeschmolzen werden. Der Trocknungsprozess der Luft musste so nicht für jeden Nachbau erneut erfolgen.

²⁸⁰ Briefwechsel Geiger - Behnken, 17.11.1928, Archiv der PTB Braunschweig, Akte 758.2. Bei dem versandten Zählrohr 68 handelt es sich um den "Behnken-Zähler" in Müllers Laborbuch. Datiert werden kann der sehr kurze Eintrag zwischen dem 8. und 12.11.1928, vgl. Walter Müllers Laborbuch Nr. 3, 1928/29, S. 153. Dibner Library of Rare Books, Smithsonian Institution.

rudimentäres Zählrohr ohne Kapillare (vgl. Abbildung 72, S. 155). Eine weitere modifizierte Bauform oder Variation eines Zählrohrs, in der die in der dritten Zählrohrgeneration noch sichtbare Kapillare nach der Evakuierung retuschiert wurde, scheint also wahrscheinlich²⁸¹.

Die elektrische Schaltung

Neben dem Zählrohr zeigt Geigers Skizze auch die detaillierteste elektrische Schaltung in den Primärquellen, die als Vorbild für meine für den Nachbau verwendete Schaltung diente. Insgesamt habe ich drei verschiedene Varianten genutzt: Eine Basisschaltung, eine darauf aufbauende Schaltung mit akustischer Registrierung und eine modernisierte Verstärkerschaltung. Die Basisschaltung entspricht der in Geigers Skizze (vgl. Abbildung 72, S. 155). Während ich für die 1 $G\Omega$ Widerstände moderne Kompakt-widerstände verwendet habe, habe ich für den Kondensator Geigers Variante aus Zinn und nachgebaut²⁸². Die zunächst verwendeten Kondensatoren haben der Hochspannung nicht lange Stand gehalten. Da ich ein Fadenelektrometer nicht beschaffen konnte, habe ich dessen Funktion durch ein modernes Oszilloskop ersetzt²⁸³. Aus dem gleichen Grund habe ich die teuren Anodenbatterien durch ein modernes Hochspannungsnetzteil ersetzt. Im Gegensatz zu den Anodenbatterien ist das Netzteil auf 500mA strombegrenzt, was zusätzlich die Gefahr eines tödlichen elektrischen Schlages ausschließt. Die elektrischen Bauteile habe ich mit Lüsterklemmen verbunden. Die deutlichen Zählimpulse auf dem Oszilloskop wurden manuell gezählt (Abbildung 78).

Als erste Variation habe ich die Zählimpulse durch einen Lautsprecher hörbar gemacht. Dazu inspiriert hat mich eine Schaltung aus einer frühen deutschsprachigen Geigerzähler-Monographie von Heinz Richter (1957, 92). Durch den eingebauten Kondensator in der Schaltung wird der Gleichspannungsanteil des Signals blockiert. Lediglich die Änderung der Spannung, also der Zählimpuls, kann passieren. Ein danach eingekoppelter hochohmiger Lautsprecher kann dieses Spannungssignal dann hörbar machen. Realisiert habe ich dies durch einen Lautsprecher eines alten Telefons. Mit dessen Hilfe konnte in diesem Aufbau auch ohne weitere

²⁸¹ Dieser Aspekt könnte auch Ausdruck der von Geiger und Müller praktizierten Geheimhaltungspraxis sein. Mehr dazu findet sich im nächsten Abschnitt II.6.

²⁸² Das Stückchen Glimmer hatte eine Dicke von 0,08mm. Die Zinnplättchen waren planparallel und 1,6 x 1,5mm groß. Nach Messung mittels eines RC-Gliedes hat dieser Kondensator eine Kapazität von $(52,1\pm16,7)\,pF$. Im Vergleich zu der berechneten Kapazität des Zählrohrprototypen mit 1,1 pF liegen beide Bauteile in der selben Größenordnung.

 $^{^{283}}$ Da ich in der Schaltung mit die 1 $G\Omega$ Widerständen gearbeitet habe, habe ich vor den Eingang des Oszilloskops ebenfalls einen baugleichen Widerstand in Reihe geschaltet. Dieser ist aber nicht in den Blockschaltbildern aufgeführt.

Verstärkung des Signals die Zählimpulse durch das charakteristische, knackende Geräusch deutlich hörbar gemacht werden (Abbildung 79).

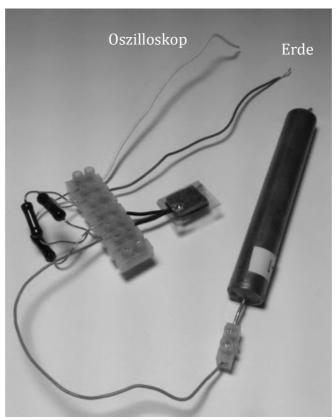


Abbildung 78: Die für den Nachbau verwendete elektrische Schaltung mit einem nachgebauten Zählrohr der dritten Generation. Es fehlt das Hochspannungsnetzteil, dessen negativer Pol an das Gehäuse des Zählrohrs angelegt werden muss. Der positive Pol führt zusammen mit dem grünen Draht zur Erdung. Der weiße Draht geht zum Oszilloskop. Zu sehen sind weiter drei 1 $G\Omega$ -Widerstände und der Glimmerkondensator.

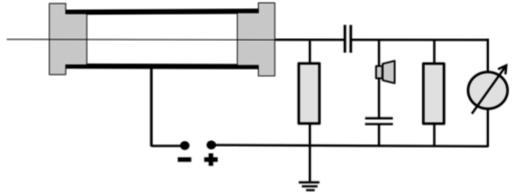


Abbildung 79: Erste Variation der elektrischen Schaltung mit zusätzlichem Lautsprecher. Der zusätzliche Kondensator hatte eine Kapazität von 82pF.

In der dritten Version der Schaltung habe ich im Bestreben, wie Müller die Zählung zu automatisieren, ebenfalls versucht, den kurzen Zählimpuls mit geeigneten Methoden zu verstärken. Dies ist notwendig, damit eine automatische Zählvorrichtung die einzelnen Impulse aufaddieren kann. Das uA schwache Signal würde nicht ausreichen, Elektromagneten eines Relais oder eines alten Telefoneinheitenzählers zu triggern. Ein zunächst ebenfalls von Richter (1957) inspirierte Röhrenschaltung ist leider in Ermangelung passender Röhren gescheitert²⁸⁴. Als Alternative dazu hab ich einen INA114-Verstärker benutzt, den ich anstelle des Oszilloskops angeschlossen hab. Mit dem verstärkten Signal konnte ich zwei alte Telefoneinheitenzähler sowie ein moderneres Zählgerät von Leybold betreiben. Parallel dazu habe ich den Lautsprecher angeschlossen. Ob jetzt jeder gezählte Impuls von einem radioaktiven Teilchen verursacht wurde, habe ich nicht quantitativ geprüft²⁸⁵. Der Aufbau mit Zählrohr-Nachbau, Schaltung und INA-Verstärker reagierte jedoch deutlich auf die Anund Abwesenheit von Radium²⁸⁶.

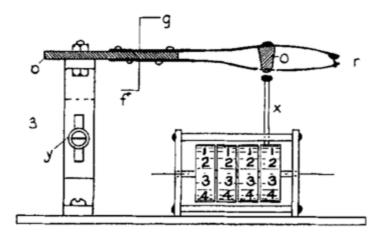


Abbildung 80: schematische Seitenansicht eines Telefoneinheitenzählers (Hamblin & Johnson 1937, 561). Mit freundlicher Genehmigung der Taylor & Francis Verlagsgruppe.

²⁸⁴ Wir hatten in der Abteilung leider keine passenden Röhrensockeln und nicht die in Publikationen vorgeschlagenen Röhrenmodelle (i.d.R. EF 40) der 1960er Jahre zur Verfügung.

²⁸⁵ Diese Prüfung wäre zwar möglich gewesen, hätte aber aus technischer Sicht keinen Sinn gemacht. Damit wirklich jeder Impuls vom Zählwerk oder dem digitalen Zähler registriert wird, müsste das Signal zumindest vor der analogen Zählung zunächst in Form und Dauer durch Diskriminatoren uniformiert werden. In dem Leybold Gerät ist dies vermutlich schon vorgesehen.

²⁸⁶ Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Philip Kemper, der im Frühjahr 2013 ein paar Tage seiner Zeit geopfert hat, um mit mir ein paar Zählrohre nachzubauen und sich mit mir zusammen den Problemen der elaborierteren elektrischen Schaltungen gewidmet hat.

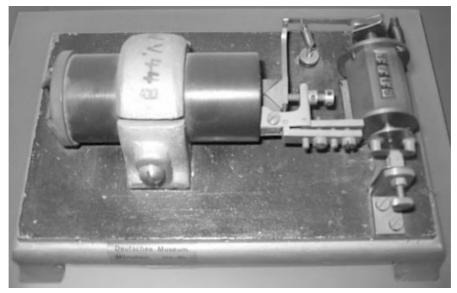


Abbildung 81: Walzenzählwerk (rechts) mit elektromagnetischem Relais (links) aus Geigers Bestand in Tübingen. Das Foto wurde in der Ausstellung des Deutschen Museums München 2011 aufgenommen. Mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums.

Messungen mit dem Nachbau

Die Funktionsprüfung der Zählrohr-Nachbauten geschah in der Regel über die Bestimmung der Nullrate. Hat diese Messung einen nachvollziehbaren Wert ergeben, so konnte dem Zählrohrnachbau gutes Funktionieren zumindest für den Moment attestiert werden. Einige Nachbauten haben nach ein paar Tagen auch ohne Benutzung ihre Funktion eingestellt. Bei dem letzten von mir angefertigten Nachbau der dritten Generation im Herbst 2012 hat die Messung der Nullrate über 10 Minuten einen Wert von 12,8 \pm 3,6 Ausschlägen in der Minute (bei 128 Ausschlägen in 10 Minuten) ergeben. Eine äquivalente Messung an 85g zerkleinertem Kaliumchlorid ergab abzüglich dieser zuvor bestimmten Nullrate einen Wert von 6,3 \pm 2,5. Dieser Wert ist nur auf die γ -Komponente der K⁴⁰-Strahlung zurückzuführen, die etwa 11% der gesamten Strahlung des Kaliumisotops ausmacht. Dieses ist wiederum mit 0,01% im Element Kalium enthalten. Durch das 0,5mm dicke Messinggehäuse kann die schwache β -Strahlung jedoch nicht durchdringen.

Ein kommentiertes Video, in dem ich ein Zählrohr der dritten Generation nachbaue, ist auf YouTube verfügbar. Es zeigt einzelne Arbeitsschritte von der Konzeption des Nachbaus bis zur Fertigstellung des Zählrohrs. Primär ist dieses Video für die in Kapitel III beschriebene Fortbildung für Lehrkräfte erstellt worden, aber wurde dann auch einer breiteren Öffentlichkeit auf

YouTube zur Verfügung gestellt²⁸⁷. Die für die Nachbauten angefertigten CAD-Skizzen der drei Zählrohrgenerationen sind in Abbildung 82, Abbildung 83 und Abbildung 84 zu sehen. Eine Fotografie eines Zählrohrnachbaus und dessen einzelnen Bestandteilen findet man in Abbildung 85.

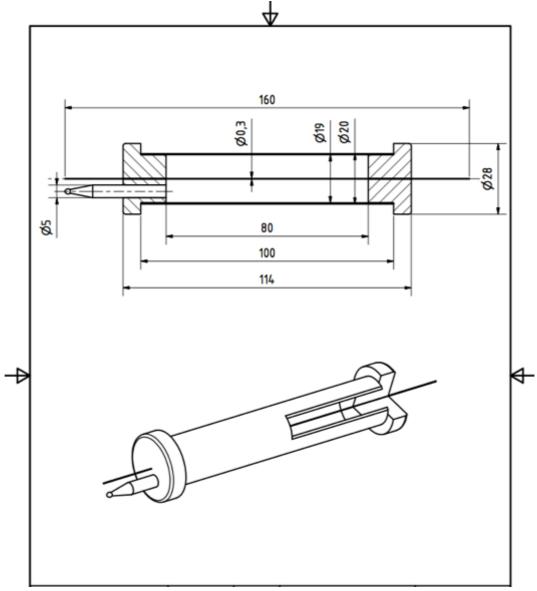


Abbildung 82: CAD-Skizze des Nachbaus des Geiger-Müller Zählrohr Prototypen (1. Generation). Längen- und Größenangaben in mm.

²⁸⁷ Ein großer Dank gebührt Philip Kemper, der mit mir das Video aufgenommen und geschnitten hat. Das Video ist unter dem Link http://youtu.be/UZzVB1TIle0 (letzter Zugriff 22.11.2013) zu finden.

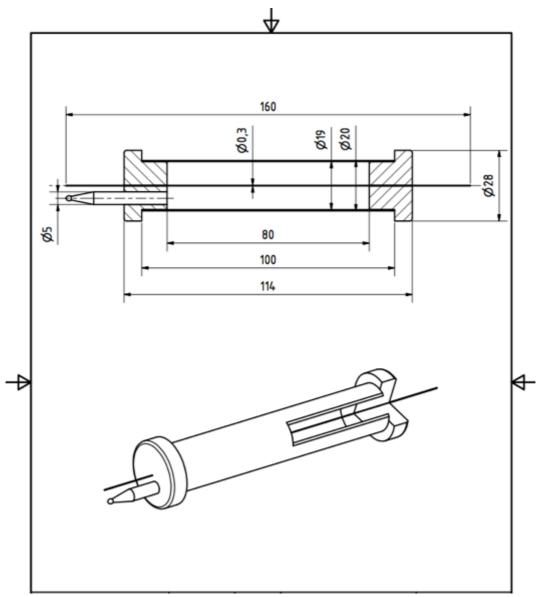


Abbildung 83: CAD-Skizze des Nachbaus des Geiger-Müller Zählrohr Nr. 10 (2. Generation). Längen- und Größenangaben in mm.

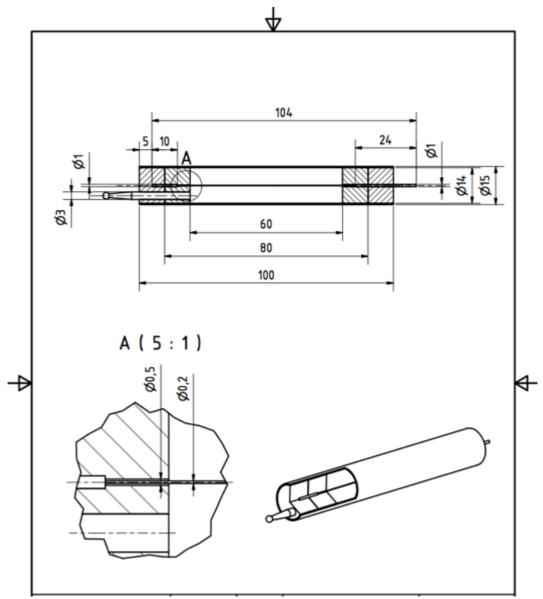


Abbildung 84: CAD-Skizze des Nachbaus des Geiger-Müller Zählrohr Nr. 14-16 (3. Generation). Längen- und Größenangaben in mm.²⁸⁸

²⁸⁸ Ein besonderer Dank gilt Martin Teichmann, der die drei CAD Zeichnungen nach meinen Skizzen für mich angefertigt hat.

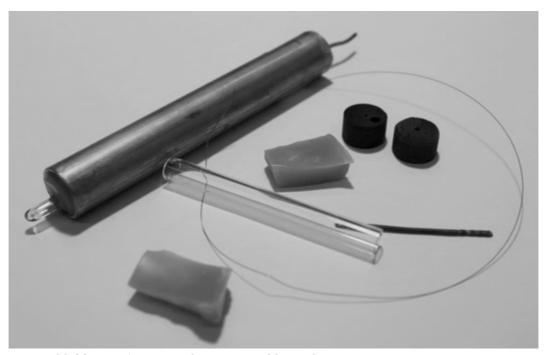


Abbildung 85: Fotografie eines Nachbaus der 3. Generation eines Geiger-Müller Zählrohrs. Zusätzlich sind die Ebonit-Stopfen, eine Glaskapillare, der Zähldraht aus Stahl, der Anschlussdraht aus Kupfer sowie zwei Stücke Klebwachs dargestellt.

6. Interpretationen

If we do not achieve an effect which others formerly achieved, then it must be that in our operations we lack something that produced their success.

(G. Galilei, Il Saggiatore, 1623, zit. nach Drake 1978, 285)

Die Replikationsmethode – Ein Resümee

In dem Vorhaben, ein Instrument möglichst quellengetreu anzufertigen, wird jeder Schritt und jede Entscheidung für oder gegen ein Detail von einer sich induktiv und situativ manifestierenden Frage angeleitet, deren Klärung eine Analyse des experimentellen Kontextes unabdingbar macht. Man kann sich diesem Kontext einerseits durch Schriftstücke annähern. Andererseits müssen diese Zusammenhänge auch mit der praktischen Arbeit im Labor experimentell geprüft werden. Das Verhältnis zwischen diesen historischen Schriftstücken und deren moderner Interpretation durch den Nachbau und Nachvollzug ist aber kein symmetrisches: Bei den mit dem Geiger-Müller Zählrohr assoziierten Laborbüchern, Briefen und dem Artefakt handelt es sich um originäre, historisch authentische Quellen. Der Nachbau des Zählrohrs ist dahingegen in keiner Weise historisch belastbar²⁸⁹. Lediglich die Praxis mit dem Nachbau und das dabei erworbene Handlungswissen erlauben anhand von Rückschlüssen eine Neuinterpretation von genau diesen Aspekten der zu analysierenden Originalsituation. In der Rückschau auf meinen Nachbau des Geiger-Müller Zählrohrs kann ich konstatieren, dass ich durch die Anwendung der Replikationsmethode einen anderen Blick auf das vorhandene Quellenmaterial bekommen habe. Durch die intensive Auseinandersetzung insbesondere mit den Laborbüchern auf Grund der zu leistenden Konstruktionsarbeit habe ich neue Details der Entwicklung identifiziert, die in meinem Fall Trenn in seiner Forschungsarbeit anhand der Laborbücher nicht gesehen hat, obwohl Trenn explizit nach Müllers Anteilen in der Entwicklung gesucht hat und sogar die Möglichkeit der Rücksprache mit Walter Müller selbst in zahlreichen Briefen und persönlichen Treffen hatte. Dies soll Trenns herausragende Arbeit nicht schmälern, sondern ein Indiz dafür liefern, dass die Replikationsmethode auch Erkenntnisse für eine nicht unbedingt experimentell orientierte Wissenschaftsgeschichte liefern kann und bei weitem nicht nur auf die Rekonstruktion von Handlungswissen beschränkt ist, sich aber gerade dort entfalten kann. Um diese These, wonach

²⁸⁹ Damit ist gemeint, dass meine experimentellen Messergebnisse keine direkten Rückschlüsse auf Müllers Ergebnisse von 1928/29 erlauben. Ein weiteres vergleichbares Beispiel ist die Arbeit von Heering (Heering 1998). Trotz einem quellengetreuen Nachbau der Torsionswaage von Coulomb konnten im Nachvollzug nicht die Werte reproduziert werden, die Coulomb veröffentlicht hat. Dieser Umstand kann aber kein Indiz oder gar Beweis dafür sein, dass Coulomb seine Werte auf Grund eines nicht zufriedenstellenden Messinstruments womöglich seiner den Experimenten zu Grunde liegenden Theorie zur elektrostatischen Wechselwirkung nachträglich angepasst hat.

die Replikationsmethode nicht nur Erkenntnisse über Handlungswissen generiert, sondern auch in einem gewissen Sinne einen traditionellen geisteswissenschaftlichen Zugang zu wissenschaftsgeschichtlicher Forschung liefert, möchte ich mit einer Narration aus der Metaperspektive der ersten Konstruktionsphase von meinen Nachbauten versuchen zu illustrieren.

Beim Nachbau der frühen Zählrohre waren insbesondere die Fragen zu den verwendeten Materialien zu klären, deren Antworten bis auf wenige Ausnahmen immer nur die im experimentellen Kontext wahrscheinlichste Option war. Ein Beispiel dafür ist, dass Müller in seinen Laborbüchern und vor allem beim Prototyp des Zählrohrs keine Notizen hinsichtlich der genutzten Materialien gemacht hat. Anhand des Laborbuchs konnte ich zwar den prinzipiellen Aufbau ableiten, aber nur der Vergleich mit seinen zeitlich früheren Experimenten und den späteren Zählrohren erlaubte den auch der Prototyp wahrscheinlich Rückschluss. dass Messinggehäuse und einen Zähldraht aus Stahl konstruiert worden war. Mit der gleichen Herangehensweise fiel dann die Wahl auf eine Vakuumglocke mit Rezipienten, um den erforderlichen Unterdruck herstellen zu können. Die notwendigen Hartgummistopfen zur Zentrierung des Stahldrahts erwiesen sich leichter in der gewünschten Form anfertigen als zunächst von mir erwartet. Von den Randbedingungen her schien das im Laborbuch simpel anmutende Zählrohr so schnell konstruiert. Während die Anfertigung des Gehäuses keinerlei Probleme bereitete, waren sie im Fall des Stahldrahts zunächst nur schwer überwindbar. Auf Grund von Müllers und Geigers insistierenden Äußerungen und physikalischen Erklärungen hinsichtlich der Wichtigkeit der Behandlung des Drahtes in retrospektiven Briefen, dem Handbuch der Physik und auch dem Laborbuch schien die beschriebene Behandlung des Drahtes mit Säure notwendig und unumgänglich für ein funktionsfähiges Zählrohr. Doch war aber weder klar, wie genau diese besondere Behandlung ablaufen musste, noch wie man anschließend feststellen kann, ob diese scheinbar ziellose Vorbehandlung letztendlich erfolgreich war. Mir blieb in diesem Fall nur der Einbau des Drahts in das Zählrohr, um zu schauen, ob das Instrument seinen Dienst tut. Also habe ich die Hartgummistopfen mit einer zentrischen Bohrung versehen und den Draht eingesetzt, aber ohne zu wissen, wie man den Draht hinreichend stark spannen kann. Es war also erneut ein Blick in die Quellen notwendig, der in diesem Fall zunächst mangels Erwähnung zwecklos war. Lediglich das Wort "Wachs' in Müllers Dissertation tauchte bei der Recherche auf. Das brachte mich auf die Idee den Draht mit Wachs an den Stopfen nach dem Ausspannen zu fixieren. Nach einer erneuten Ausdehnung der Recherche auf zeittypische Klebwachse schienen meine Optionen zahlreich, da verschiedene Mischungsverhältnis der Ingredienzien zu ebenso verschiedenen Eigenschaften des Klebwachses führen sollten und noch eine weitere

Möglichkeit in Form des ebenfalls zeitgenössischen Pizein im Raum stand. Da auch hier keine weitere Entscheidungshilfe in den Quellen gefunden werden konnte, musste ich auch hier mehrere Varianten der Wachse herstellen und ihre Tauglichkeit anhand von eigenen Kriterien prüfen. Nachdem der behandelte Draht so fixiert werden konnte, wurde das zusammengesteckte Zählrohr unter der Vakuumglocke in Position gebracht und mit der Hochspannungsquelle sowie der ähnlich intensiv zu recherchierenden und zu konstruierenden Zählschaltung samt Oszilloskop verbunden. Anschließend wurde innerhalb weniger Sekunden der Druck unter der Glocke auf die gewünschten 30mbar reduziert und die Hochspannungsquelle angeschaltet. Statt des fast schon sehnsüchtig erwarteten Knackens in Form eines Spannungspeaks auf dem Oszilloskop, war ein blaues Leuchten zu erkennen. Ein Lichtbogen hatte sich zwischen den Kontakten innerhalb des Rezipienten gebildet. Nachdem dann auch dieses Problem durch aufwendige Gummierung der blanken Kontakte gelöst worden ist und eine nächste Funktionsprüfung initiiert worden war, stellte sich erneut Ernüchterung ein. Außer einem verrauschten Signal war auf dem Oszilloskop nichts zu erkennen. Spätestens hier wurde mir bewusst, dass ich in meiner fast schon naiven Herangehensweise gar nicht die Parameter kannte, die mir einen Rückschluss auf ein funktionstüchtiges Zählrohr lieferten. Da man das Zählrohr als Kondensator auffassen kann, rechnete ich mit einem Oszillogramm, dass einer Entladungskurve ähnelt, wenn radioaktive Strahlung das Zählrohr passiert. Aber vielleicht war die Entladung des Zählrohrs so schnell, dass sie mit dem verwendeten analogen Oszilloskop nicht aufgezeichnet werden konnte? Ein paar Berechnungen später waren diese Bedenken zwar beseitigt, aber dennoch war ich der Antwort auf die vorangestellte, grundsätzliche Frage kein Stück näher. Ich wusste nur, woran das offensichtliche Nicht-Funktionieren nicht liegen kann. Die Optionen schienen endlos. Vielleicht war der Druck innerhalb der Vakuumglocke zu grob eingestellt oder die moderne Spannungsquelle auf Grund der darin genutzten Kaskadenschaltung oder der geringen Leistungsabgabe im Vergleich zu zeitgenössischen Anodenbatterien unzureichend? Oder die Ursache war doch im Draht zu suchen, da ich diesen ja womöglich nicht richtig' vorbehandelt haben könnte. Sukzessive habe ich alle potentiell, fragwürdigen Entscheidungen auf die Probe gestellt und variiert. Bei der dazu nötigen Recherchen sind aber immer neue zu bedenkende Faktoren aufgetaucht: Die Luft innerhalb der Vakuumglocke muss trocken sein, um durch Restfeuchte induzierte Entladungen zu vermeiden. Also habe ich zunächst eine Schale mit dem im Laborbuch erwähnten Trocknungsmittel mit in den Rezipienten gestellt. Aber auch hier war mir mangels Erfahrung vollkommen unklar, wie lange es dauert, bis das Gasvolumen getrocknet war und was mit dieser Restfeuchte passiert, denn der Aufbau war schließlich

luftdicht. Viel drängender war aber die Frage, wie ich überhaupt eine Änderung der Luftfeuchte innerhalb der Vakuumglocke feststellen kann. Der Platz unter der Vakuumglocke wurde immer weniger, als ich meiner ersten Idee folgte, und ein mechanisches Hydrometer neben die Schale mit Trocknungsmittel stellte, in der Hoffnung, dass ein abgesenkter Luftdruck dessen Funktion nicht beeinträchtigt. Die dann anschließend sporadisch auftretenden Peaks auf dem Oszilloskop konnte ich nach anfänglicher Euphorie als einen defekten Kondensator in meiner Zählschaltung identifizieren, der den bis zu 2000 Volt nicht Stand gehalten hatte. Er wurde anschließend durch einen quellengetreu nachgebauten Glimmerkondensator ersetzt. Gleichzeitig habe ich einen Lautsprecher in meine Schaltung eingebaut, auf dessen Beschaltung ich bei Recherchen in Sekundärliteratur gestoßen bin und es knackte. Um zu bestätigen, ob es sich tatsächlich um radioaktive Strahlung als Ursache handelte, habe ich Radium in die Nähe des Zählrohrs gebracht, was tatsächlich zu einer extremen Vervielfachung des Knackens und der Peaks auf dem Oszilloskop führte.

Diese Episode beschreibt meine ersten Erfahrungen mit dem Nachbau des Prototypen und die durch die Replikationsmethode rückgekoppelte Produktion von Fragen an die zur Verfügung stehenden Quellen. Trotz des letztendlichen Erfolgs nahm die Ernüchterung beim Nachbau der weiteren Zählrohre der Generation II und III, die außerhalb einer Vakuumglocke betrieben wurden, deutlich zu. Auch der zunächst funktionierende Nachbau des Prototypen stellte etwa eine Woche nach dem erfolgreichen Betrieb seine Funktion ein. Diese und viele weitere Probleme wurden erst weniger, als mir zwei Dinge durch die experimentelle Arbeit bewusst geworden sind: Zum einen die Nutzung von industriell gefertigtem, hochwertigen Stahldraht, dessen Behandlung mit Säure überhaupt nicht nötig war und zum anderen das Problem der Restfeuchte der Hartgummistopfen, die ich erst am Ende meiner bis dato nicht immer reproduzierbaren Erfolge konsequent getrocknet habe. Erst zu diesem Zeitpunkt, also etwa zwei Jahre nach der Konstruktion des ersten funktionsfähigen Nachbaus und zwischenzeitlicher Resignation auf Grund der Misserfolge, konnte ich Zählrohre so herstellen, dass sie ad hoc funktioniert haben. Die in Abschnitt II.4.2 endgültige und kontinuierliche Fassung der dargestellte Analyse des Laborbuchs habe ich erst nach Abschluss der gesamten Nachbauphase fertiggestellt. An einer Stelle war ich schon fast peinlich berührt, als ich Müllers erste Zusammenfassung seiner Konstruktionsversuche vom Juni 1928 gelesen hatte und das zum wiederholten Male. Die Konstruktionsdetails, die ich mühsam im trial-and-error Verfahren bis dahin identifiziert hatte, reiht Müller schon zwei Monate nach Beginn seiner Arbeit dediziert auf. Meine vorangegangenen Analysen dieser Laborbuchseiten, auf deren Basis die Nachbauten erstellt worden sind, sind offensichtlich unter einer anderen Perspektive geschehen, als dies nach Abschluss meiner experimentellen Arbeit der Fall war. Erst zu diesem Zeitpunkt als mir klar war, auf welche Details und Parameter es beim Bau eines Zählrohrs ankommt, sind mir genau diese Details erst direkt aufgefallen, während ich vorher vermutlich darüber hinweg gelesen hatte. Trotz dieser Selbstzweifel an meinen analytischen Fähigkeiten war ich beruhigt, dass Müllers und meine Rückschlüsse hinsichtlich der zu wählenden Materialien ähnlich waren und meine analytische Unaufmerksamkeit durch die Herangehensweise mit der Replikationsmethode selbst zu begründen scheint.

Bemerkenswert in diesem Kontext ist außerdem die offensichtlich paradoxe Situation, dass es mir sehr leicht fiel, ein 'richtig' funktionierendes Zählrohr anhand des Oszillogramms zu erkennen. Es waren Spannungspeaks mit einer Amplitude von bis zu 10 Volt, deren Anzahl ich über jeweils eine Minute mehrfach bestimmt und auf Konstanz überprüft habe. Ein zweiter Schritt war die qualitative Messung mit Radium, da sich die Anzahl an Spannungspeaks rein visuell auf dem Oszillogramm stark vervielfachen müsste, wenn das Zählrohr meinen Erwartungen gemäß funktioniert. Der dritte und letzte Schritt war die Messung von Kaliumchlorid in unterschiedlichen Mengen. Wenn sich die zugehörige Zählrate in zu Müllers Notizen vergleichbaren Größenordnungen und im Vergleich zur im ersten Schritt von mir bestimmten Nullrate geändert hatte, war ich spätestens hier von der korrekten, quellengetreuen Funktion meiner Nachbauten überzeugt. Erstaunlicherweise konnte ich aber nie in einem ersten Zugriff mit Sicherheit sagen, wann ein Zählrohr definitiv *nicht* funktioniert hat. Geäußert hat sich dies beispielsweise durch einen hohen verrauschten Anteil des Signals auf dem Oszilloskop, aber gleichzeitigem Auftreten der charakteristischen Spannungspeaks. Während ich ein rauschendes Signal als Indiz für ein fehlerhaftes Zählrohr eingestuft hätte, haben mich die Spannungspeaks immer zweifeln lassen. Gleichzeitig habe ich dann oft versucht Fehler in der elektrischen Schaltung zu suchen, um die Entscheidung bzgl. eines missglückten. aber dennoch sehr zeitaufwändig und gewissenhaft konstruierten Zählrohrnachbaus zu vermeiden. Dazu habe ich elektrische Bauteile, wie den Kondensator oder den Lautsprecher entweder entfernt oder ausgetauscht, um ein möglichst einfachen Aufbau zu haben und sogar teilweise viel unwahrscheinlicher erscheinende Optionen, wie eine mögliche, aber geringe Leitfähigkeit des Wachses oder eine an den Klemmstellen des Stahl- und Kupferdrahts auf Grund der unterschiedlichen spezifischen Widerstände abfallende Spannung in Betracht gezogen und mitunter intensiv experimentell geprüft. Retrospektiv würde ich aber behaupten, dass diese Fehlschläge bei der Zählrohrkonstruktion und die von mir generierten Erklärungsmuster trotz vieler Sackgassen sehr wertvoll für die Analyse waren, da ich mir explorativ ein immer elaborierteres Grundgerüst an

Entscheidungskategorien und Handlungswissen konstruiert habe, auf dessen Basis mir letztendlich der erfolgreiche Nachbau der Zählrohre und der Nachvollzug von Müllers Zählrohrentwicklung möglich wurde.

Laborbücher im Spiegel der Replikationsmethode

Im Vergleich zu anderen Studien, die mit der Replikationsmethode gemacht worden sind, hatte ich für meine Analyse praktisch nur Laborbücher und keine hinreichenden Publikationen von Geiger und Müller zur Verfügung. Auf das Artefakt im Smithsonian bin ich dabei eher durch Zufall gestoßen und erst nachdem die Hauptphase des Nachbaus bereits abgeschlossen war. Dennoch lieferte die Analyse des Artefakts wertvolle Hinweise für den zu dem damaligen Zeitpunkt schon fast abgeschlossenen Nachbau der Instrumente, da die Entscheidungen, die ich vor Besuch des Smithsonian für die Konstruktion der Nachbauten der dritten Generation getroffen haben, durch das Artefakt bestätigt worden zu sein schienen. Lediglich der Aspekt des Bariumsulfats in der Dichtung hat vor der Analyse gar keine und danach nur ein kleine Rolle gespielt, da ein Nachbau der Dichtung erfolglos geblieben ist. Panusch (2012) hat sich bei der Rekonstruktion des Millikan'schen Experiments vorwiegend an einem Artefakt des Öltröpfchenapparates orientiert, was daher sehr strukturierend für seine Arbeit ist. Millikans Laborbücher spielen dort eine viel kleinere Rolle. Bei den zahlreichen anderen Studien, die mit Hilfe der Replikationsmethode angefertigt worden sind, sind die Quellen für den Nachbau in der Regel Artefakte oder Veröffentlichungen gewesen. Eine weitere Eigenart meiner Arbeit ist, dass es ein aus heutiger Sicht wichtiges Experiment, wie es zum Beispiel Panusch (2012), Nawrath (2010a), Frercks (2001) u.a. nachvollzogen und analysiert haben, in vergleichbarer Form mit frühen Zählrohren nicht gab, jedenfalls nicht zur Kieler Zeit bis Ende 1929. Ich habe aber nicht nur ein Instrument und die Praxis damit rekonstruiert, sondern eine Reihe von Instrumenten mit dem Ziel des Nachvollzugs der Entwicklung desselbigen, die sich in der historischen Situation über einen begrenzten Zeitraum abgespielt hat. Dessen experimentelle und apparative Komplexität hinsichtlich der Anwendung des Zählrohrs im Kontext der sich gerade konstituierenden Höhenstrahlungsforschung konnte mit meiner Analyse nachvollzogen werden.

Zieht man den Kreis der wissenschaftshistorisch Forschenden größer, so ist die Replikationsmethode nicht die einzige Methode der Wissenschaftsgeschichtsschreibung, die sich Laborbüchern bedient. Holmes et al. schreiben in der Einleitung für einer explizit den Forschungsergebnissen zu Laborbüchern gewidmeten Anthologie:

The paper, the protocol, and the notes – whether casually or systematically recorded – are still integral to a materially mediated environment where the subjectivity of the scientist gives free play to its innovative potential. (Holmes et al. 2003a, viii)

Aber gerade ein wie in dem zitierten Band stets 'traditioneller', rein geisteswissenschaftlicher Zugang zu einer gleichzeitig explizit durch Materialität geprägten Forschungsumgebung kann in meinem Verständnis nur an der Oberfläche von dem kratzen, was ein Laborbuch an Entfaltungsmöglichkeiten für die wissenschaftshistorische Forschung durch einen ergänzenden experimentellen Ansatz bietet. Denn gerade durch den Aspekt der zeit-, personen- und objektgebunden Handlungspraxis, die eben nur indirekt in Laborbüchern fassbar und nur experimentell als eine Annäherung rekonstruierbar ist, erhalten historischer Kontext, Experiment, Instrument und Protagonist ein viel breiteres Spektrum an analytischem Potential, als dies durch eine alleinige 'Inhaltsanalyse' von Laborbüchern je möglich wäre.

Das Zählrohr Artefakt im Smithsonian

Beim Nachbau des Geiger-Müller Zählrohrs bzw. dem Nachvollzug von dessen Entwicklung die Erprobung der verschiedenen war Dichtungsmaterialien notwendig. Weil sie in den Originalquellen nicht ausreichend dokumentiert waren, wurde es erforderlich, die Suche auf zusätzliche Publikationen im experimentellen Kontext von Müller auszudehnen. Dadurch ergaben sich mehrere Möglichkeiten, deren Angemessenheit geprüft und die gegeneinander abgewogen werden mussten. Der Vergleich mit Zählrohr Nr. 16 im Smithsonian zeigt aber auch, dass dieser Weg des Nachbaus eine andere Richtung eingeschlagen hat als der Werdegang des vermeintlichen Originals mit einer fremdartigen Dichtung. Diese Diskrepanz gibt jedoch Anlass die Authentizität des Zählrohrs in der Smithsonian Institution anzuzweifeln und wirft erneut Fragen in Bezug auf das Instrument, die Quellen und die Methode auf. Für Schaffer ([1985] 2011) und Sichau (2000, 2002) bleibt es deshalb fraglich, ob ein Instrument nach Wartungen und Justierungen immer das gleiche Gerät bleibt. Dies tangiert unweigerlich die Frage nach dem "Original" eines Instruments und Experiments. Dass es einen solchen ursprünglichen und zeitlosen Status oder Zustand eines Instruments nicht geben kann, hat verschiedenste epistemologische und vor allen Dingen praktische Gründe. Letztere werden vor allen dadurch nachvollziehbar, weil Instrumente in der Regel Gebrauchsgegenstände waren und sie allein schon auf Grund von Alterungsprozessen und Instandhaltung, ständigen Wartungsarbeiten, Änderungen oder auch Anpassungen an neue Experimentalaufbauten unterworfen sind (vgl. Sichau 2002, 8). Neben der Schwierigkeit in den über 100 verschiedenen Zählrohren aus der Werkstatt von Geiger und Müller das

Original zu identifizieren, ist der Apparat, den Robert Millikan zur Bestimmung der Elementarladung nutzte, ein weiteres exemplarisches Beispiel. Panusch (2012) zeigt anhand der zugehörigen Publikationen und den beiden noch vorhandenen Relikten in Pasadena und Chicago, dass es sogar bei diesem vermeintlich großen Experimentalaufbau mehrere distinkt unterschiedliche Versionen des zentralen Öltröpfchenapparats gegeben hat und nicht nur das Original, mit dem alle Messungen durchgeführt wurde und dass schließlich seinen Weg in eine Glasvitrine im Museum of Science and *Industry* in Chicago gefunden hat²⁹⁰. Um Müllers gespendetes Zählrohr könnte man eine ähnliche Geschichte konstruieren²⁹¹, aber allein schon die Abwägung möglicher und wahrscheinlicher Abläufe lenkt den Blickwinkel damit auf die Akteure und ihren Umgang mit ihren Apparaturen und Experimenten. Damit stellt sich die Frage, ob der Status von Instrumenten, z.B. deren Datierung, auch nach etwaigen Materialänderungen, die, wie im Nachbau eines dedizierten Zählrohrs, wie Nr. 16, das Funktionsprinzip nicht direkt beeinträchtigen, aufrecht erhalten werden kann.

Die elektrische Zählung unter epistemologischen Gesichtspunkten

Die Analyse mit der Replikationsmethode liefert allerdings auch Antworten auf epistemologische Fragen. Die Auswertung der zur Verfügung stehenden primären Quellen zeigt, dass das Geiger-Müller Zählrohr selbst im Vergleich zu seinen Vorgängern keinen wesentlichen technischen Fortschritt darstellt. Es war der Ionisationskammer von Rutherford und Geiger von 1908, dem Halbkugelzähler von 1912 oder auch dem Spitzenzähler von 1913 höchstens ebenbürtig und das nicht nur im technischen Sinne, sondern auch in Bezug auf das notwendige und detaillierte Handlungswissen, welches zum Umgang mit ihm notwendig war. Die Indizien dafür sind in den Abschnitten II.3 und II.4 dargelegt worden und reichen von einer kleinen Notiz über natürlich auftretende Störungen beim Zählbetrieb im Artikel über die Ionisationskammer von Rutherford und Geiger 1908, über einen aus nicht näher klärbaren Gründen missglückten Nachbau des Kugelzählers von 1912 durch Geiger in Berlin und über Hess' und Lawsons Kugelzähler von 1916 und Myssowskys und Nesturchs Angriff 1914 auf die Ionisationskammer von

²⁹⁰ Aus dieser Perspektive heraus ist das Adjektiv 'originalgetreu' im Kontext der Replikationsmethode stets zu vermeiden und durch 'quellengetreu' zu ersetzen. Der Bezug auf Primärquellen, die einem Instrument oder Experiment zu Grunde liegen, ist in diesem Kontext und der Zielsetzung der Replikationsmethode weitaus angemessener.

²⁹¹ Ich finde es erstaunlich, dass Müller Anfang der 1970iger überhaupt noch ein Zählrohr aus seiner Kieler Zeit besessen hat. Der Verdacht liegt aber nahe, dass Zählrohr Nr. 16 im Vergleich zu seinen 2 baugleichen Pendants nicht einwandfrei funktioniert hatte und daher nicht für Messungen genutzt werden, da eben diese nicht in den Laborbüchern dokumentiert wurden. Nach Müllers Bruch mit Geiger hat er dieses defekte Zählrohr daher vermutlich als Andenken behalten bis er es dem Smithsonian spendete, wo es nun im Archiv aufbewahrt wird.

1908, bis hin zum lange Zeit kanonischen Spitzenzähler und zum Geiger-Müller Zählrohr. Gerade bei den letzten vier Zählern wird deutlich, dass alle damit verbundenen Protagonisten in Publikationen und persönlicher Korrespondenz apparative Probleme beim Umgang mit diesen Instrumenten hatten oder gerade stille, nicht kommunizierbare Aspekte der Handhabung der jeweiligen Instrumente als Grund für experimentelle Erfolge oder auch die Zurückweisung von Kritik (vgl. Abschnitt II.4.6) angaben. Während Hess und Lawson sogar noch versuchten im zugehörigen Artikel diese Schwierigkeiten durch die Formulierung von vielen Handlungsanweisungen zu reduzieren, wurde dies jedoch im Fall von Spitzenzähler und Geiger-Müller Zählrohr weitestgehend unterlassen. Lediglich Curtiss' Artikel über die Verbesserung der Zähleigenschaften des Spitzenzählers durch die Säurebehandlung, den Müller als Initialzündung für die Entwicklung des Zählrohrs charakterisierte, kann man in ähnlicher Weise interpretieren. Der Spitzenzähler stellt auf Grund von Bothes, Geigers und Meitners Einschätzungen bezüglich des schwierigen Umgangs damit den Zenit der notwendigen 'Experimentierkunst' (vgl. Abschnitt II.4.8) dar. Der Umgang mit dem Geiger-Müller Zählrohr war meiner Einschätzung nach auf jeden Fall für Dritte nicht anspruchsvoller als der mit dessen Vorgängern. Dieser vorgenommene Vergleich des Handlungswissens bedingt aber eben der interinstrumentellen Vergleichbarkeit. Obendrein habe ich implizites Wissen, dass ich selber beim Umgang mit den Zählrohrnachbauten erworben habe, mit von Dritten in Publikationen und Briefen deklariertem Wissen über zum Teil auch die anderen Zähler, verglichen. Meiner Auffassung nach ist dieses Vorgehen jedoch statthaft, da sich die Instrumente einerseits technisch sehr ähneln und sie jeweils im gleichen Kontext der physikalischen Forschung benutzt wurden. Zweitens passiert mein Vergleich für den Leser dieser Passagen erst nachdem ich mein implizites Handlungswissen ebenfalls in der vorliegenden Analyse expliziert habe.

technischen Ebene sind die zu Grunde liegenden Funktionsprinzipien der Zähler (vgl. Abschnitte I.2 und II.4.5) sich untereinander recht ähnlich. Sogar Müller selbst konstatierte, dass zumindest Myssowsky und Nesturch 1914 durch ihren Nachbau der Ionisationskammer von 1908 unbewusst eine als Geiger-Müller Zählrohr funktionierende Ionisationskammer konstruiert hatten. Einen deutlichen technischen Unterschied dieser drei Zähler kann man kann man aus der heutigen Perspektive ebenfalls nicht feststellen. Der Fortschritt des Zählrohrs von 1928 war daher eher argumentativer Natur: Geigers und Müllers Leistung war es, ein etabliertes Artefakt einer komplizierten Messmethode in ein tatsächliches Zählereignis umzudeuten und den Messprozess mit diesem elektrischen Nachweisgerät für radioaktive Strahlung durch seine baulichen Änderungen so weit zu stabilisieren, dass reproduzierbare Ergebnisse mit dem neuen Instrument möglich wurden. Die Bedeutung der Steigerung der Zählraten durch die Verwendung des Zählwerks wird deutlicher, wenn auch hier der Kontext der Radioaktivitätsmessung miteinbezogen wird. Die zur fraglichen Zeit etablierten Methoden basierten auf dem Spitzenzähler und der manuellen Zählung von Szintillationen. Beide waren in ihrer Empfindlichkeit für radioaktive Strahlung stark begrenzt, was vor allen Dingen die Messung von Radium erschwerte. Die Vielzahl von Impulsen, die mit diesem Präparat von einem Spitzenzähler registriert wurden, konnten nur auf einem schnell laufenden Papierstreifen automatisch notiert werden und nicht mehr visuell über die Zählung der Ausschläge an einem Fadenelektrometer. Genau das Gegenteil war bei Höhenstrahlungsmessungen der Fall. Die 400 und mehr Zählereignisse, die für einen trennscharfen Messwert einer einzigen Messung notwendig sind, konnten auf Grund der notwendigen Blei- und Eisenabschirmung nur in minuten- bis stundenlangen Messungen erzielt werden. Bezieht man Koinzidenzmessungen mit zwei oder drei Zählrohren in diese Überlegungen mit ein, wird der zeitliche Aufwand noch größer. Hier mussten mehrere synchron aufgenommene Papierstreifen per Hand ausgewertet werden. Die manuellen Messungen mit dem Zählrohr bedurften also entweder schwach radioaktive Substanzen, sehr geringe Mengen, hoher Abschirmung der selbigen oder einen hohen Zeitaufwand bei der Analyse und Interpretation der Messstreifen bzw. der Messung von Höhenstrahlung. Doch gerade dieser menschliche Einfluss auf die Messung war ein ausschlaggebendes Moment für die Akzeptanz einer Messung von Seiten Dritter.

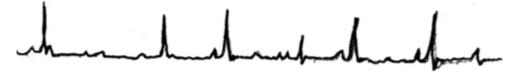


Abbildung 86: Nachbildung eines Streifens mit registrierten Ausschlägen eines Messschreibers.

Jeff Hughes beschreibt 1993 in seiner Dissertation, das gerade solche Zweifel an der Objektivität der in Cambridge immer noch praktizierten Szintillationsmethode einen Disput zwischen Rutherfords Labor und dem Radiuminstitut in Wien unter Stefan Meyer ausgelöst hatte. Der epistemologische Schritt zwischen optischer und elektrischer Registrierung scheint auf Grund der erst Mitte der 1910er Jahre aufkommenden Verstärkertechnik schon groß. Aus heutiger Perspektive ist der Wechsel von der 'händischen' Auszählung hin zur automatischen Aufsummierung zwar experimentell notwendig und nachvollziehbar, aber erkenntnistheoretisch schwierig. Bei der Verwendung des mechanischen Zählwerks wird der subjektive, menschliche Einfluss mittels der elektrischen Schaltung kaschiert.

Müllers Zählmaschine besaß laut seinen Aufzeichnungen anstelle des Schreibers ein elektromagnetisches Relais, welches vermutlich über ein Walzenzählwerk alle Impulse automatisch addierte. Die Aufgaben des Experimentators reduzierten sich also weiter durch den Wegfall der Auswertung und bestanden fortan nur noch im Einrichten der Apparatur und dem späteren Ablesen des Wertes. Es gibt also insgesamt zwei Stadien in der weiteren Entwicklung des Zählrohrs, bei denen ein subjektiver Einfluss auf das Ergebnis eliminiert werden sollte: Von der visuellen, aber sehr fehleranfälligen Beobachtung des Elektrometerfadens aus der Tradition der Szintillationszählung hin zur Produktion und Auswertung der Papierstreifen, die auf Basis der jeweiligen Messschaltung alle Zählereignisse registrieren sollten und von den Papierstreifen zum addierenden Zählwerk. Der langwierige manuelle Auswertungsprozess zu Gunsten der scheinbaren Objektivität entfiel dabei aber zu Lasten des direkten Einflusses auf die Glaubwürdigkeit der Messwerte. Zumindest der interpretatorische Akt der Analyse der Messstreifen durch einen erfahrenen Experimentator wurde mit dem Einsatz eines elektromagnetischen Relais' und durch die Parameter der Röhrenschaltung übernommen. Die Entscheidung, ob eine Spitze auf dem Messstreifen ein Artefakt des Hintergrundrauschens der Schaltung war oder als Zählereignis gewertet werden sollte, wurde nun durch den eingestellten Arbeitspunkt der Röhre bestimmt. Ob das Zählwerk daher wirklich die Teilchen zählte, die das Zählrohr registriert hatte oder ob nicht weitere Messereignisse dabei unberücksichtigt blieben respektive gar als Artefakte das Ergebnis verfälschten, hätte einen Grund zum Zweifeln an dieser Methode abgeben können. Auch Hughes stellt 1998 die Bedeutung der Röhrenverstärkung für den Erfolg der elektrischen Zählmethoden deutlich heraus:

Now, however, they [the experimentalists in nuclear physics, SK] were also able to draw on the products of the booming 1920s radio industry and the highly developed skills of wireless enthusiasts within the laboratory to construct valve amplifiers and electronic circuits that allowed the rapid development of fast, reliable electronic counting devices. These quickly became embedded in laboratory practice, so that by the early 1930s, state-of-the-art nuclear physics laboratories were almost completely reliant upon Geiger counters, ionization chambers, valve amplifiers, counting circuits and other pieces of electronic hardware. (Hughes 1998, 62)

Er betont jedoch auch die erkenntnistheoretischen Schwierigkeiten, die mit der Einführung der Verstärkertechnik einhergingen:

The experimental trials of the valve amplifier revealed further difficulties that would have to be overcome if the technique were to be of any value in quantitative work, and the laboratory environment required considerable manipulation to provide conditions under which the apparatus would behave reliably and consistently. [...] Though it raised different sorts of operational problems – the need for insulation from disturbance, special films, mechanical counters and the rest – the valve method was clearly no less elaborate than the scintillation technique. (Hughes 1998, 73)

Das Instrument alleine konnte also in diesem Kontext nicht die Glaubwürdigkeit der Ergebnisse stützen. Die vergleichbare, aber erheblich aufwendigere, Messung über die Zählung von Szintillationen auf Zinksulfid war ebenfalls schon Jahre vorher eine etablierte Methode, obwohl der subjektive Charakter ähnliche Zweifel hätte schüren können. Beide Methoden haben ihren Status daher vielmehr ihren Entwicklern und Protagonisten zu verdanken, als objektiven und technischen Gütekriterien. Hans Geiger als von vielen Seiten gelobter, talentierter und sorgfältiger Experimentator, hat so seinen publizierten Ergebnissen ihre Reliabilität verliehen. Jeff Hughes hatte bereits Ähnliches über die Debatte zwischen Cambridge und Wien über die Reliabilität von verschiedenen Szintillations-Zählmethoden festgestellt:

As with the parallel controversy between Ellis and Meitner, it was becoming increasingly clear that the debate was no longer about results – data, hypothesis, theory. It had become an explicit dispute about experimental and observational techniques, involving issues of competence, credibility, trust and authority. (Hughes 1993, Kap. 3, Abschnitt 3.5)

Abstraktion der Messung

Die vertrauten und traditionellen Messgrößen der Physik, wie die Zeit, die Masse oder auch die Temperatur werden jeweils durch Vergleich mit einer Normgröße bestimmt und nicht einzeln quantitativ gezählt. So war auch der eigentliche Zweck der elektrischen Zählmethoden im Kontext der Radioaktivität eher die Bestimmung der Elementarladung durch Messung von Ionisationsströmen. Wie jeder Lichtblitz bei Szintillationszählungen mit dem bloßen Auge die Wechselwirkung des Zinksulfids mit einem α-Teilchen quasi belegte, wurde jeder Spannungsabfall im Zählrohr und das hörbare Knacken zum Sinnbild für den radioaktiven Zerfall eines Teilchens, Die statistischen Methoden der Thermodynamik migrierten nun auch in andere Teilgebiete der Physik. Der radioaktive Zerfall war aber im Gegensatz zur Thermodynamik offensichtlich keinen kausalen Zusammenhängen unterworfen und somit nicht deterministisch. Die Wahrscheinlichkeit eines Zerfalls eines Atomkerns war und ist unabhängig von äußeren Einflüssen. Dies führte zu der Erkenntnis, dass die Schwankungen, die bei jeder Messung auftraten, nicht auf systematische Messfehler zurückzuführen waren, sondern auf die Natur des radioaktiven Zerfalls selbst. Den Gedanken an einen "wahren" Wert einer solchen Messung musste man zu Gunsten des ,wahrscheinlichsten' Wertes aufgeben (vgl. Abele 2002, 55ff.)²⁹². Kurz vor Geigers Tod vertrat Bothe in seiner programmatischen Monographie Der Physiker und sein Werkzeug die Auffassung, dass unter anderem das Zählrohr den Übergang von messender zur zählender Physik mit eingeleitet und so

²⁹² Für eine umfangreiche und detaillierte wissenschaftshistorische, genetisch-didaktische Analyse verschiedener Fehlerkonzepte siehe Heinicke 2012.

den experimentellen Grundstein der Physik des 20. Jahrhunderts gelegt habe (Bothe 1944, 17)²⁹³.

Hierarchie, Laborpraxis und Urheberschaft

Desweiteren kann man rein aus der Laborbuchanalyse schließen, dass die experimentelle Entwicklungsarbeit, aus der schließlich das Geiger-Müller-Zählrohr hervorging, hauptsächlich von Müller geleistet wurde. Geigers vermutlich viel geringerer experimenteller Anteil lässt sich nur aus Berichten von Müllers und Geigers sporadischen Einträgen in das sechste gemeinschaftliche Laborbuch rekonstruieren. Erschöpfend kann diese Einschätzung jedoch nicht sein, da Geigers intensive experimentelle Arbeit vor seiner Kieler Zeit die Vermutung zulässt, dass er seiner früheren praktischen Labortätigkeit auch nach seiner Berufung als ordentlicher Professor und Institutsdirektor und trotz den damit verbundenen verwaltungstechnischen Aufgaben und Lehrverpflichtungen weiter nachgegangen ist. Zeugnisse darüber in Form von Primärquellen sind aber aus den geschilderten Gründen nicht mehr auffindbar. Verlässt man sich auf die Berichte Dritter, so schreibt nur Müller retrospektiv etwas über Geigers

²⁹³ Einem möglichen Paradigmenwechsel im Sinne von Thomas S. Kuhn kommt diese Behauptung von Bothe zwar nah, aber trifft nicht gänzlich zu. Es sind fast alle von Kuhn formulierten Voraussetzung (Kuhn 2012) erfüllt, jedoch hatte die von Geiger und Müller vorgenommene Umdeutung retrospektiv gesehen keinen so großen 'impact', wie beispielsweise der Wechsel vom ptolemäischen zum kopernikanische Weltbild, von der Kinematik nach Aristoteles zur sogenannten klassischen Mechanik nach Newton und wiederum auch dessen Bearbeitung bzw. relativistische Anpassung durch Einstein. Eine durchaus berechtigte und noch zu erörternde Frage wäre allerdings, ob hier nicht ein Wechsel des Experimentierstils als markante Änderung von "gerichtete[m] Arbeiten mit einer zweckorientiert entwickelten Apparatur unter entsprechendem gedanklichen und sachlichen Verarbeiten des hierbei Produzierten" nach Peter Heering (2007, 364) vorliegt. Der Zähler von 1908 war insofern zweckorientiert, als dass er hinreichend klein dimensioniert war, um die nicht erklärbaren Spannungsimpulse auf ein Minimum zu reduzieren. Müller selbst gab an, dass "sich ein ordentlicher Mensch nicht [damit] abgab, denn er stellte zuerst saubere Versuchsbedingungen her, bei denen so etwas nicht vorkam." (Müller an Wildhagen, 10.05.1957, S.5, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30) Trotz dieser etablierten Vermeidungsstrategie waren die von Geiger und Müller umgedeuteten Zählereignisse dann ab 1928 gerade im Zentrum der experimentellen Untersuchung. Mit dem Bau des "Riesenzählrohrs 11' wurde gar ein Zählrohr entwickelt, dass auf Grund seiner großen Oberfläche besonders gut dafür geeignet war, die vormals als Artefakte abgetanen Zählereignisse zu registrieren, obwohl das Konzept der erdnahen Auswirkung der Höhenstrahlung als Ursache noch nicht bestätigt worden war. War bei Ionisationskammern noch der genaue Wert der durch ionisierende Strahlung produzierten Ströme von Interesse, so wurden spätestens beim Geiger-Müller Zählrohr nur noch die Anzahl der messbaren Stromimpulse durch den Experimentator gezählt. Für diesen Zweck wurden dann Zählmaschinen entwickelt, die auf Grundlage einer Röhrenschaltung selbstständig ohne die Notwendigkeit der manuellen Zählung alle Impulse aufaddierten. Der Stil des Experimentierens hat sich daher spätestens nach dem kommerziellen Vertrieb des Zählrohrs ab 1929 im weitesten Sinne und auf mehreren Ebenen geändert. Ob dies auch für eine Postulierung eines Experimentierstilwechsels im engeren Sinne ausreicht, müsste an anderer Stelle geklärt werden.

experimentelle Arbeit in Kiel. Seine zeitgenössischen Berichte in Form der Briefe an seine Eltern stellen Geiger eher als Kopf eines hierarchisch strukturierten Laboratoriums dar. Aus Müllers Sicht stammte Geigers Einstellung zum Wert wissenschaftlicher Arbeit und Leistung aus einer Zeit, in der experimentelle Arbeiten eher als notwendiges Beiwerk für die Bestätigung von Hypothesen benötigt wurden. Die wahre Leistung eines Wissenschaftlers bestünde jedoch darin, so Müller mit wohl zynischem Tonfall, Experimente und Thesen zu entwickeln und sie nicht selbst durchzuführen. Müller schreibt weiter dazu an Wildhagen:

1½ Jahre spaeter [nach April 1928, SK] verliess ich dann den Universitaetsbetrieb aus Protest gegen die damals verbreitete Ansicht, man muesse etwa 10 Jahre lang unterbezahlt, gegaengelt und ausgebeutet werden, bevor man es zu etwas bringen koennte. [...] Wieder andere glauben, dass man jedes geistige Eigentum aufzugeben hat, wenn man nicht bei der Universitaet bleibt, die ja die einzige Quelle des wissenschaftlichen Fortschritts ist. Und dann sind da die gelegentlich in Hochschule und Industrie anzutreffenden Autokraten, deren Standpunkt etwa (in ihrem eigenen Jargon) wie folgt, lautet: "Es ist juengeren Herren mit weniger als 10 tadelsfreien Dienstjahren nicht gestattet, eigene Gedanken zu haben oder ihnen nachzugehen. Bei Zuwiderhandlung uebernimmt der Chef oder zustaendige vorgesetzte Sachbearbeiter den Fall, denn er ist aufgrund seiner Leistung allein befaehigt und befugt, neue Gedanken auszuwerten." Diese Leute anerkennen [sic] selbstverstaendlich nur ein Geiger-Zaehlrohr [sic]. ²⁹⁴

Insofern war es für Müller erstaunlich, dass Geiger mit der Nennung von Müller in den Publikation oder der späteren Bezeichnung 'Geiger-Müller-Zählrohr' einverstanden war. Dennoch schreibt Müller später an Wildhagen und Trenn, dass er kein Mitspracherecht am Inhalt dieser Artikel gehabt habe. Eine ähnliche Trennung in konzeptionelle und experimentelle Arbeit herrschte zwischen Geiger und Rutherford, aber hier mit getauschten Rollen. Hier war Geiger die sichtbare, helfende Hand, wenngleich Rutherford auch selber noch viel experimentierte. Geiger schrieb später in seinen teilweise veröffentlichten Memoiren:

So entstand eine für mich so förderliche Gemeinschaftsarbeit durch viele Jahre hindurch. Während ich das Experimentieren übernahm, bereicherte Rutherford die Arbeiten mit seinen Gedanken und gab ihnen die äußere Form. Es galt ihm als selbstverständlich, daß ich in allen Publikationen meinen Namen neben den seinen setzen durfte. (Geiger 1937 über seinen Englandaufenthalt an A. Sommerfeld, zit. nach Westrich 1982, 12)

Rutherfords Einstellung zum Experimentieren beschreibt Hughes (2008) anhand eines Interviews mit Rutherfords Laborleiter William Kay [K.]²⁹⁵ in Manchester durch Samuel Devons [D.]. Kay erwähnt diesbezüglich:

[K.] "He'd [Rutherford, SK] try a rough experiment himself on the little things, d'you see, and then he'd turn it over on to somebody and they'd get quite a nice theory about

 $^{^{294}}$ vgl. Müller an Wildhagen, 05.06.1963, S.1f, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{295}}$ Kay war dort von 1908 bis 1946 angestellt, also auch zu der Zeit, als Geiger in Manchester bei Rutherford tätig war.

it you see, \dots quite amazed! And then he would always \dots he never put his name in conjunction with that paper, you know. $[\dots]$

[D.] "But he used to enjoy the experiments didn't he?"

[K.] "Oh, yes, I think he liked experiments much better than sitting at home working. Because any little experiment even elementary experiments, that was working at that time, he used to love it, you see,... love it." (Hughes 2008, 103f.)

Kay beschreibt Rutherford weiter als einen zielstrebigen, aber auch ungeduldigen Experimentator und Lehrer, der sowohl für die zu Grunde liegenden theoretischen Überlegungen als auch für deren praktische Umsetzung gleichermaßen fähig war. Geiger war Rutherford direkt unterstellt und beaufsichtigte die zahlreichen Doktoranden, die bei Rutherford forschten. Bezüglich der Autorenschaft für wissenschaftliche Artikel kann man am Beispiel von James Nutall und Ernest Marsden Ähnlichkeiten zu Rutherfords Praxis feststellen. Hier trat Geiger bereits als Vorgesetzter auf und führte beide als Mitautoren der untersuchten und publizierten Regelhaftigkeiten für α -Strahlung (Geiger & Marsden 1909, 1913 und Geiger & Nutall 1912a, 1912b). Gleiches galt auch in Tübingen und Berlin für Geigers zahlreiche Doktoranden, darunter Otto Haxel (1909-1998), Max Pollermann und Helmut Volz (1911-1978). Sie publizieren entweder alleine oder unter zusätzlicher Nennung von Geiger. Rutherford scheint hier als eine Art Rollenvorbild zu fungieren. Neben seinen Experimenten bei Rutherford und später in Berlin ist auch seine spätere Beteiligung an Zählrohr-Experimenten ab September 1928 durch das gemeinschaftliche Laborbuch dokumentiert, wenngleich auch ein Großteil der experimentellen Arbeit von seinen Assistenten und Doktoranden übernommen wurde²⁹⁶. Denn ausnahmslos alle im Zusammenhang mit dem Geiger-Müller Zählrohr publizierten Skizzen, Graphen und experimentellen Daten sind nur in Müllers Laborbüchern zu finden (siehe Abschnitt II.4.4). Dies bedeutet, dass Geiger die Arbeit seiner experimentell arbeitenden Assistenten schätzte und ihnen nicht mindere Wertschätzung durch die Publikation der Ergebnisse hat zukommen lassen, aber dies im Gegensatz zu Geigers späterem Labormechaniker Speidel in Tübingen. Dessen handwerkliche Arbeit hat Geiger zwar hoch geschätzt und in diversen Briefen gegenüber Dritten ausdrücklich gewürdigt (z.B. Geiger an Gerlach, zit. nach Abele 2002, 49), aber nur Geigers Assistenten und Doktoranden Nutall, Marsden, Müller, Volz, Haxel und andere werden zu sichtbaren Figuren für die Fachwissenschaft²⁹⁷. Der Status von Labormechanikern scheint also in diesem Beispiel immer

²⁹⁶ In Tübingen und später an der TH Berlin-Charlottenburg schränkte Geiger seine experimentelle Arbeit immer mehr ein. Dies ist aber durch veränderte Rahmenbedingungen, wie sein beginnendes chronisches Rheumaleiden, hohe Lehrbelastung und viele Verwaltungstätigkeiten (vgl. Swinne 1988, 81ff.) und nicht durch einen Einstellungswechsel zu erklären.

 $^{^{\}rm 297}$ siehe auch Hentschel 2008, darin insbesondere die Essays von K. Hentschel und S. Shapin.

noch dem des 17. Jahrhunderts zu entsprechen (vgl. Shapin 1989): Unverzichtbar für die tägliche Laborroutine, aber qua Status und für die Publikation Oualifikation obsolet von wissenschaftlichen Erkenntnissen. Anhand dieser Strukturen lassen sich mindestens vier distinkt unterschiedliche Statusgruppen in Rutherfords Labor in Manchester bzw. auch in Geigers Labor in Kiel ausmachen: Der Arbeitsgruppenleiter, dessen schon promovierte Assistenten, dann die Doktoranden und Diplomanden sowie die Labortechniker. Hinsichtlich der Nennung in Publikationen und der öffentlichen Wertschätzung der schwer ersetzlichen Arbeit spricht Hentschel (2008, 12) von einem Gewohnheitsrecht der Autorenschaft in zweierlei Hinsicht: Die gezielte Nennung von Personen, die gar nicht an der Erstellung der Publikation beteiligt waren, wie Arbeitsgruppenleiter oder die explizite ,Verheimlichung' von Mitarbeitern, wie Labortechniker, Instrumentenmacher u.a., die scheinbar nur marginal an der experimentellen Arbeit, die einer Publikation in der Experimentalphysik in der Regel zu Grunde liegen, beteiligt waren. Aus der Perspektive eines Historikers, der an der Genese und Entwicklung von Wissenschaftspraxis interessiert ist, sind beide Traditionen im Fall von Geiger und Müller Möchte man Terry Shinns (1988) Klassifikation Sozialstrukturen im Labor nutzen, so würde es sich um eine mechanistische Struktur mit einer starren Status-Differenzierung handeln, die durch Bottom-Up Berichterstattung und Top-Down Anweisungen anhand der aufgezeigten Statusgruppen funktioniert. Während Geiger diese Rollenverteilung wohl eher als förderlich, fruchtbar und nachahmenswert angesehen hat, war Müller damit nicht einverstanden. 1956 schreibt er an Wildhagen:

Ich selbst habe von der Entdeckung des Zählrohres kaum etwas außer schäbigstem Neid gehabt. [...] Im Sturm meiner 22 Jahre wollte ich das Zählrohr auf alle die Gebiete anwenden, auf denen sich später die Physiker reihenweise mit Hilfe des Zählrohres ihre Nobelpreise holten. Geiger beschränkte mich auf Untersuchungen am eigentlichen Zählrohr, also Messungen von Drucken, Spannungen und allen möglichen mir höchst uninteressant und langweilig erscheinenden Dingen.²⁹⁸

²⁹⁸ Müller an Wildhagen, 10.05.1957, Deutsches Museum Archiv München, S. 6f, NL24 11/26. Einen Nobelpreis im Zusammenhang mit dem Zählrohr bekam James Chadwick (1891-1974), der zunächst in Manchester bei Rutherford und Geiger studierte und dann mit Geiger an der PTR in Berlin zusammen gearbeitet hatte. 1919 kehrte er nach Kriegsgefangenschaft in Deutschland nach Großbritannien zu Rutherford nach Cambridge zurück. Er wies mit Hilfe eines Geiger-Müller Zählrohrs die Existenz des Neutrons nach und publizierte dieses Ergebnis 1932. Patrick Blackett (1897-1974) hatte bei Rutherford in Cambridge studiert. Er entwickelte eine Expansions-Nebelkammer, die durch zwei Geiger-Müller Zählrohre getriggert wurde. Wurde ein radioaktives Teilchen von beiden Zählrohren gleichzeitig (koinzident) registriert, expandierte das Volumen der Nebelkammer und ermöglichte die Bildung der typischen Ionisationsspuren, die automatisch fotografiert wurden. Neben diversen Kernumwandlungsprozessen wies er damit auch das Positron nach und bekam für diese Arbeit 1948 den Nobelpreis. Ich gehe davon aus, dass Müller diese beiden prominenten Physiker mit seinem Statement gemeint hat.

Obwohl diese von Geiger angeordneten Messungen vermutlich der Stabilisierung der Arbeit mit dem noch jungen Zählrohr dienen sollten, fühlte sich Müller übervorteilt. Nachdem er 1929 seine Karriere an der Universität vorerst beendet hatte, fand er in der Industrie Anstellung als Physiker. Die Konstruktion und der Vertrieb der Zählrohre nach 1929 ging vermutlich an die Kieler Firma Neufeldt & Kuhnke. Das 'Müller' des fortan häufig nur noch als Geigerzähler titulierten Gerätes verschwand ebenfalls im Sprachgebrauch der wissenschaftlichen *community*. Müller selbst hat in der Angelegenheit der Urheberschaft des Zählrohrs zumindest seit den 1960er Jahren nach verlorenen Rechtsstreiten, Protestschreiben und zuletzt der Patentierung und Vermarktung des 'Müller-Geiger-Coutners' im Jahr 1952 in Australien resigniert, wie er gegenüber Wildhagen 1957 bekannte:

Nach gutem Brauch haben daher beide als Erfinder zu gelten, ohne dass aussenstehende Personen das Recht haben, über den Anteil jeder der Erfinder Vermutungen zu äussern. [...] Der unglückliche Umstand, dass Geiger vor 12 Jahren verstorben ist, macht für mich leider eine öffentl.[iche] Erörterung recht heikel, sodass ich nur beweisbare Vorgänge in Betracht ziehen kann. Meine Tochter warnte mich auch dringend, mit irgendwelchen deutschen Physikern Streit anzufangen, denn dann würden sich die letzten Geiger-Müller Zaehlrohre auch noch in Geiger-Zaehler verwandeln [sic].²⁹⁹

Wie gezeigt, lassen sich besonders hinsichtlich der experimentellen Arbeitsteilung und dem sozialen Gefüge Parallelen zwischen dem Team Rutherford-Geiger und Geiger-Müller ausmachen, die aber in ihrer subjektiven Wahrnehmung durch die Protagonisten (Geiger in der Situation bei Rutherford) und Müller unterschiedlich zu sein scheinen.

Geheimhaltungspraxis

Bis zum Ende der Zusammenarbeit von Geiger und Müller gab es fast niemanden außerhalb von Kiel, der dazu in der Lage war, ein Zählrohr zufriedenstellend über einen längeren Zeitraum zu betreiben oder gar selbst zu konstruieren. Von der gesamten experimentellen Arbeit von Geiger und Müller wurde wenig publiziert und ein potentieller Transfer von Wissen über das Zählrohr reguliert. Beide waren sich vielmehr der hohen Relevanz des stillen Wissens über Konstruktion und Handling des Zählrohrs für ihr Forschungsgebiet bewusst und haben es genauso bewusst nur in Ausnahmefällen kommuniziert. Der schon diskutierte Fall des Behnken-Zählrohrs (vgl. Abschnitt II.4.11) lässt vermuten, dass die wenigen an dritte Personen verschickten Zählrohre speziell modifiziert wurden, um technische Details unkenntlich zu machen. Müller schrieb Anfang 1929 an seine Eltern, dass es sehr schwer sei die Geheimnisse um das Zählrohr vor den vielen

²⁹⁹ Müller an Wildhagen, 10.05.1957, Deutsches Museum Archiv München, S. 6f, NL24 11/26.

Gästen am Institut geheim zuhalten. Seine Eltern konnten beispielsweise im April 1929 folgende Zeilen lesen:

Seit vorigem Montag haben wir wieder einen Gast im Institut, einen Freiburger Physiker. Er ist ein sehr netter Mann, nur macht es manchmal etwas Mühe, unsere Geheimnisse vor ihm zu verbergen, denn er soll ja doch nicht alles sehen, was wir machen.³⁰⁰

Bereits im März zuvor erwähnte er Rutherfords Assistenten Hugh Webster, für den aber offensichtlich andere Kriterien der Weitergabe der Konstruktionsgeheimnisse gegolten haben:

Am nächsten Montag bekommen wir Besuch von einem Australier. Dieser ist Schüler von Rutherford u. soll hier bei uns das Zählrohr kennenlernen, da man in Cambridge scheinbar doch nicht so ganz damit fertig wird. Er wird aber nur 2–3 Tage bleiben. Wir wollen mit ihm zusammen ein paar Zählrohre bauen und ihn [sic] im übrigen auch alle unsere Geheimnisse zeigen. Von Cambridge haben wir nämlich nicht die üble Konkurrenz zu befürchten wie von Berlin.³⁰¹

Es gibt insgesamt nur wenige, ähnlich dokumentierte Ausnahmen von dieser selbst auferlegten, aber höchst selektiven Schweigepflicht. Die Personen, die in Kiel im Bau von Zählrohren unterrichtet wurden, waren den Quellen nach nur Personen aus dem ehemaligen Kollegenkreis von Rutherford. Darunter waren Niels Bohr, Georg von Hevesys Assistent W. Seith und der schon erwähnte Hugh Webster. Die Laborbücher oder andere Textquellen bieten keinen Aufschluss über den Inhalt dieser Konstruktions- und Handhabungs-Geheimnisse. Die Entsendung der Assistenten namhafter Forscher zeigt aber, dass schon sehr früh ein großes Interesse an dem neuen Messinstrument bestand und dessen Handhabung zu einem großen Teil auf Wissen beruhte, das nur im direkten Umgang mit dem Zählrohr und nicht durch Briefe, Laborbücher oder Publikationen erlernt werden konnte. Von einem ähnlichen Prozedere berichtet Collins in seiner renommierten TEA-Studie (1974)³⁰². Collins analysiert das komplizierte wechselseitige Verhältnis von Experimentalphysikern verschiedener Laboratorien, die ihr apparatives, stilles Erfahrungswissen über den TEA-Laser untereinander austauschten. Die Randbedingungen sind dabei erschreckend kongruent: Eine magere Informationsdichte in Publikationen. besonders hinsichtlich Konstruktionsdetails und -praktiken und die daraus resultierende Notwendigkeit des Austausches von Mitarbeitern der Laboratorien

³⁰⁰ Müller an seine Eltern, 22.4.1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30. Wer der im Zitat angesprochene "Freiburger Physiker" war, konnte ich nicht mit Bestimmtheit rekonstruieren. Hevesy war jedoch bis 1934 Insitutsleiter der physikalischen Chemie an der Universität in Freiburg. Eventuell könnte daher sein Assistent Seith der angesprochene Physiker gewesen sein.

³⁰¹ Müller an seine Eltern, März 1929, Deutsches Museum Archiv München, NL024-7/30.

 $^{^{302}}$ Es geht in der Studie um eine Gruppe Physiker, die sich mit der Leistungsverstärkung des Transversely Excited Atmospheric Pressure CO₂ Lasers – kurz TEA Laser - beschäftigt haben.

untereinander. Ein von Collins befragter Physiker merkte zur Publikationsstrategie an:

What you publish in an article is always enough to show that you've done it, but never enough to enable anyone else to do it. If they can do it then they know as much as you do. (Collins 1974, 176)

Bezüglich eines Besuchs bei einem anderen Labor gab ein anderer Mitarbeiter an:

They showed me roughly what it looked like but they wouldn't show me anything as to how they managed to damage mirrors. I had not a rebuff, but they were very cautious. (Collins 1974, 180)

Collins interpretiert dieses häufig konstatierte Verhalten als eine Art so-vielwie-nötig-aber-so-wenig-wie-möglich Taktik. Ein Befragter bringt dies wie folgt auf den Punkt: "Let's say I've always told the truth, nothing but the truth, but not the whole truth" (Collins 1974, 180). Auch etwa 50 Jahre vorher bei dem vermeintlich einfacheren Geiger-Müller Zählrohr werden diese Strategien zur Weitergabe von Handlungswissen aus erster Hand durch Müller berichtet und sind scheinbar besonders für intrinsische Aspekte, wie dem bloßen Funktionieren des Geräts und extrinsische Faktoren, wie der Konkurrenzfähigkeit im Vergleich zu anderen Institutionen zentral. Auch bei meinem Nachbau der Zählrohre habe ich zunächst zahlreiche "Messingröhren" produziert, die aus mir zunächst unerklärlichen Gründen nicht funktioniert haben, obgleich ich das physikalische Funktionsprinzip durchdrungen hatte, moderne Messgeräte zur Verfügung hatte und damit einen immensen Vorteil gegenüber der historischen Situation von Geiger und Müller hätte haben sollen. Nicht zuletzt auch dieser Umstand kann als ein Indiz dafür gewertet werden, dass Forschungspraxis mehr ist als das, was in Publikation veröffentlicht, in Laborbüchern notiert oder in Briefen kommuniziert wird. Wissenschaft ist ein eben auch ein Handwerk und keine rein kognitive Tätigkeit.

Zusammenfassung

Insgesamt haben die Analyse der Laborbücher und die Erfahrungen beim Nachbau zu einer Neubewertung der Rollen von Geiger und Müller in der Entwicklung des Zählrohrs geführt. Anders als von Galison (1997, 440) und Hughes (1993) vertreten, sollte allein schon aus technischen Erwägungen das Geiger-Müller Zählrohr nicht mehr nur als Weiterentwicklung des Spitzenzählers angesehen werden. Zwar gibt es Parameter, für die ein Spitzenzähler nahezu wie ein Geiger-Müller Zählrohr funktioniert. Diese wurden aber nach Vorarbeiten von Bothe erst von Geiger und Otto Klemperer (1928) während der parallelen Arbeiten zum Zählrohr veröffentlicht. Außerdem gab es in Geigers Labor eine soziale Hierarchie, die Auswirkungen darauf gehabt hat, wie publiziert wurde und wie Müller seine

Tätigkeit im Labor wahrgenommen hat. Geigers und Rutherfords Verhalten ähnelt sich in Bezug auf diese Hierarchie und ihre positive Haltung zum Experimentieren sehr, wenngleich auch ein Großteil der experimentellen Arbeit durch die jeweiligen Mitarbeiter geschah. Man kann daher vermuten, dass eher Geigers Ruf und Status in der scientific community und weniger objektive, technische Gütekriterien die Etablierung des Zählrohrs innerhalb weniger Monate so stark vorangetrieben haben. Dennoch entwickelte und baute Müller das Zählrohr als Konsequenz seiner Dissertations-Experimente und den Vorarbeiten zum Spitzenzähler scheinbar allein. Bestimmte Praxis-Aspekte dieser Tätigkeit lassen sich dabei erst in der Analyse des Nachbaus, dem Nachvollzug und deren Reflektion erschließen. Die Replikationsmethode gestattet dabei als Analysewerkzeug der Wissenschaftsgeschichtsschreibung eine neue Lesart auch auf bereits wissenschaftshistorisch erschlossenes Quellenmaterial. Im meiner Fallstudie bleibt jedoch zumindest eine für mich drängende Frage offen, die nicht nur auf das Geiger-Müller Zählrohr beschränkt ist: Die Rolle der Beobachtung der Zählimpulse in ihren unterschiedlichen Ausprägungen; sei es bei den geschwärzten Fotoplatten von Becquerel, den Szintillationen von α -Strahlung, den Ausschlägen eines Fadenelektrometers und schließlich deren Automatisierung durch ein Zählwerk. Insbesondere die Registrierung der Zählimpulse mit einem Fadenelektrometer scheint auf Basis meiner Analyse epistemologisch interessant, da der Umgang damit einerseits in der historischen Situation routiniert zu sein scheint und andererseits aus heutiger Sicht das Instrument und der Umgang damit keineswegs mehr so transparent ist, wie er durch die historischen Aufzeichnungen wirken mag.

Das Zählrohr blieb noch etwa zwei Jahrzehnte nach seiner Entwicklung ein unverzichtbares Gerät für die Radioaktivitäts- und Höhenstrahlungsforschung bevor es immer mehr in den Hintergrund rückte. In den 1950er Jahren gerieten dagegen die elektrisch verstärkten Szintillations- und Halbleiterdetektoren immer mehr in den Vordergrund (Rheinberger 1999, die mittlerweile Galison 1997). das als Geigerzähler Elektronenzählrohr für die Forschung obsolet machten. Heutige Geiger-Müller Zähler haben mit ihrem Prototypen von 1928 nur noch ihr grundlegendes Funktionsprinzip und das unverwechselbare, charakteristische Knacken gemeinsam. Gehalten hat es sich dennoch bis heute als Ikone und Standardinstrument im Strahlenschutz, in Fach- und Schulbüchern, in Physiksammlungen von Schulen sowie neben Röntgen, Morse und Diesel als Substantiv im Duden und im gesellschaftlichen Gedächtnis.

KAPITEL III

Fachdidaktische Aspekte des Geiger-Müller Zählrohrs

Befragt man Lehrkräfte zum Physikunterricht über Radioaktivität in der Sekundarstufe I so erhält man ein recht eindeutiges Meinungsbild: Das Thema sei sowohl für Schüler als auch Lehrer im Vergleich zu anderen Themen eher ein unbeliebtes. Dies läge insbesondere daran, dass man nur schwer Schülerexperimente machen könne und auch Demonstrationsexperimente in der Regel einer speziellen Schulung mit Fachkundenachweis im Strahlenschutz bedürfen. Im Gegensatz zu vielen Gymnasien wird dieser Lehrgang sowie häufig auch die streng reglementierte Lagerung und kostspielige Anschaffung von radioaktiven Präparaten zumindest an Gemeinschaftsschulen eingespart. Die wenigen Stunden im Physikunterricht über Radioaktivität werden dann verständlicherweise eher für die Diskussion der Problematiken rund um Atomkraftwerke und die biologische Wirkung von radioaktiver Strahlung genutzt. Das Geiger-Müller Zählrohr als eines der zentralen traditionellen Mess- und Nachweisinstrumente nimmt oft nur noch eine untergeordnete Rolle ein. Wenn überhaupt, wird es noch zur Bestimmung der Nullrate im Klassenraum genutzt.

Diese recht pessimistische Zusammenfassung beschreibt einen Teil der Sichtweise von sechs Physik-Lehrkräften, die über ihre Einstellung und Einschätzung zum Unterricht über Radioaktivität von mir befragt worden sind. Diese Interviews sind Teil der in diesem Kapitel thematisierten fachdidaktischen Studie, welche die Implementierung von Teilen der im vorigen zweiten Kapitel dargestellten wissenschaftshistorischen Studie begleitet hat. In dieser Einleitung wird im Folgenden der fachdidaktische Forschungsstand zum Zählrohr und zum Unterricht über Radioaktivität geklärt und der Rahmen abgesteckt, in dem sich mein Projekt bewegt. Fachdidaktische Details zum Geiger-Müller Zählrohr und dessen mögliche Rollen im Physikunterricht werden dann im Abschnitt III.1 ausgeführt. Der Begriff und das fachdidaktische, aber aus der Wissenschaftsphilosophie und –soziologie entliehene Konzept Nature of Science sind das Thema des 2. Abschnitts und werden am Beispiel meiner Fallstudie erörtert. Das Kapitel schließt mit den Abschnitten III.3 und III.4, in denen dann schließlich die

Umsetzung der wissenschaftshistorischen Studie in nutzbare Inhalte für den Physikunterricht durch eine Fortbildung beschrieben wird. Die umrahmende, dreistufige Evaluationsstudie wird in Abschnitt III.5 präsentiert und analysiert sowie anschließend interpretiert und reflektiert werden.

Der fachdidaktische Forschungsstand zum Unterricht über Radioaktivität und das Geiger-Müller Zählrohr

Recherchiert man nach aktuellen didaktischen Forschungsprojekten zur Radioaktivität beschränkt sich das Ergebnis vorwiegend auf Beiträge in Schulbüchern und in den nationalen fachdidaktischen Zeitschriften und Tagungsbänden der drei großen naturwissenschaftsdidaktischen Gesellschaften: Der Fachverband Didaktik der Physik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG), der Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik (GDCP) sowie dem Deutschen Verein zur Förderung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts (MNU). Man kann diese Beiträge grob in vier Kategorien einordnen: Experimente, Geschichte, Kontexte und Bildungsforschung. Im Bereich Experimente findet man vorwiegend Vorschläge zum Einsatz von neuen und traditionellen Messgeräten und Experimentalaufbauten. Darunter fallen der Einsatz von Messwert-produzierenden Remote-Control-Labs (RCLs) (Gröber et al. 2010) bei denen reale Experimente über das Internet ferngesteuert ausgeführt werden können, der Selbstbau von Diffusions-Nebelkammern (Backmund & Wilhelm 2009, Rapp 2008) für einen Phänomen-orientierten Unterricht, zum Modellkonzept über Analogie-Beziehungen traditionelle Messungen mit Ionisationskammer und Zählrohr. In der zweiten Kategorie findet man hauptsächlich Artikel über die Ikonen der Radioaktivitätsforschung Antoine Henri Becquerel, Marie und Pierre Curie und Ernest Rutherford (Voerste & Demuth 2008) und das Reaktorunglück in Tschernobyl³⁰³. Besonders letzteres Ereignis ist in der Regel ein Anlass auch gesellschaftspolitische Konsequenzen rund um das Thema Radioaktivität, wie die friedliche Nutzung von Kernenergie und die Endlagerproblematik (Lukner 2007) zu thematisieren. Diese bilden neben anderen Kontexten die dritte Kategorie. In diese Sparte fallen zudem die Thematisierung von Radioaktivität als alltägliches Phänomen im Sinne der natürlichen Umgebungsstrahlung (Risch 2005, Müller 2012) sowie medizinische und Anwendungen von radioaktiver technische Strahlung. Die Forschungsrichtung fragt nach den nicht nur auf das Thema Radioaktivität

³⁰³ Das jüngste Reaktorunglück in Fukushima im März 2011 wird bisher nur indirekt in fachdidaktischen Zeitschriften als akuter Legitimationsgrund für die Beschäftigung mit Radioaktivität im Physikunterricht angeführt. Dedizierte Artikel zu dem Unglück und dessen Thematisierung und Aufarbeitung im Physikunterricht gibt es meinem Kenntnisstand nach nicht.

beschränkten, allgemeindidaktische Ideen, wie z.B. Schülervorstellungen zur radioaktiven Strahlung (Heinicke 2014, Neumann & Hopf 2011, Mork 2011, Alsop 2001, Millar 1994, Linjse et al. 1990, Boyes & Stanisstreet 1994, Riesch & Westphal 1975), aber dies vorwiegend in internationalen Zeitschriften. Zudem gab es von der Zeitschrift Naturwissenschaften im Unterricht Physik Friedrich-Verlag, respektive *Naturwissenschaften im Unterricht* Physik/Chemie des Aulis-Verlags bisher vier Themenhefte, die sich mit Radioaktivität im allgemeinen oder einem spezielleren Detail gewidmet haben³⁰⁴. Die Desiderata speziell in diesem Teil der schulischen Ausbildung und der fachdidaktischen Forschung sind vielschichtig. Darunter fallen zum Beispiel die Lösung des Problems der kostspieligen Anschaffung von Messinstrumenten und zugelassenen radioaktiven Präparaten sowie die damit verbundene Einhaltung von Regularien der Strahlenschutzverordnung und den entsprechenden Einschränkungen im Physikunterricht. Letzteres macht insbesondere den Einsatz der in anderen Themenbereichen didaktisch oft sehr fruchtbaren Schülerexperimente nur schwer oder teilweise unmöglich. Zudem gibt es Anzeichen dafür, dass SchülerInnen sehr Präkonzepte über radioaktive Strahlung wissenschaftlich nicht tragfähig sind. Dies betrifft vor allen Dingen Vorstellungen über die Art, Gefährlichkeit und Ausbreitung von radioaktiver Strahlung (Zgorzelski 2011, Zgorzelski 2013)³⁰⁵.

Zielsetzung

Der fachdidaktische Teil meiner Arbeit beschreibt daher den Versuch, Teile aus der wissenschaftshistorischen Analyse des Zählrohrs in den Regel- oder Projektunterricht in der schulischen Ausbildung miteinzubeziehen. Im Zentrum dieser Herangehensweise steht das Konzept der Nature of Science, auch also Wesensart. der Charakter oder die Natur Naturwissenschaften. Am Beispiel der Entwicklungsgeschichte des Geiger-Müller Zählrohrs können SchülerInnen ein Verständnis für einige Aspekte der Nature of Science entwickeln, wie sie u.a. von McComas et al. (1998) und darauf aufbauend von Allchin (2013)formuliert worden Fachphysikalische Inhalte können dabei ebenfalls eine Rolle spielen, wenngleich auch eine untergeordnete, da der von mir propagierte Zugang über Text- und Quellenarbeit beispielsweise nicht zwangsläufig der

³⁰⁴ Es handelt sich dabei um die NiU P/C Ausgaben 1982 (30) "Radioaktivität und Kernenergie" und 1985 (33) "Strahlenschutz" sowie um die NiU Physik Hefte 1987(28) "Radioaktivität und Umwelt", 1994 (21) "Versuche zur Radioaktivität" und 2014 (141/142) "Radioaktivität". Das letzt genannte Heft war zum Zeitpunkt der Abgabe der Dissertationsschrift noch nicht erschienen und ist daher nicht Gegenstand der ursprünglichen Analyse.

 $^{^{305}}$ Im NiU-Band 141/142 thematisiert Heinicke (2014) Alltagskonzepte zu Radioaktivität, in dem auch die Erkenntnisse von Zgorzelski genutzt werden.

Durchführung von Experimenten bedarf³⁰⁶. Die Nachteile im Kontext eines modernen handlungsorientierten Physikunterrichts liegen dabei auf der Hand, aber fallen gerade beim Thema Radioaktivität hinsichtlich der am Anfang geschilderten experimentellen Vorbehalte, Probleme und Nöte von Lehrkräften nicht so stark ins Gewicht. Eine gut sortierte Physiksammlung und eine mit dem Strahlenschutz bestellte Lehrkraft sind hier nämlich keine Voraussetzung für eine erfolgreiche Durchführung der Unterrichtseinheit. Zur Erprobung und Vermittlung dieses Ansatzes wurde eine Fortbildung für Lehrkräfte der Sekundarstufe I und II konzipiert und bei zwei distinkt unterschiedlichen Gruppen von Lehrkräften in Schleswig-Holstein und Niedersachsen im Jahr 2013 durchgeführt. Die Fortbildung wurde mit einem Prä-Post-FollowUp Forschungsdesign von mir evaluiert. Die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse der Fortbildung sowie der Evaluationsstudie bilden den Schluss des Kapitels.

1. Das Zählrohr und Unterricht über Radioaktivität

Bildungsstandards und Kerncurriculum im Fach Physik

Physik zählt zum Kanon der allgemeinbildenden Fächer. Dabei unterscheidet sich das Schulfach Physik von der Wissenschaft Physik in einigen essentiellen Punkten (Heering & Höttecke 2011). Wie viel von der Fachwissenschaft tatsächlich im Schulunterricht in angemessenem Umfang und angepasster Form behandeln werden soll, ist in den bundesweiten Bildungsstandards und den länderspezifischen Kerncurricula der jeweiligen Kultusministerien festgelegt. Seit der Einführung der Bildungsstandards von 2004 ist es zudem Aufgabe der Physik nicht nur Fachwissen zu vermitteln, sondern auch die Kompetenzen Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung zu fördern. Dabei spielt das oft als traditionell empfundene Fachwissen eine ebenso gewichtige Rolle. wie dessen Genese. der sachund adressatengerechte Austausch darüber und das Bilden von Urteilen oder die Bewertung von verschieden kontextualisierten Sachverhalten. Zwar waren diese Kompetenzen auch schon vor 2004 von Bedeutung, aber eher implizit und nicht von offizieller Seite vorgeschrieben. Während der PISA-Nachwehen wurden dann die prozessbezogenen Kompetenzen deutlich ausdifferenziert. Die inhaltsbezogene Kompetenz Fachwissen wurde dabei im Umfang entweder beibehalten oder reduziert (vgl. Kultusministerium 2009, Barth 2010). Historische Inhalte im Physikunterricht werden dabei oft zu dieser Kompetenz gezählt und entsprechend gekürzt, da sie oft zwar als nützliche,

³⁰⁶ Dieser Ansatz ohne Experimente käme dann der Herangehensweise von Jens Pukies (1979) zum Verstehen der Naturwissenschaften als rein kognitiv-philosophische Analyse am nächsten.

aber dennoch zweitrangige Zusatzinformationen angesehen werden. Einen historischen Zugang zur Vermittlung zu wählen ist jedoch an einschlägigen in den Bildungsstandards (Deutschland 2005, 6), Kerncurriculum (in Niedersachsen: Kultusministerium 2009, 7, 10, 30 und in Schleswig-Holstein: Ministerium für Bildung o.l.-a, 18; Ministerium für Bildung o.J.-b, 12, 35) und den nationalen Vorgaben für die Abiturprüfung (Kultusministerkonferenz 2004, 2-4) vorgesehen. In allen genannten Fällen soll die Geschichte der Physik dafür genutzt werden entweder die gesellschaftliche Bedingtheit von Physik zu reflektieren oder dessen gewachsene, dynamische Eigenschaften historisch zu illustrieren. Übergeordnetes Ziel ist dabei die Vermittlung der drei prozessbezogenen Kompetenzen Erkenntnisgewinnung, Kommunikation und Bewertung. Die vierte Dimension der fachlichen Inhalte bildet dafür das notwendige Fundament (vgl. Barth 2010).

Historisch-genetischer Unterricht und Wissenschaftsgeschichte

historisch-genetischen Unterricht bzw. historisch orientierte Vermittlungsansätze spielen im Physikunterricht zwar immer noch eine Nischenrolle, aber wurden ausgehend von der Mitte des 20. Jahrhunderts mit unterschiedlichen Ausprägungen immer wieder propagiert³⁰⁷. Das Potential von Wissenschaftsgeschichte im Physikunterricht wurde aber auch in der jüngeren Vergangenheit schon oft gezeigt. Um nur einige Protagonisten dieses Ansatzes zu nennen, könnte man Fritz Kubli (Kubli 2005, Kubli 2002 [1998]) mit seinem erzählerischem Ansatz und allen ähnlichen Ansätzen anführen, die Oldenburger Schule um Falk Rieß (z.B. Rieß & Schulz 1994, Heering 1997), den Bielefelder Ansatz nach Jens Pukies (1979), der eher den Fokus auf sozialgeschichtliche Aspekte legt und Jürgen Teichmanns historische Modelle und deren Verwendung im Physikunterricht (z.B. Teichmann 2013).

Eine weiterer Zweig des geschichtlichen Zugangs ist das Unterrichten über die Wesensart von Naturwissenschaft (*Nature of Science*), wie er von Didaktikern und Wissenschaftshistorikern, wie Williams McComas (1998), Dietmar Höttecke (Höttecke 2001a, Höttecke et al. 2012, Höttecke 2012), Douglas Allchin (Allchin 2013) u.a. sowie auch von Praktikern, wie Michael Barth (z.B. Barth 2010, Barth 2012) vertreten wird. Ein Vorbehalt von Lehrkräften, wonach angesichts der geringen Zeit im Unterricht bei gleichzeitiger Stofffülle kein Platz für zusätzliche Inhalte sei oder gar ein schwer vertretbarer Austausch von Fachinhalten zu Gunsten von Geschichte vorgenommen werden müsste, greift in allen bisher präsentierten Fällen

 $^{^{307}}$ Für eine strukturierte Zusammenfassung der in Deutschland entwickelten und propagierten historischen Zugänge zu Physikunterricht siehe Heering 2014 .

nicht mehr³⁰⁸. Allen geschilderten Fällen ist gemein, dass sie nicht versuchen Fachinhalte zu ersetzen oder gar zusätzlichen Unterrichtsinhalt inklusive der notwendigen Vorbereitung zu schaffen, sondern die bestehenden Inhalte in einen historischen Kontext einzubetten und sie im Sinne des Kompetenzmodells inhaltlich und methodisch zu ergänzen.

Geschichtliche Inhalte haben aber in einer anderen Sichtweise schon lange einen traditionellen Platz im Physikunterricht und zwar in kleinen oder großen Kästchen im Schulbuch, die sich wie im Fall des Themas Radioaktivität auf bis zu halbe Doppelseiten ausdehnen können. Diese historischen Informationen, so konstatiert Höttecke (2012), sind aber von den Darstellungen jener Inhalte, die explizit dem Erwerb von Fachwissen abgetrennt und unterstützen sollen, die Begriffs-Konzeptentwicklung kaum explizit. Zudem fordere die separate Darstellung angesichts von Zeitdruck seitens des Lehrpersonals gerade dazu auf, die eh schon kurz gefassten Inhalte zu ignorieren. Zudem seien die historischen Fachinhalte stark vereinfacht und streng linear dargestellt. Eine solche inhaltliche Gestaltung und visuelle Präsentation von Geschichte im Schulbuch entspricht daher weder dem Zeitgeist der aktuellen wissenschaftshistorischen, noch dem der (physik-)didaktischen Forschung. Die häufige Missachtung der historischen Exkurse im Schulbuch durch Lehrkräfte ist daher in meinen Augen nicht unbedingt als Nachteil zu werten³⁰⁹.

_

Michael Barth (2012) formuliert ergänzend zu meiner These vier weitere Vorbehalte von Lehrkräfte gegenüber historisch-orientiertem Physikunterricht: (1) Lehrkräfte fühlen sich aufgrund der fremdartigen Thematik oft unsicher bei der Vermittlung, was aber zum Teil auch durch die Beschäftigung mit der Sache selbst begründet ist, da der vermeintlich dogmatische Anspruch von Physik in Form von Zahlen, Gesetzen und Formalismen durch die Thematisierung von Fehlentwicklungen, Persönlichkeiten, gesellschaftlichen Bedingtheiten, u.a. sich auch die Wissenschaft Physik als historisch unstetig und nicht-linear gewachsen präsentiert. Eine "sichere" Antwort ist so im Vergleich zu traditionellem Physikunterricht keinesfalls immer möglich. Lehrkräfte konstatieren weiter, dass sie weiter (2) wenig Hilfe bei der Einarbeitung in diese oft neue und andersartige Unterrichtsthematik bei gleichzeitig (3) zu wenig Zeit angesichts der notwendigen Vorbereitung des Regelunterrichts. Dabei fehle zudem oft (4) das Unterrichtsmaterial und müsse erst eigenständig erstellt werden, was erneut die Probleme 2 und 3 anspricht. Barth spricht daher zurecht von einem Teufelskreis, den es sich aber lohnt zu durchbrechen. Eine Reflektion meiner Arbeit anhand dieser Kriterien erfolgt in Kapitel IV.

³⁰⁹ Dieses Statement bedarf mindestens zwei weiterer Klärungen. Zum einen ist dieses Problem der zu kritisierenden Präsentation geschichtlicher Inhalte nicht nur auf Physikschulbücher begrenzt (vgl. Markert 2012). Zum Zweiten kann das Argument, dass aktuelle Forschungsergebnisse der Physikdidaktik nicht unbedingt zeitnah in ein Schulbuch eingebunden werden nicht gelten, da methodische Ansätze, wie die Verwendung von mobilen Datenerfassungsgeräte (Tablet-PCs, iPad, etc.) durchaus schon in Schulbüchern einen Platz haben oder gar Schulbücher dediziert als Ebook für eben solche mobilen Computer z.B. vom renommierten Cornelsen-Verlag angeboten werden.

Das Geiger-Müller Zählrohr im Physikunterricht

Einen expliziten historisch-genetischen Ansatz zum Thema Radioaktivität oder Atomphysik, bzw. dem Geiger-Müller Zählrohr, der über geschichtlich inspirierte Anekdoten hinaus geht, gibt es meinem Kenntnisstand nach bisher nicht. Die Geschichte der Entstehung und Entwicklung des Zählrohrs füllt also rein inhaltlich eine bestehende Lücke. Thematisch spielt das Geiger-Müller Zählrohr als Messinstrument im Physikunterricht im Bereich Atomund Kernphysik der 9./10. Klasse und der gymnasialen Oberstufe eine Rolle. Die Art und Weise der Einführung dieses Instrumentes ist nicht vorgegeben. Im Kerncurriculum der gymnasialen Oberstufe in Niedersachsen heißt es bzgl. des oben beschriebenen fachlichen Fundaments: "Die Schülerinnen und Schüler erläutern das grundlegende Funktionsprinzip eines Geiger-Müller-Zählrohrs als Messgerät für Zählraten." (Kultusministerium 2009, 40) Im Gegensatz zu Schleswig-Holstein hat das Zählrohr jedoch im Physikunterricht in Niedersachsen von offizieller Seite der Landesregierung keinen expliziten Platz mehr in Klasse 9/10. Auch in Schleswig-Holstein findet man lediglich den Verweis, dass das Zählrohr neben Fotoplatten und Ionisationskammer als Nachweismethode für radioaktive Strahlung eingeführt werden soll (Ministerium für Bildung o.J.-a, 108). In der schleswig-holsteinischen, gymnasialen Oberstufe hat das Zählrohr wiederum keinen Platz mehr erhalten.

Es gibt verschiedene Gründe für und gegen die Behandlung des Geiger-Müller Zählrohrs im Physikunterricht. Gerade das Thema Radioaktivität scheint aus Gründen der eingeschränkt möglichen Schüleraktivität besonders beim Experimentieren im Zuge der jüngsten Verkürzung der Schulzeit im Gymnasium auf 8 statt 9 Jahre attraktiv für notwendige Kürzungen der Unterrichtsinhalte. Experimente mit dem Zählrohr sind dabei zudem an zwei Voraussetzungen geknüpft: Einerseits müssen für Schülerexperimente Zählrohre in ausreichender Anzahl in der Physiksammlung vorhanden sein, was erfahrungsgemäß in den meisten Schulen nicht der Fall ist. Jeglicher Umgang mit und die Lagerung von radioaktiven Stoffen ist außerdem an die Einhaltungen der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) bzw. Röntgenverordnung (RöV) geknüpft. Dazu gehört die Bestellung einer mit dem Strahlenschutz beauftragten Lehrkraft, die Sachkunde im Strahlenschutz durch einen kostenpflichtigen, mehrtägigen Fortbildungskurs nachweisen muss. Die Verwendung des Zählrohrs an sich ist zwar nicht von diesen Regularien betroffen, aber Messungen an radioaktiven Präparaten oberhalb einer in der StrlSchV festgelegten Aktivitätsgrenze (Deutschland 2001, Anlage III, Tabelle 1, Spalte 2 und 3). Je nach radioaktivem Stoff sind diese Freigrenzen unterschiedlich und entsprechend zu prüfen. Im Unterricht lässt sich auf Basis dieser Regelungen daher mit dem Zählrohr entweder lediglich

die Nullrate oder die Zählrate für Kaliumchlorid bestimmen³¹⁰ ohne entsprechende Vorkehrungen treffen zu müssen. Aus einer lebensweltlichen Perspektive ist ein solcher Physikunterricht ohne genehmigungspflichtige Präparate jedoch durchaus ratsam, da der geringere Aufwand beim Umgang und der Lagerung die ohnehin schon bei SchülerInnen und deren Eltern möglicherweise bestehenden Ängste und Vorbehalte gegenüber Radioaktivität nicht unnötig schürt. Radioaktivität kann so als natürlich vorkommendes und nicht als nur unter strengen Sicherheitsvorkehrungen beobachtbares Phänomen eingeführt werden. Außerdem stellt der Verzicht auf weitere Präparate eine erhebliche Arbeitserleichterung besonders notwendigen Fortbildung, der Vorbereitung, hinsichtlich der Durchführung des Unterrichts, der sicheren Lagerung, das Führen von möglichen Elterngesprächen auf Grund des Gefährdungspotentials der SchülerInnen sowie der möglichweise eigenen bestehenden Vorbehalte gegenüber radioaktiver Strahlung für die Lehrkraft dar. Zudem kann und sollte man das große Einsparungspotential für den Physiketat der Schule nicht unterschätzen (vgl. Frey 2007).

Der von mir im Zuge der später beschriebenen Studie interviewte Lehrer Herr Dalton³¹¹ gab an, dass er aus diesem Grund die gesellschaftlichen Dimensionen rund um das Unterthema Kernenergie in den Vordergrund seines Unterrichts stellt. Das Zählrohr als Nachweisinstrument für radioaktive Strahlung würde er daher nicht oder nur sporadisch einführen. Frau Bassi bekannte in ihrem Interview, dass sie ihren bisherigen Unterricht über Radioaktivität zwar mit Zählrohr, aber ohne die Nutzung von radioaktiven Präparaten bestritten hat, da sie den erforderlichen

_

³¹⁰ Die spezifische Aktivität von KCl beträgt 16,35 Bq/g. Bei einer Freigrenze von 100 Bq/g für das "verantwortliche" radioaktive Isotop K-40 und dem natürlichen Vorkommen dieses Isotops ist der Umgang durch Lehrkräfte und SchülerInnen per se nicht beschränkt, bzw. nicht anzeige- oder genehmigungspflichtig. Dennoch muss beachtet werden, dass alle an der Schule gelagerten Präparate die Grenze von 10 kBq nicht überschreiten dürfen. Ist dies der Fall muss eine mit dem Strahlenschutz beauftragte Lehrkraft bestellt werden. Generell dürfen SchülerInnen unter 16 Jahren nicht mit radioaktiven Stoffen oberhalb der Freigrenze hantieren. SchülerInnen zwischen 16 und 18 ist der Umgang mit offenen radioaktiven Stoffen sowie Röntgeneinrichtungen und Neutronenquellen unter Beisein und Anleitung der/des Strahlenschutzbeauftragten gestattet, falls der Umgang zum Erreichen der jeweiligen Bildungsziele erforderlich ist. Schülerexperimente dürfen jedoch nur mit ummantelten, bauartzugelassenen Präparaten bzw. Präparaten unter der Freigrenze erfolgen (Deutschland 2001, §45 Abs. 2 und 3, §25).

³¹¹ Es handelt sich bei den verwendeten Namen natürlich aus Gründen des Datenschutzes um Pseudonyme, die ihren Ursprung in der Physikgeschichte haben. Dies erlaubt zumindest dem physikalisch oder geschichtlich vorgebildetem Leser im Vergleich zu standardisierten Pseudonymen, wie Müller, Meier und Schmidt eine bessere Vergleichbarkeit im gesamten Kapitel III dieser Arbeit auf Grund der impliziten mnemotechnischen Hilfe. Die Namen sind dabei rein zufällig gewählt. Ähnlichkeiten zwischen den Lehrkräften und ihren historischen Namenspatronen bestehen nur im Geschlecht. Zur Gestaltung des während der Datenerhebung und -analyse verwendeten alphanummerischen Codes siehe Fußnote 330 auf Seite 228.

Sachkundenachweis im Strahlenschutz bisher nicht erbracht hatte. Obwohl dies zum Zeitpunkt der Interviews bereits nachgeholt worden war, war Frau Bassi sich unsicher, ob sie in ihrem zukünftigen Unterricht nun zulassungspflichtige Präparate nutzen wird oder weiterhin darauf verzichtet. Dagegen würde aus ihrer Sicht der schon angesprochene fehlende lebensweltliche Bezug der SchülerInnen sprechen. Dafür spräche jedoch die leichte Demonstration und Messbarkeit der Abstandsregeln für die drei Strahlungsarten³¹².

GMZ technisch vs. GMZ als Black Box vs. GMZ historisch

Als typisches Messinstrument der Wahl im Unterricht über Radioaktivität haben alle Lehrkräfte, die an der Studie teilgenommen haben, das Geiger-Müller Zählrohr benannt. Alternative Geräte, wie eine Ionisationskammer oder Nebelkammern wurden nicht erwähnt. Beim Zählrohr wurden zwei verschiedene Zugänge von den Lehrkräften favorisiert: einerseits ein technischer und über die Funktionsweise motivierter Zugang sowie andererseits eine Herangehensweise, welche die Messungen ins Zentrum stellen und das Zählrohr als Black-Box charakterisieren, dass aus nicht näher mit den SchülerInnen thematisierten Gründen einen Messwert produziert, der ein Maß für radioaktive Strahlung darstellt. Die Vor- und Nachteile sind direkt durch die individuelle Schwerpunktsetzung bzw. Auslassung erkennbar. Ein dritter Zugang wäre die Kontextualisierung des Zählrohrs über dessen Entwicklungsgeschichte. Gerade solch ein historisch motivierter Ansatz ist in Schulbüchern beim Thema Radioaktivität oft zu finden. Die drei prominentesten Themen sind dabei die Entdeckung der radioaktiven Strahlung durch Becquerel, Röntgen und das Ehepaar Curie, die Entwicklung der Atommodelle von Thomson und Rutherford bis Bohr, Sommerfeld und Schrödinger und die Entdeckung der Kernspaltung durch Hahn, Straßmann und Meitner³¹³. Die Präsentation dieser vorwiegend biographischen Inhalte in Schulbüchern erfüllt jedoch nur die erste Hälfte des fachdidaktischen Schlagwortes ,historisch-genetisch'. In Abgrenzung zu Martin Wagenscheins Verständnis³¹⁴ von 'genetisch' bedeutet historisch-genetisch in diesem Fall den Nachvollzug der Genese, also der Entstehung und Entwicklung eines physikalischen Sachverhalts. Diesem Anspruch werden die Darstellungen in den untersuchten Schulbüchern keinesfalls gerecht, aber das können und müssen sie in der Regel auch nicht. Allchin (2013, 77) führt als Gewährsmann

³¹² Interviewtranskript von Frau Bassi, Anhang A-4, 160ff, 183ff.

³¹³ Diese Einschätzung basiert auf einer qualitativen Analyse von 24 zufällig ausgewählten Schulbüchern aus den Jahren 1980 bis 2009. Eine Liste ist in Anhang E zu finden.

³¹⁴ 'Genetisch' im Sinne von Martin Wagenschein meint jedoch nicht eine historische Perspektive, sondern eine individuelle, genetische Sicht der Lernenden auf den Unterrichtsgegenstand (vgl. Wagenschein 1968).

für diese Beobachtung Thomas S. Kuhn an. Dieser beschreibt eine Art Regelhaftigkeit von historischen Episoden in Lehrbüchern:

Characteristically, textbooks of science contain just a bit of history, either in <u>an introductory chapter</u> or, more often, in <u>scattered references to the great heroes</u> of an earlier age. From such references both students and professionals come to feel like participants in a long-standing historical tradition. Yet the textbook-derived tradition in which scientists come to sense their participation is one that, in fact, never existed. [...] Why dignify what science's best and most persistent efforts have made it possible to discard? The depreciation of historical fact is deeply, and probably functionally, ingrained in the ideology of the scientific profession, the same profession that places the highest of all values upon factual details of other sort. [...] The result is a persistent tendency to make the history of science look linear or cumulative, a tendency that even affects scientists looking back at their own research. (Kuhn 2012 [1962], 137ff., meine Hervorhebung)

Ludwik Fleck (1980, 146ff.) differenziert deutlicher in der von Fachwissenschaftler zum gegenseitigen Austausch innerhalb und außerhalb ihres Denkkollektivs³¹⁵ genutzten Literatur, die von Kuhn allgemein als *textbooks* zusammengefasst werden. Fleck klassifiziert sie in die wechselseitig abhängige Handbuch- und Zeitschriftenwissenschaft sowie in die Lehrbuchwissenschaft, in der auch das Schulbuch seinen Platz findet. Aber gerade seine dritte Kategorie spielt in Flecks Modell keine Rolle, da durch Lehrbücher "die Einweihung in die Wissenschaft nach besonderen pädagogischen Methoden geschieht, [...] die aber hier weniger wichtig ist." (Fleck 1980, 148) Dies zeigt, das Schulbücher im Erkenntnisprozess von Wissenschaft zwar eine dedizierte, aber vielleicht nicht klar fassbare, nach bestimmte objektiven Regeln funktionierende Rolle spielen. Schulbücher im Allgemeinen und in meinem speziellen Fall die Kapitel über Radioaktivität werden aber zumindest Kuhns Beschreibung von Wissenschaftsgeschichte mehr als gerecht und erfüllen seine und auch Allchins Kritik gerade durch

315 Ein Denkkollektiv ist allgemein eine Gruppe von Menschen, die einen gemeinsamen Denkstil besitzen und auf Grund dessen überindividuelle, solidarische Ideen entwickeln, gemeinsame Ziele verfolgen und Werte vertreten. Wissenschaftliche Denkkollektive verschiedener Größen, Zusammensetzungen, Ausrichtungen und Anzahl bilden zusammen mit gebildeten Laienwissenschaftlichen als Summe die wissenschaftliche Allgemeinheit. Ein aktuelles Beispiel für so ein Denkkollektiv wären die Anhänger und Vertreter des fachdidaktischen Konzepts des Karlsruher Physikkurses (KPK) als Untergruppe aller Physikdidaktiker. Deren Denkstil zeichnet sich durch den Aufbau eines absoluten Meinungssystems bezüglich der Vermittlung von Inhalten und deren Erklärungsmuster aus und schafft auf Grund der herrschenden Denksolidarität innerhalb des Kollektivs eine suggestive Kraft, die über ihre notwendige, aber vielleicht auch unvollständige innere logische Konsistenz mittels einer Beharrungstendenz hinwegtäuschen kann. Dieses Kollektiv und deren Denkstil wird durch die Allgemeinheit der physikdidaktisch Forschenden toleriert und legitimiert. Bezüglich des KPK-Denkstils verfügen aber Personen, die nicht Teil des KPK-Kollektivs sind nur über ein verallgemeinertes, vereinfachtes Wissen über den Karlsruher Physikkurs im Vergleich zu den Spezialisten innerhalb des Kollektivs. Aber gerade die Nichtmitglieder des Kollektivs produzieren dadurch eine öffentliche, populäre Meinung über das Denkkollektiv. Die Mitglieder des Kollektivs treten wiederum dieser öffentlichen Meinung entgegen und nutzen diese u.a. als Ressource für deren Legitimation und den intrakollektiven Denkverkehr, vgl. Fleck 1980, XXXIV ff.

den oft einführenden und motivationalen Charakter historisch orientierter Passagen in einer besonderen Weise. Kuhn geht sogar soweit, dass er behauptet, Schulbücher seien für die Vermittlung von Wissenschaftsgeschichte gänzlich ungeeignet (Kuhn 2012 [1962], 137). Allchin entschärft diese Beschreibung durch die Abgrenzung von "false history" zu "Pseudohistory":

Pseudohistory, like pseudoscience, uses facts selectively and so foster misleading images – in this case, about the nature of science. [...] While based on real historical events, they are deeply misleading. They contribute to unwarranted stereotypes and false ideas about *how science works*. (Allchin 2004,179f)

Gerade die Geschichte der Radioaktivitätsforschung in Schulbüchern bedient oft diese Kriterien vor allem in Richtung der selektiven Auswahl von historischen Randdaten, die zwar historisch nicht falsch sind, aber ein trügerisches Bild über physikalische Forschung liefern. Darunter fällt insbesondere die Heroisierung der Protagonisten, das Festigen von über bekannten Stereotypen NaturwissenschaftlerInnen und die vermeintliche Linearität von wissenschaftlicher Entwicklung, die durch diese weit verbreitete Art von Schulbuchdarstellung inszeniert wird³¹⁶. Auf dieser wissenschaftsphilosophisch und -geschichtlich sehr wackeligen Basis des Schulbuchs scheint eine historisch orientierte Thematisierung des Geiger-Müller Zählrohrs schwierig, wenngleich auch Lehrkräfte das Schulbuch mehrheitlich zur Unterrichtsvorbereitung nutzen (Merzyn 1994, Härtig et al. 2012 sowie Abschnitt III.4.5). Auf Grund der schon genannten Vorteile eines historischen Zugangs hinsichtlich der vielfältig möglichen Schwerpunktsetzungen und der hohen Popularität der Geschichte der Radioaktivitätsforschung im Schulbuch scheint ein solches Vorgehen dennoch möglich, aber nicht mit dem Schulbuch als alleiniger Informationsquelle. Die Nutzung des Konzepts der Nature of Science im Zusammenhang mit der vorliegenden wissenschaftshistorischen Studie über das Geiger-Müller Zählrohr soll eine sich gegenseitig stärkende, symbiotische

316 Gerade beim Thema Radioaktivität wird anscheinend oft versucht das Stereotyp des

wissenschaftshistorisch vorgebildeten Lehrkräften. Nach Allchin (2004) wäre hier die

Grenze von pseudohistory zur false history überschritten.

ausschließlich männlichen Naturwissenschaftlers durch die vermeintlichen Rollenvorbilder Marie Curie und Lise Meitner zu entkräften. Explizit erwähnt wurde zumindest Marie Curie in den Interviews mit Frau Noether, Frau Bassi, Herrn Dalton und Herrn Kepler. Zwei dieser Lehrkräfte haben dabei angegeben, dass sie gerade Marie Curie thematisieren, weil es einerseits viel biographisches Material (Buch und Film) über sie gibt und sie andererseits die erste Frau im Wissenschaftsbetrieb und die erste Physikprofessorin gewesen sei (Herr Dalton) oder weil man anhand ihrer Person auch die Mädchen im Unterricht ansprechen könne (Herr Kepler). Solche wissenschaftshistorisch nicht tragfähigen Charakterisierungen von Marie Curie kamen jedoch in dieser Studie erstaunlicherweise ausschließlich von den

Beziehung zur Vermittlung prozessbezogener Kompetenzen im Physikunterricht bilden³¹⁷.

2. Der Begriff Nature of Science im Kontext des Zählrohrs

Wissenschaftsgeschichte und das Konzept der Nature of Science (NoS) stehen nicht notwendigerweise in einem sich gegenseitig bedingenden Verhältnis. Die Wissenschaftsgeschichte bietet den Vorteil, dass nutzbare historische Fallstudien bereits erarbeitet worden sind. Eine Vielzahl dieser Arbeiten wurde für den Physikunterricht auch bereits explizit nutzbar gemacht³¹⁸. Ergänzend zu fachphysikalischen Inhalten wird durch das Unterrichten über NoS eine Außensicht auf Physik und physikalische Forschung vermittelt. Dabei ist der notwendige Transfer von einer Innen- zu einer Außensicht auf das System 'Physikalische Forschung' bereits durch einen Wissenschaftshistoriker geschehen. Kenntnisse über Forschungsprozesse in der Physik sind ein wesentlicher Baustein für die geforderte Kompetenz, wonach SchülerInnen sich an aktuellen gesellschaftlichen Diskursen im Kontext von fachwissenschaftlicher Forschung beteiligen können sollen. Historische fachphysikalische Forschung als Gegenstand zu nehmen hat hier den Vorteil, dass Wissenschaft als Prozess in einer retrospektiven Betrachtungsweise an ausgewählten Beispielen leichter zu vermitteln ist, als durch die Diskussion aktueller Forschung, z.B. am CERN in der Schweiz (Frercks 2012).

Nach McComas und Allchin sind folgende Thesen die wesentlichen Aspekte der Wesensart von Naturwissenschaften:

317 Natürlich ist es auch denkbar auf Basis einer historischen Herangehensweise an das

Zählrohr auch explizit die technischen Details des Instruments zu thematisieren oder jene in gleicher Weise komplett außen vor zu lassen und das Zählrohr als Black-Box zu behandeln. ³¹⁸ z.B. Allchin 2013, Heering et al. 2012, Hößle et al. 2004, Höttecke et al. 2012. Zu Schülervorstellungen siehe: Höttecke 2001b. Für eine kritische Auseinandersetzung mit Wissenschaftsgeschichte im Physikunterricht siehe Frercks 2012.

- Obwohl naturwissenschaftliche Erkenntnisse dauerhaft sind, haben sie einen vorläufigen [, aber dennoch zeitlich begrenzten reliablen und validen, SK] Charakter.
- 2. Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sind erheblich, aber nicht gänzlich, auf Beobachtung, experimentelle Beweise, rationale Argumente und Skeptizismus angewiesen.
- 3. Es gibt nicht einen [bzw. *den*, SK] Weg oder eine Schritt-für-Schritt Methode Naturwissenschaften zu betreiben, sondern eine Vielzahl von Methoden.
- 4. Naturwissenschaften sind der Versuch natürliche Phänomene zu erklären.
- 5. Gesetze und Theorie dienen unterschiedlichen naturwissenschaftlichen Zwecken. Daher muss bewusst sein, dass Theorien auch nicht durch zusätzliche Belege zu Gesetzen werden.
- 6. Menschen aller Kulturen tragen zu naturwissenschaftlicher Forschung bei.
- 7. Neue Erkenntnisse müssen offen und klar kommuniziert werden.
- 8. NaturwissenschaftlerInnen benötigen exakte Aufzeichnungen, "peer review" und reproduzierbare Erkenntnisse.
- 9. Beobachtungen beruhen auf Theorien [und experimentelle Ergebnisse verlangen eine Interpretation, SK]
- 10. NaturwissenschaftlerInnen sind kreativ [, z.B. in Sachen Hypothesenbildung, Experimentalaufbauten, Modellbildung,... SK].
- 11. Wissenschaftsgeschichte enthüllt den evolutionären und revolutionären Charakter der Naturwissenschaften.
- 12. Naturwissenschaften sind Teil von sozialen und kulturellen Traditionen.
- 13. Naturwissenschaften und Technik beeinflussen einander wechselseitig.
- 14. Naturwissenschaftliche Ideen sind durch ihr soziales und historisches Milieu beeinflusst.
- 15. Naturwissenschaftliche Konzeptwechsel erfolgen graduell.

Abbildung 87: Grundzüge der Nature of Science / Wesensart der Naturwissenschaften³¹⁹, nach McComas et al. 1998, 6f. mit Ergänzungen von Allchin 2013, 13f (Punkt 15), meine Übersetzung.

Die wissenschaftshistorische Fallstudie über die Entwicklung des Geiger-Müller Zählrohrs hat einige Aspekte offen gelegt, die eine Vielzahl der in Abbildung 87 genannten Thesen über die Wesensart der Naturwissen-

. _ .

³¹⁹ Bemerkenswert ist hier, dass im Kerncurriculum des Landes Niedersachsens sechs "Merkmale der Fachwissenschaft Physik" formuliert sind. Physik sei demnach eine "theoriegeleitete Erfahrungswissenschaft", sie "betrachtet die Natur unter bestimmten Aspekten", sie "hat einen hohen Grad an Formalisierung und Mathematisierung", sie "entwickelt ein spezifisches Methodenrepertoire", sie "hat starke Anwendungsbezüge und hohe gesellschaftliche Relevanz" und sie "unterliegt einem historisch-dynamischen Prozess" (Kultusministerium 2009, 7). Die Vermittlung dieser Merkmale sei vor allen Dingen Ziele für den Unterricht in der gymnasialen Oberstufe. Im Wesentlichen lassen sich diese sechs Merkmale in den fachdidaktisch etablierten Aspekten der Nature of Science wiederfinden. Sie sind aber zu unspezifisch und weisen nicht vertretbare Auslassungen auf. Die von WissenschaftlerInnen und vielen Lehrkräften und SchülerInnen negativ konnotierte Eigenschaft des vorläufigen Charakters von Erkenntnissen in den Naturwissenschaften (Punkt 1 in Abbildung 87) taucht beispielsweise nicht auf. Dagegen wird die Fähigkeit der Mathematisierung im Kerncurriculum gar als "innerfachliche Notwendigkeit" und "wesentlicher Bestandteil des vom Physikunterricht zu erbringenden Bildungsbeitrages" (Kultusministerium 2009, 8) angesehen, was in den in der Fachdidaktik etablierten NoS-Aspekten keine Rolle spielt.

schaften illustrieren. Um diese Thesen zu erläutern, kann man die Fallstudie hinsichtlich der *NoS*-Aspekte kurz in Teilen rekapitulieren³²⁰.

2.1 Fakt oder Artefakt?

Spätestens seit 1908 existierten mehrere, dem späteren Geiger-Müller Zählrohr sehr ähnliche Geräte, die bei entsprechender baulicher Größe und Beschaltung ständig Messergebnisse lieferten, die nicht erklärt werden konnten. Die Verlässlichkeit dieser elektrischen Zählgeräte für die Messung von radioaktiver Strahlung (darunter auch Geigers Spitzenzähler von 1913) wurde daher im Vergleich zu der etablierten, optischen Szintillationsmethode oft in Frage gestellt (vgl. Abschnitt II.4.5 und II.4.6). Auch Geiger und sein damaliger Chef Ernest Rutherford schrieben 1908, dass "natürliche Störungen" aufträten, die eine Messung unmöglich machten (Rutherford & Geiger 1908b). Sie beobachteten aber, dass die Polarität der Spannung sowie eine mögliche Kontamination des Gehäuses eine Ursache für diese Messartefakte sein könnten. Wurde das Gehäuse der Ionisationskammer nämlich auf positives und nicht, wie üblich, auf negatives Spannungspotential gelegt und die Dimensionen des Zylinders entsprechend klein gewählt, reduzierten sich die nicht erklärbaren Spannungsimpulse auf ein Minimum oder verschwanden gänzlich (vgl. Abschnitt II.3.2). Müllers Zählrohr von 1928 brach mit dieser üblichen Vermeidungsstrategie. In Messungen, die er für seine Dissertation durchführte, charakterisierte er schon vor 1928 Gasentladungen in Ionisationskammern nahe des Durchschlagpotentials und prüfte dazu verschiedene Gassorten bei unterschiedlichen Drucken, Spannungen und Polaritäten. Er tangierte dabei zwangsläufig die Parameter, bei denen eine Ionisationskammer als Geiger-Müller Zählrohr funktioniert. Die dort ebenfalls auftretenden und nicht erklärbaren 'wilden', 'natürlichen' oder 'spontanen' Ausschläge in den hohen Spannungsregionen deutete auch Müller zunächst als Artefakte der Apparatur. Nach erfolgreicher Promotion griff er diese Messungen in der vorlesungsfreien Zeit im April 1928 erneut auf. Entgegen der etablierten Praxis der Vermeidung solch störender Messimpulse versuchte Müller ihnen näher auf den Grund zu gehen und stellte eine zeitliche Konstanz der Zählrate fest. Als Geiger das Instrument und die ersten Zählungen inspizierte, zeigte er sich sofort begeistert von dem neuen Instrument. Er führte die Ursache der Messereignisse auf die bislang nur postulierte Höhenstrahlung auf Meeresniveau zurück. Eine solche durchdringende Strahlung würde die Messereignisse mit dem Zählrohr erklären. Müller konnte seine neue, alte Apparatur soweit stabilisieren, dass

³²⁰ Zu Kapitel II redundante Passagen sind auch bei dieser gerafften Form der Darstellung der *NoS*-Charakteristika unumgänglich. Details der jeweiligen Aspekte sind in den Querverweisen auf die Abschnitte in Kapitel II nachzulesen. Quellennachweise sind nicht gedoppelt und an entsprechender Stelle in den ursprünglichen Abschnitten zu finden.

sie reproduzierbare Ergebnisse für Messungen nicht nur von α - und β -, sondern auch von γ -Strahlung von geringer Intensität lieferte. Noch bevor er zusammen mit Geiger intensive Untersuchungen zur Höhenstrahlung auf Meeresniveau anstellte, wies er so die lange vermutete, aber bis 1928 noch nicht experimentell belegte γ -Aktivität von Kalium an nur wenigen Gramm Kaliumchlorid nach (vgl. Abschnitt II.4.1). An diesem Beispiel lassen sich mindestens drei Aspekte von *Nature of Science* thematisieren.

"Beobachtung und Theorie, Experiment und Interpretation"

Müllers Beobachtung der konstanten Zählrate respektive seine zunächst ungewöhnlichen experimentellen Ergebnisse benötigten eine tragfähige Theorie, die seine Messungen erklären konnte (Punkt 9 in Abbildung 87). Gemeinsam mit Geiger re-interpretierte Müller die vormals störende Artefakte als ein tatsächliches Zählereignis. In ihrer ersten gemeinsamen Publikation kann man lesen:

Die Empfindlichkeit des Zählrohrs ist erstaunlich. Stellt man ein Zählrohr von größerer Oberfläche ohne besonderen Strahlungsschutz in einem Zimmer auf, so zeigen sich Hunderte von Ausschlägen in der Minute, die von der Höhenstrahlung, von der Strahlung der Zimmerwände, des Erdbodens usw. herrühren. (Geiger & Müller 1928b, 617)

"Erkenntnis ist vorläufig, aber langlebig"

Sie ordneten ihre experimentellen Ergebnisse in die aktuelle Diskussion zur Höhenstrahlungsforschung ein. Den Grund für die Zählimpulse in natürlicher Umgebungsstrahlung zu suchen und die Ausläufer der Höhenstrahlung auf der Erdoberfläche miteinzubeziehen, lieferte das theoretische Fundament für die Erklärung der experimentellen Resultate. Die Umdeutung dieses schon mindestens seit 1908 bekannten Phänomens zeigt zusätzlich, dass naturwissenschaftliche Erkenntnisse immer tentativen Charakter haben, aber trotzdem von der Fachwissenschaft anerkannt sind (Punkt 1 in Abbildung 87).

Auf technischer Ebene kann man diesen Punkt zusätzlich unterfüttern. Trifft radioaktive Strahlung in Form von β -Teilchen oder γ -Strahlung auf das Zählrohrgehäuse, wird ein Elektron aus dem Gehäusematerial ausgelöst und kann in den evakuierten Zählrohrinnenraum gelangen. Dort löst es die charakteristische Entladungslawine aus. Die dadurch verursachten Spannungseinbrüche am Zählrohr wurden von Müller zunächst optisch ausgezählt. Jeder Spannungsimpuls verursachte eine kleine Auslenkung eines dünnen Elektrometerfadens, der über eine Mikroskop-Optik betrachtet wurde. Müller bestimmte die Zeit, in der eine vorher festgelegte Anzahl an solchen Ausschlägen erreicht wurde, also z.B. 100 Ausschläge in 154 Sekunden. Besonders bei Abschirmungsversuchen mit Eisen und Blei, die für den Nachweis der vermuteten Höhenstrahlung notwendig waren, dauerte es

mitunter mehr als nur 154 Sekunden bis 100 Ausschläge erreicht wurden. Zur Vereinfachung der Messung konstruierte Müller eine einfache Röhrengesteuerte, automatische Zählvorrichtung mit einem Messschreiber. Anstelle des Ausschlags am Fadenelektrometer verursachte nun ein Spannungsimpuls die Schaltung eines Relais. Auf einem schnell laufenden Messtreifen wurden dadurch Peaks erzeugt, die nachträglich ausgezählt werden mussten (Abbildung 86, S. 188).

"Naturwissenschaft und Technologie beeinflussen sich gegenseitig"

Betrachtet man die Nachbildung dieses Messstreifens, stellt sich die Frage, wann und wie ein Ausschlag des Fadenelektrometers oder ein Peak auf einem Messstreifen als Messereignis interpretiert werden kann und nicht als etwas, was von der Schaltung oder sonstigen Störeinflüssen herrührt. Das von Müller wenige Monate nach der Entwicklung des Zählrohrs ergänzte automatische Zählwerk als Prototyp der Anzeigen heutiger Instrumente, vermittelt den Anschein einer eindeutigen Zählbarkeit von Ereignissen. Es überdeckt aber lediglich die notwendige Interpretation der Beobachtungen, die nun automatisch anhand eines voreingestellten Schwellenwertes vorgenommen wurde. Die geringfügige technologische Erweiterung der Messapparatur zog folglich einen grundlegenden Wandel der empirischen Vorgehensweise mit sich, in denen die Expertise subjektiver Einschätzungen zugunsten einer objektiven statistischen Automatisierung wich sowie die zeitintensive Annäherung an die tatsächliche aufgetretene Anzahl von Ereignissen einer zeitökonomischen Abschätzung des wahrscheinlichen Mittels. Technologie nimmt spätestens an dieser Stelle entscheidenden Einfluss auf experimentelle Resultate von Naturwissenschaft. Gleichzeitig waren es aber der erkenntnistheoretische Prozess der Verstehens der Funktionsweise des Zählrohrs, der diesen Schritt zur Automatisierung der Zählung erst erlaubte (Punkt 13 in Abbildung 87).

2.2 Geigers Werk und Müllers Beitrag?

"Aufzeichnungen, peer review und Reproduzierbarkeit"

"Kreativität"

"Offene Kommunikation"

In der wissenschaftshistorischen Analyse in Kapitel II wird ebenfalls deutlich, wie Geiger und Müller ihre Arbeit protokollierten. Neben einem gemeinschaftlichen Laborbuch und diversen Briefwechseln von Geiger mit Dritten ist der Großteil an zur Verfügung stehenden primären Quellen von Walter Müller verfasst worden. Müllers Laborbücher sind ein Zeugnis der notwendigen kreativen Entwicklungsarbeit, die er zum Zählrohr beigetragen

hat (Punkt 10 in Abbildung 87). Ein Beispiel dafür wäre die durch den Nachbau der Zählrohre offen gelegte Dichtungsproblematik der frühen Zählrohre sowie dessen Lösung durch immer elaboriertere Zählrohrdesigns (vgl. Abschnitt II.4.11 und II.5). Sichtbar für die fachwissenschaftliche Öffentlichkeit waren dahingegen nur die fünf Publikationen, die unter beider Namen veröffentlicht wurden. Obwohl Müller nach eigener Aussage keinen direkten Einfluss auf den Inhalt dieser Artikel hatte, sind alle Diagramme, Skizzen und Versuchsergebnisse vorwiegend in seinen Laborbüchern zu finden (vgl. Abschnitt II.4.4). Trotz dieser vermeintlichen Transparenz der Forschung nach außen war es nur wenigen Außenstehenden möglich ein Zählrohr auf Basis dieser Artikel nachzubauen, zu betreiben oder gar für Experimente zu nutzen, die Geigers und Müller Resultate gestützt hätten. Dieser Umstand erfüllt zwar die Notwendigkeit von Aufzeichnungen und der Möglichkeit der innerfachlichen gegenseitigen Kontrolle ("peer review"), widerspricht aber in exemplarischer Weise der Forderung nach reproduzierbaren Ergebnissen bzw. einer offenen und Kommunikation darüber (Punkt 7 und 8 in Abbildung 87). Grund dafür war eine explizite Geheimhaltungspraxis. Details über Konstruktion und Handhabung des Zählrohrs wurden nur in Ausnahmefällen mit engen Vertrauten (vornehmlich ehemalige Kollegen von Geiger) geteilt. Die Weitergabe des größtenteils 'stillen', nicht allein durch kommunizierbaren Wissens, geschah dabei in Form von fertigen, funktionsfähigen Zählrohren und der praktischen Arbeit vor Ort in Kiel im Labor (vgl. Abschnitt II.6). Die Geschichte des Geiger-Müller Zählrohrs liefert damit ein Indiz, dass zumindest das von McComas formulierte und von Allchin bekräftigte NoS-Kriterium der offenen Kommunikation keineswegs ein allgemeingültiges und reales Kriterium ist, sondern eher eine wünschenswerte Maxime darstellt, nach der Wissenschaft funktionieren sollte, aber es nicht zwangsläufig muss³²¹.

An die Stelle der notwendigen Reproduzierbarkeit von Forschungsergebnissen tritt Geigers Einfluss und seine Reputation auf dem Gebiet der

Der damit zusammenhängende NoS-Aspekt ist damit aber nicht notwendigerweise auch entkräftet. Fleck schreibt, dass die innerwissenschaftliche, gegenseitige Überprüfung von Erkenntnis zwar als "demagogisches Postulat offiziell gefordert ist", aber einerseits in der Regel innerhalb eines Denkkollektivs geschieht und andererseits nur hinsichtlich der Konformität mit dem vertretenden Denkstil, vgl. Fleck 1980, 158. Die Überprüfung auf Stilgemäßheit wird das Zählrohr trotz fehlender Offenheit wohl Stand gehalten haben, da das Denkkollektiv der experimentell arbeitenden Radioaktivitätsforschenden auf Grund ähnlicher Erfahrungen mit den Zählrohrvorgängern experimentelle und apparative Schwierigkeiten gewöhnt war. Man könnte fast behaupten, dass Fehlschläge mit den entsprechenden elektrischen Zählmethoden in diesem Fall stilbildend waren und so auch das Geiger-Müller Zählrohr eine Tradition fortsetzte. Da die Lösung dieser apparativen Probleme im Kollektiv selbst stets gefunden, entwickelt oder weitergegeben wurden, ist es nicht erstaunlich, dass auch das 'nicht-offen' kommunizierte Zählrohr der peer review Stand gehalten hat.

Experimentalphysik. Durch seine Arbeit mit Rutherford und später als Leiter der Radioaktivitätsforschung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt sowie durch die Entwicklung des Spitzenzählers war er einer der namhaftesten Persönlichkeiten der damaligen Experimentalphysik. Sein Ansehen und Status waren die Faktoren, welche die schnelle Akzeptanz des Zählrohrs trotz fehlender Reproduzierbarkeit von dritter Seite positiv beeinflusst haben. Naturwissenschaftliche Erkenntnisse sind also mitunter von deren Protagonisten, eigener Vorteilsnahme, sozialen Erwünschtheiten, Hierarchien in der Wissenschaftsgemeinschaft und gesellschaftlichen Verwicklungen abhängig und keinesfalls ausschließlich objektiven Gütekriterien unterworfen.

"Naturwissenschaft im Kontext von sozialen und kulturellen Traditionen"

Laut Müllers zeitgenössischen Briefen an seine Eltern war das sehr traditionell-hierarchische Arbeitsverhältnis zwischen Geiger und Müller etwa ein Jahr nach der Entwicklung des Zählrohrs trotz des großen Erfolges sehr angespannt. Müller fühlte sich gegenüber anderen, weniger erfahrenen Kollegen in Bezahlung und Position und von Geiger in Bezug auf Ansehen und übergangen (vgl. Abschnitt II.2.3). Geigers nationale internationale Reputation auf dem Gebiet der experimentellen Radioaktivitätsforschung trug ebenso wie Müllers experimentelle Entwicklungsarbeit zur Etablierung des Geiger-Müller Zählrohrs bei und bescherte Geiger nach Müllers Einschätzung einen Ruf auf den vakanten Lehrstuhl für Experimentalphysik in Tübingen³²². Müller beendete hingegen wegen des schlechten Übernahmeangebots von Geiger verärgert im September 1929 seine Universitätskarriere. Diese Entscheidung führte unter anderem dazu, dass in dem schnell von der scientific community zum "Geiger-Müller'schen Zählrohr' umgetauften Instrument das 'Müller' recht schnell verschwand. Müller selbst schrieb dazu später sarkastisch, dass jüngere Herren' mit weniger als zehn tadelsfreien Dienstjahren wohl keine eigenen Schlussfolgerungen aus ihren Experimenten ziehen dürften und diese Aufgabe offensichtlich dem vorgesetzten Professor obliege. Er schrieb 1956 weiter an Wildhagen, dass er außer "schäbigstem Neid" nichts von der Erfindung des Zählrohrs gehabt habe (Punkt 12 in Abbildung 87). Die offensichtliche und auch an Müller selbst gerichtete Frage nach der Urheberschaft hat Müller retrospektiv diplomatisch beantwortet: Geiger und

³²² In der Berufungsunterlagen zur Besetzung der Professur von Walther Gerlach kann man lesen, dass Geiger auf Grund seiner Expertise im Gebiet der Experimentalphysik, der Entwicklung des Spitzenzählers und seiner Erfahrung in der Hochschullehre, vor allem im physikalischen Praktikum und in Vorlesungen, auf Platz Nr. 1 der Berufungsliste stand, vgl. Swinne 1988, 59.

er hätten "nach gutem Brauch" beide als Erfinder zu gelten, da man eine gemeinsamen Arbeit nachträglich nicht in einzelne individuell zuzuschreibende Aspekte trennen könne.

"Naturwissenschaften und Wissenschaftsgeschichte"

Ein letzter, aber eher allgemeingültiger Aspekt von Nature of Science ist die Fallstudie zum Zählrohr selbst. Die wissenschaftshistorische Analyse des Geiger-Müller Zählrohrs in Kapitel II hat die Genese des späteren "Wachhund des Atomzeitalters' unter bestimmten Gesichtspunkten beleuchtet. Ergebnis war u.a. die Darstellung der Evolution der verschiedenen elektrischen Zählmethoden der Radioaktivitätsforschung zwischen 1908 und 1928 sowie deren Verbindungen untereinander. Daran konnte exemplarisch gezeigt werden, welchen revolutionären Charakter das Zählrohr beispielsweise für die damalige Höhenstrahlungsforschung hatte (Punkt 11 in Abbildung 87). Anhand dieser NoS-Aspekte können Schüler in einem derartig orientierten Physikunterricht an Stelle einer idealisierten und linearen (quasi Kuhn'schen) Schulbuch-Wissenschaft eine von Persönlichkeiten, Traditionen, sozialen Abhängigkeiten, Hierarchien, Fehlschlägen und Irrwegen geprägte, lebendige Wissenschaft kennenlernen. Ein Unterricht über die Wesensart von Naturwissenschaften im Sinne der prozessbezogenen Kompetenzen anstatt ausschließlich über fachwissenschaftliche Inhalte ermöglicht es SchülerInnen physikalische Forschung im Kontext einfacher zu verstehen. Um den Transport dieser Inhalte in den Schulunterricht zu ermöglichen, wurde eine Fortbildung mit Lehrkräften von mir organisiert und durchgeführt.

3. Die Fortbildung

Die Fortbildung war auf insgesamt vier Stunden angelegt. Meine Intention war die Schaffung einer symbiotischen Arbeitsatmosphäre: Die Aufgabe der teilnehmenden Lehrkräfte war die grobe Skizzierung von Geiger-Müller Unterrichtsepisoden zum Zählrohr auf verschiedensten Materialien, die ich zur Verfügung gestellt und referiert habe. Während ich so die Praxiserfahrung der Lehrkräfte nutzen konnte, war es den Lehrkräften wiederum möglich auf meine Expertise und Originalquellen in Bezug auf die wissenschaftshistorische Analyse zurückzugreifen. Ein Teil der Lehrkräfte hat zusätzlich zur Fortbildung an der umrahmenden Studie teilgenommen (vgl. Abschnitt III.4).

3.1 Das Konzept

Der erste Teil der Fortbildung bestand aus einer Vorstellungsrunde und der individuellen Schilderung der bisherigen unterrichtlichen Erfahrungen mit Physikgeschichte sowie einer Formulierung der Erwartungshaltung an die Fortbildung durch die Teilnehmenden. Ein Fokus lag dabei natürlich auf dem Themengebiet der Radioaktivität und dem bisherigen Einsatz des Geiger-Müller Zählrohrs im Physikunterricht. Anschließend konnten die Teilnehmer über ihre und die aus Sicht der Schüler bestehenden Schwierigkeiten speziell beim Thema Radioaktivität erzählen. Ergänzend dazu habe ich die Nature of Science Elemente zur Diskussion gestellt, die mir von den befragten Lehrkräften der Studie im Vorfeld in den Prä-Interviews genannt worden sind. Dies hat den zweiten Teil der Fortbildung eingeleitet. Darin habe ich vorwiegend über Unterrichtsvorbereitung von Lehrkräften und zur Unterrichtsmaterialien zum Verfügung stehenden Unterricht Radioaktivität referiert. Eine Grundlage waren diesbezügliche fachdidaktische Studien (Härtig et al. 2012, Merzyn 1994). Dabei hat sich herausgestellt, dass Physiklehrkräfte vorwiegend auf das Schulbuch als Quelle für die Unterrichtsvorbereitung zurückgreifen. Gerade in den Schulbuchkapiteln zur Radioaktivität trifft man aber auf einen sehr hohen Anteil an geschichtlichen Zusatzinhalten im Vergleich zu anderen Kapiteln. Die schon in Abschnitt III.1 erörterten Probleme mit deren Darstellung wurden dabei ebenfalls thematisiert. Für die Fortbildung wurde aber gerade Umstand instrumentalisiert, da anscheinend beim Radioaktivität auch von Seiten der Schulbuchverlage eine Tradition von geschichtlichen Inhalten gepflegt wird, die auch schon in den Unterricht der Teilnehmenden teilweise eingebunden worden ist. Aus dieser Warte heraus wurde der Unterrichtsgegenstand Nature of Science motiviert, erläutert und

in den Kontext von Kerncurriculum, Unterrichtspraxis (HIPST³²³, S@TM³²⁴) und Wissenschaftsgeschichte gestellt (vgl. Abschnitt III.2). In der dritten Phase der Fortbildung habe ich die Entwicklungsgeschichte des Zählrohrs auf Basis meiner Analyse vorgestellt. Der Inhalt entspricht im Wesentlichen dem der Abschnitte III.2.1 und III.2.2 (bzw. dem von Korff 2012b), jedoch ohne explizite Hinweise auf die enthaltenen Aspekte von Nature of Science zu geben. Geschlossen hat diese Phase mit der Präsentation des YouTube-Videos über den Prozess des Nachbaus (vgl. Abschnitt II.5). Nach einer kurzen Diskussion wurde der theoretische Input mit dem Gang in die Pause beendet. Der zweite Teil der Fortbildung war der Generierung von Unterrichtsinhalten auf Basis der vorangegangenen Input-Phase gewidmet. Dazu habe ich Quellenmaterial zur Verfügung gestellt, welches ich nach Rückmeldungen der Teilnehmenden didaktisch reduziert habe. Dabei habe ich vor allem fachsprachliche Inhalte umgeschrieben bzw. vereinfacht und den Umfang der Texte reduziert³²⁵. Nach einer allgemeinen Diskussion der unterrichtlichen Möglichkeiten haben sich Kleingruppen zusammen gefunden, die ähnliche inhaltliche Vorstellungen hatten, um ihre Ideen zu präzisieren. Nach dieser Phase wurden die Skizzen im Plenum vorgestellt und erörtert, welche NoS-Aspekte durch den gewählten Zugang thematisiert werden könnten. Eine gemeinsame Reflektion sowie die Evaluation mit dem Post-Fragebogen bildeten den Schluss der Fortbildung.

3.2 Die Ergebnisse

Die Erwartungshaltung von Gruppe A

Am Anfang der Fortbildung haben die teilnehmenden allgemeinbildenden Lehrkräfte (Gruppe A) konstatiert, dass der Themenbereich Radioaktivität und Atomphysik sowohl für die Schüler, als auch für die Lehrer besondere Herausforderungen birgt. Das Thema sei vor allen Dingen im Vergleich zu anderen sehr langweilig. Dies läge insbesondere an der geringen Anschaulichkeit der behandelten Aspekte rund um das Atom sowie an dem Fehlen von geeigneten Demonstrations- und Schülerexperimenten. Die

³²³ Das **HI**story and **P**hilosophy in **S**cience **T**eaching Projekt (HIPST) wurde von 2008-2010 von 11 Partneruniversitäten in Europa und Israel durchgeführt. Ziel war unter anderem die Entwicklung von unterrichtlich nutzbarer Fallstudien anhand derer Aspekte von Wissenschaftsgeschichte und -philosophie thematisiert werden können, vgl. Höttecke 2012, 214 ff sowie http://www.hipst.eu (07.05.2014).

³²⁴ Das Akronym S@TM (Storytelling @ Teaching Model) beschreibt ein im Februar 2014 abgeschlossenes EU-Projekt, dass sich der Einbettung von Wissenschaftsgeschichte in den naturwissenschaftlichen Unterricht der Fächer Biologie, Chemie und Physik durch einen narrativen Ansatz gewidmet hat und an dem u.a. die *Abteilung Physik und ihre Didaktik und Geschichte* der Universität Flensburg mitgearbeitet hat, vgl. http://science-storytelling.eu/de (02.04.2014).

³²⁵ Die redigierten Quellen sind in Anhang D zu finden.

Bandbreite erstrecke sich dabei von speziellen organisatorischen Aspekten, wie dem Fehlen von Zählrohren und radioaktiven Präparaten samt einer mit dem Strahlenschutz beauftragten Lehrkraft, bis hin zu allgemeinen Vermittlungsschwierigkeiten. Schüler hätten zudem oft gefährliche Vorurteile und eine unbegründete Angst, die zu den Vorbehalten beim Thema Elektrizitätslehre starke Ähnlichkeiten aufweise. Die Erwartungshaltung der Teilnehmenden an die Fortbildung war daher ebenso vielschichtig. Neben einem Erfahrungsaustausch untereinander, zeigten sie sich generell am Thema *Nature of Science* interessiert und erhofften sich neue Ideen und Anregungen für die Unterrichtseinheit zur Radioaktivität.

Die Arbeit mit Originalquellen

In der Arbeitsphase haben die Teilnehmenden in Kleingruppen zwei Unterrichtsszenarien entwickelt, die jeweils einen oder mehrere Aspekte von Nature of Science thematisieren. Den elaborierteren der beiden Vorschläge möchte ich hier kurz skizzieren. Die zugehörige Gruppe hat die kreative Arbeit mit den Originalquellen favorisiert und zwei mögliche Arbeitsaufträge konstruiert. Dabei nimmt der eine die zeitgenössische Situation um 1928 aus Sicht des jungen Müller in den Fokus und der zweite die Retroperspektive des älteren Müller selbst oder auf sein Lebenswerk durch eine dritte Person. Für den zeitgenössischen Fall stehen Auszüge aus Müllers Briefen an seine Eltern sowie die Erstveröffentlichung der Ergebnisse von Geiger und Müller 1928 und eventuell der von Müller verfasste Lebenslauf von etwa 1929 zur Verfügung. Die Retroperspektive kann sich ebenfalls Müllers Lebenslauf sowie einem Brief zwischen Müller an Eduard Wildhagen um 1960 bedienen. Außerdem kann ein Briefwechsel von Erich Vincke an Erik Jorpes als Aufhänger genutzt werden. Vincke schlägt hier Müller dem Nobel-Komitee-Mitglied Jorpes als Kandidat für einen halben Nobelpreis vor, erhält aber eine höfliche Absage. Beide Arbeitsaufträge verwenden die Methode des kreativen Schreibens. Schon allein die Methodenwahl bricht mit den im Regel-Physikunterricht praktizierten Zugängen und dürfte eine angenehme Abwechslung für SchülerInnen und Lehrkraft darstellen. Zwei Arbeitsaufträge wurden von den Teilnehmenden favorisiert: a) Ein abendliches Gespräch zwischen Müller und seinen Freunden 'historischinformiert' inszenieren. Diese Möglichkeit erscheint sehr tragfähig, da Müller mit seinen 22 Jahren zu der Zeit zumindest in einer Generation mit heutigen SchülerInnen Ende der Sek I/II ist. Eine persönliche Identifikation oder empathische Bindung an seine Person und vielleicht auch seine Probleme und Nöte scheint möglich zu sein. Eine Alternative zu dem Dialog wäre auch das Verfassen eines (inneren) Monologs. b) Eine Laudatio zur Verleihung des Nobelpreises schreiben. Diese Option spielt mit der Möglichkeit, dass Müller (vielleicht durch Vinckes Brief initiiert) einen Nobelpreis erhalten hat. Nun

kann entweder aus der Sicht von Müller eine Dankesrede verfasst werden oder die Lobrede eines fiktiven Laudators, der Müllers Wirken und die Entwicklung des Zählrohrs zusammenfasst. Vorlagen und Inspirationen für solche Reden im Kontext der Nobelpreis-Verleihung sind online verfügbar³²⁶ und auch z.B. durch Arthur Stinner (2010) didaktisch bearbeitet. Alternativ können von Seiten der SchülerInnen auch verschiedene voranstehende Forschungsfragen formuliert werden: Wer war dieser Walter Müller? Warum war die Entwicklung des Geiger-Müller Zählrohrs anscheinend so bedeutend, dass sie einen Nobelpreis verdient haben könnte? Warum wird Geiger nicht auch für diesen Preis vorgeschlagen?327 Hat Müller einen Nobelpreis erhalten? Wie wurde das Zählrohr eigentlich entwickelt? Bis hin zu: Was wird Professor Jorpes seinem Hamburger Kollegen geantwortet haben? Es können sich Kleingruppen bilden, in denen diese Fragen eigenständig mit zur Verfügung gestellten Quellen und selbstständig recherchiertem Material bearbeitet werden können. Hilfestellung im Sinne der Binnendifferenzierung kann durch Tipps und Hinweise zu Inhalt und Form der Briefe, des Rollenspiels oder der Laudatio in verschiedensten Abstufungen bereit gestellt werden³²⁸. Die Einheit könnte mit einer Präsentation und Diskussion der erarbeiteten Werke und der Zuordnung der thematisierten NoS-Aspekte im Klassenverband schließen.

Resultate der Gruppe B

Die Arbeitsphase mit den Berufsschullehrkräften (Gruppe B) hat einen anderen Verlauf genommen. Die von mir intendierten und aus allgemeinbildender Sicht gut begründbaren Inhalte sind bei dieser zweiten Gruppe von Teilnehmenden nicht gut angekommen. Die Arbeitsphase wurde daher eher für eine Diskussion von historisch-orientiertem Unterricht im Allgemeinen genutzt. Dabei stellte sich heraus, dass diese Gruppe von Lehrkräften den Aspekt der beruflichen Bildung allen anderen unterrichtlichen Aspekten strikt überordnen. Aus der handwerklichen Perspektive heraus sind die präsentierten Inhalte zwar auf reges Interesse gestoßen, aber bezüglich der Thematisierung von Nature of Science im Physikunterricht war dies nicht der Fall. Der Tenor war, dass historische Inhalte höchstens als Motivation oder Einstieg in ein anschließend streng beruflich orientiertes Themenfeld dienen könnten. Zur Entwicklung von

³²⁷ Hans Geiger verstarb bereits im September 1945. Daher wäre nur eine posthume Verleihung des Nobelpreises möglich, welche aber ausgeschlossen ist. Nur Müller käme zu dem damaligen Zeitpunkt für diese Auszeichnung in Frage.

³²⁶ z.B. jene von Geigers ehemaligem Kollegen und Mitarbeiter Walther Bothe aus dem Jahr 1954 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1954/bothe-lecture.html (13.08.2013)

³²⁸ Siehe zur Methode der gestuften Hilfen für eine detaillierte Einführung: Wodzinski & Stäudel 2009. Für einen kurzen Überblick siehe: Wodzinski 2013.

konkreten Ideen für den Unterricht an einer berufsbildenden Schule ist es daher nicht gekommen.

4. Die empirische Studie

Mit Methoden der qualitativen empirischen Sozialforschung sollte die Resonanz der durchgeführten Fortbildung hinsichtlich der zwei distinkt unterschiedlichen Gruppen von Lehrkräften untersucht werden. Im Folgenden werden die organisatorischen sowie für die Studie relevanten Randbedingungen erläutert. Nach der Darstellung des Konzepts der Prä- und FollowUp Interviews sowie des Post-Fragebogens, werden die Analysewerkzeuge vorgestellt und die damit erzielten Ergebnisse präsentiert und diskutiert.

4.1 Die Randbedingungen und das Forschungsdesign

Insgesamt wurde im Kontext der Studie die Fortbildung zwei Mal mit jeweils einer anderen Population von Lehrkräften durchgeführt. Die erste Gruppe bestand vorwiegend aus eingeladenen LeherInnen, die alle einen mehr oder weniger starken wissenschaftshistorischen Hintergrund aus Lehramtsstudium an der Carl-von-Ossietzky Universität bei Falk Rieß und Peter Heering hatten. In fachdidaktischen Veranstaltungen sind sie alle mit Wissenschaftsgeschichte zumindest in Kontakt gekommen und mit zentralen Konzepten dieser Disziplin auch im Kontext von dessen Einbettung im Physikunterricht vertraut. Einige haben Abschlussarbeiten mit einem wissenschaftshistorisch orientierten Thema verfasst und andere haben nach oder während ihres Studiums für kurze Zeit in der Arbeitsgruppe 'Didaktik und Geschichte der Physik' der Universität Oldenburg mitgearbeitet. Die vierstündige Fortbildung bzw. Intervention wurde im April 2013 in den Räumen der Physikdidaktik in Oldenburg durchgeführt. Insgesamt haben sechs Lehrkräfte (vier Lehrer, zwei Lehrerinnen) an Fortbildung und Studie teilgenommen³²⁹.

Meine eigentliche Intention war die Durchführung der Fortbildung mit einer zweiten Gruppe von Lehrkräften, die auch an allgemeinbildenden Schulen, aber ohne wissenschaftsgeschichtlichen Hintergrund aus dem Studium, unterrichten. Die Leithypothese wäre die Frage gewesen, ob die nichtwissenschaftshistorisch vorgebildeten Lehrkräfte eine Fortbildung mit wissenschaftshistorischem Inhalt in ähnlicher Weise annehmen und ggf. umsetzen, wie die Vergleichsgruppe. Insgesamt sind aber drei Anläufe auf Grund von zu wenig Teilnehmenden in Schleswig-Holstein und in Niedersachsen gescheitert. Durch Zufall wurde ich dann durch den Studienseminarleiter für Physik an berufsbildenden Schulen (BBS) in Schleswig-Holstein gefragt, ob ich meine Fortbildung nicht für BBS-

³²⁹ Ein Berufsschullehrer sowie ein Schüler haben zusätzlich an der Fortbildung, aber nicht an Prä- und FollowUp-Befragung teilgenommen. Deren Post-Fragebogen wurde nicht in die Auswertung mit einbezogen.

Lehrkräfte anbieten könne. Diese Gruppe bestand aus sechs Lehrkräften (fünf Lehrer, eine Lehrerin) mit unterschiedlichsten Werdegängen: vom 'traditionellen' studierten Handelslehrer, über Lehrkräfte mit gymnasialer Ausrichtung des Studiums und Ingenieure mit Aufbaustudium bis zum quereingestiegenen Diplom-Physiker. Ein wissenschaftshistorischer Hintergrund bestand nur in Ansätzen bei einer Person, die durch ihr Aufbaustudium in Flensburg bei Peter Heering mit Grundgedanken von Physikgeschichte bzw. mit historischen Ansätzen bei der Vermittlung von Physik in Kontakt gekommen ist. Die vierstündige Fortbildung wurde Anfang Juni 2013 an der Universität Flensburg durchgeführt. Eine Lehrkraft stand nach der Intervention für die FollowUp-Befragung nicht mehr zur Verfügung. Die Gruppen von Befragten der Studie bestand daher aus (a) eingeladenen Lehrkräften der allgemeinbildenden Sekundarstufe I und II mit explizit wissenschaftshistorischem Hintergrund aus Niedersachsen und (b) einer extern organisierten Gruppe von Lehrkräften an berufsbildenden Schulen in Schleswig-Holstein. Umrahmt wurde die Fortbildung von einem dreistufigen Evaluationsdesign aus einem Prä-Interview wenige Tage vor, einem Post-Fragebogen direkt nach und einem FollowUp-Interview etwa 6 bis 7 Monate nach der Intervention (Abbildung 88).

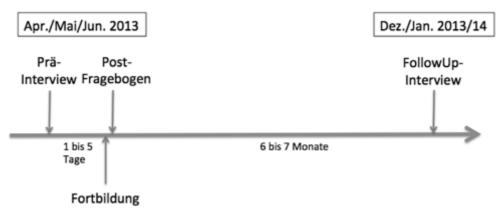


Abbildung 88: Ablauf der dreistufigen Evaluation der Fortbildung im Jahr 2013/4.

4.2 Die Interviewstudie

Vor der intervenierenden Fortbildung wurde mit jedem Teilnehmenden der beiden Gruppen ein semistrukturiertes Interview von etwa 15 bis 30 Minuten Länge geführt. Die Identität der Person wurde durch einen alphanumerischen, aber individuell-anonymen Code erfasst³³⁰, damit die Verbindung zwischen Prä- und FollowUp-Interview sowie dem Post-

³³⁰ Der Code bestand aus dem ersten Buchstaben des Vornamens der Mutter, dem ersten Buchstaben des Vornamens des Vaters, den letzten beiden Ziffern des Eintrittsjahres in den Schuldienst inklusive Referendariat, dem Geschlecht (M oder W) und dem Ort der Fortbildung (FL oder OL). Ein typischer Code wäre demnach: PH98MFL oder auch CD01WOL.

Fragebogen nachträglich hergestellt werden konnte. Anschließend habe ich diesen Code durch die fiktive Benennung der Befragten unkenntlich gemacht³³¹. Grundlage für das Interview war ein Fragenkatalog, dessen Struktur den Vorschlägen von Bortz & Döring (2006, 236ff.) gefolgt ist. Im Vergleich zu einer schriftlichen Befragung in Form eines Fragebogens, welche in der Regel höchst standardisiert und anonym verlaufen, gelten für das persönliche Interview umgekehrte Maßstäbe. Der persönliche Kontakt mit den Befragten und der Mitschnitt des Gesprächs erzeugen eine Situation der Vertrautheit, was unter Umständen einen nachteiligen Einfluss auf die Bereitschaft einer ehrlichen Antwort haben kann. Gleichzeitig ermöglicht ein gründliche und aber eine zudem höchst individuelle Auseinandersetzung mit der erfragten Thematik. Auch bei semistrukturierten Interviews ist ein standardisierter Ablauf daher eher die Ausnahme als die Regel. Nachfragen oder Verständnisfragen verzerren beispielsweise den zeitlichen Ablauf beim Vergleich der Befragten untereinander.

Für meine Studie habe ich mich daher für semi-standardisierte, direkte, ermittelnde Einzelinterviews entschieden, da mein wissenschaftliches Interesse auf individuelle Meinungen und Einschätzungen der Lehrkräfte in Bezug auf die zu erforschende Problematik fokussiert war. Die von Bortz & Döring oben genannten Schwierigkeiten in Bezug auf mündliche Befragungen schätze ich eher gering ein.

Das Interview wurde durch einen Leitfaden gestützt, um den thematischen Rahmen sowie Hauptgesichtspunkte des zu führenden Interviews festzulegen. Konkrete Antwortmöglichkeiten für die Probanden wurden nicht vorgeben. Zusätzlich zu den Hauptfragen wurden je erwarteter Antwortmöglichkeit potentielle Nachfragen notiert, die den Verlauf des Interviews steuerten³³².

Erläuterung der Fragenstruktur des Prä-Interviews

Es gibt zwei abzufragende Themenbereiche, die durch einen thematisch relevanten, aber offen gehaltenen 'Puffer' getrennt sind und einem ebenfalls offen gehaltenen, thematisch orientierten Abschlussgespräch beendet werden. Der Leitfaden besteht aus einer einleitenden Frage, ob der oder die Befragte schon einmal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt worden ist oder eine bestimmte Erwartungshaltung an das folgende Interview besteht. Diese thematisch nicht relevante Frage wurde eingebaut, um das Gespräch in Gang zu bringen, da ich mit den Befragten vor den Interviews nur durch Emails bekannt war. Mit der zweiten Frage beginnt der

331 Sielle dazu Fulsilote 311 auf Seite 210.

³³¹ Siehe dazu Fußnote 311 auf Seite 210.

³³² Die Leitfäden sind im Anhang auf den Seiten A-81 und A-82 zu finden.

erste Themenbereich. Es wird danach gefragt, ob bereits unterrichtliche Erfahrung mit dem historisch-genetischen oder anderen historisch orientierten Vermittlungsansätzen besteht. Die jeweiligen ersten Nachfragen bei zustimmender oder verneinender Antwort sollen die Befragten motivieren, etwas mehr ins Detail zu gehen. Bestehen schon diesbezügliche Erfahrungen, sollen diese anschließend beschrieben werden. Danach wird das Gespräch in Richtung von Unterrichtsvorbereitung gelenkt. Es wird gefragt, woher die Befragten das Material für ihren Physikunterricht bekommen. Die dritte Frage thematisiert dann explizit historische Inhalte und deren Unterrichtsmaterialien. Eine Nachfrage richtet den Fokus auf Radioaktivität und Atomphysik. Die vierte Hauptfrage ist die Puffer-Frage, die nach dem Einsatz des Zählrohrs im bisherigen Unterricht über Radioaktivität fragt. Hier sollen inhaltliche und didaktische Schwerpunkte im Kontext des Zählrohrs ermittelt werden. Die fünfte Frage eröffnet den zweiten Themenbereich. Es wird ein individuelles Grundverständnis vom Konzept der Nature of Science erhoben und ob, wie und warum Aspekte davon im Unterricht der Befragten eine Rolle spielen. Die letzte Punkt des Leitfadens thematisiert als weicher Ausklang des Interviews das generelle Fortbildungsverhalten der Befragten und welche Rolle historische Thematiken bei der Auswahl von Fortbildungen spielen.

Randbedingungen des Interviews

Mein eigener Autoritätsanspruch war den Kriterien von Bortz & Döring entsprechend eher weich. Eine autoritäre Haltung habe ich zu keiner Zeit eingenommen. Zudem habe ich versucht das Gespräch durch sich individuell und situativ entwickelnde Überleitungen zwischen den Fragen zu strukturieren. Diese betont zurückhaltende Position sollte das Verhältnis zwischen Interviewer und befragter Person positiv beeinflussen und helfen, eventuell vorhandene Hemmungen zu reduzieren und ehrliche, detaillierte und nicht etwa sozial erwünschte Antworten zu motivieren. Das Interview mit den jeweiligen Befragten fand in der Prä-Phase persönlich, einzeln und direkt statt. Nach schriftlicher Kontaktaufnahme per Email erschien es mir angemessen das erste Interview mangels gegenseitiger persönlicher Bekanntschaft und der geringen Anzahl an Teilnehmenden von Angesicht zu Angesicht durchzuführen. Vor dem ersten Interview wurden mehrere Varianten des Leitfadens mit einer Testperson und der Interview Checkliste von Bortz & Döring auf Durchführbarkeit geprüft und stufenweise verändert. Die FollowUp-Interviews fanden etwa sechs bis sieben Monate nach der Intervention im November und Dezember 2013 statt und wurden telefonisch durchgeführt. Die Entscheidung gegen ein weiteres persönliches Interview resultierte aus pragmatischen Überlegungen, wie dem reduzierten

Fragenkatalog und der schon hergestellten Bekanntschaft zwischen Interviewer und befragter Lehrkraft sowie aus Kostengründen.

Erläuterung der Fragenstruktur im FollowUp-Interview

Die FollowUp-Interviews hatten den Zweck, die unterrichtlichen Erfahrungen mit den in der Fortbildung erarbeiteten Inhalten abzufragen. Auf den Einsatz einer einleitenden Frage wurde hier verzichtet, da ich mit allen Probanden durch die Fortbildung und Email-Verkehr persönlich bekannt war.

Die erste Frage sollte in Erfahrung bringen, ob die befragte Person nach der Fortbildung überhaupt die Gelegenheit hatte, das Thema Radioaktivität oder Atomphysik zu unterrichten. Je zwei Nachfragen bezogen sich auf den Fall einer positiven oder einer negativen Antwort. Falls Radioaktivität und Atomphysik unterrichtet wurde, habe ich nach unterrichteter Klassenstufe sowie dem groben Ablauf der Unterrichtseinheit gefragt. Zudem wollte ich wissen, ob Inhalte aus der Fortbildung verwendet wurden und wenn ja, welche genau zum Einsatz gekommen sind, wie die Umsetzung aussah und wie die Resonanz der SchülerInnen gewesen ist. Falls die jeweilige Lehrkraft innerhalb der sechs Monate das Thema nicht unterrichten konnte, habe ich danach gefragt, ob er oder sie plant, die Fortbildungsinhalte zukünftig einzusetzen oder die Möglichkeit hatte, die Inhalte in einem anderen unterrichtlichen Kontext zu nutzen. Letzteres meint beispielsweise die konkrete Thematisierung von NoS-Aspekten und Wissenschaftsgeschichte im Allgemeinen oder den Einsatz der Geschichte des Zählrohrs im Speziellen bei anderen Kernthemen des Physikunterrichts, wie Mechanik, Optik oder Thermodynamik oder auch im Wahlpflichtunterricht.

Die zweite Frage des Leitfadens bezog sich direkt auf den Fortbildungsinhalt *Nature of Science*, bzw. darauf, was die Befragten nach sechs Monaten mit diesem Begriff noch verbinden. Im Fall einer Antwort schließen sich die beiden folgenden Nachfragen ähnlich zur ersten Frage an: Die erste Nachfrage richtet sich an den unterrichtlichen Einsatz von *NoS* im Kontext von Radioaktivität oder Atomphysik und die zweite nach einer allgemeinen Einbindung von *NoS*-Aspekten in andere unterrichtliche Kontexte, falls dies nicht schon in der ersten Frage des Leitfadens von der Lehrkraft erwähnt worden ist.

Die dritte und letzte Frage thematisiert den Teilaspekt der Fortbildung, der der jeweiligen befragten Lehrkraft am deutlichsten in Erinnerung geblieben ist und ob er oder sie seit der Fortbildung versucht hat, sich erneut für eine wissenschaftshistorische oder *NoS*-orientierte Fortbildung anzumelden. Die Nachfrage sollte die Beweggründe für eine mögliche Präferenz bezüglich *NoS* oder Wissenschaftsgeschichte in Erfahrung bringen.

4.3 Der Fragebogen

Der Post-Fragebogen wurde direkt im Anschluss an die Fortbildung an die Probanden verteilt. Mit Hilfe von 18 bzw. 19 Likert-skalierten Einschätzungs-Items sollte zum Einen ein Meinungsbild zum Aufbau und Inhalt der Fortbildung (8 Items) und zum Anderen das individuell eingeschätzte Verständnis der vermittelten Inhalte (10 bzw. 11 Items) erhoben werden. Letzteres geschah über Statements, die etwas über das subjektiv erlebte Anforderungsniveau, das Selbstkonzept der Probanden in Bezug auf Nature of Science und über eine Prognose der Anwendung dieser Inhalte im Unterricht in Erfahrung bringen sollten³³³. Ein weiteres Ziel war ein Längsschnitt-Vergleich der Post-Test Ergebnisse mit den Aussagen, die im Prä-Interview und im FollowUp-Interview über *NoS* gemacht worden sind.

4.4 Die Analysewerkzeuge

Die Transkription

Zur inhaltlichen Analyse wurden die elf geführten Interviews anhand der Audioaufzeichnung transkribiert. Dazu wurde der jeweilige Interviewverlauf im Sinne meiner Zielsetzung nur durch die Wortabfolge und parasprachliche Auffälligkeiten (z.B. lachen, längere Denkpausen) im orthographischen System nach Kowal & O'Connell (2005) von mir selber verschriftlicht³³⁴. Meine Umschrift orientiert sich zusätzlich an den grammatischen Normen der deutschen Schriftsprache. Sie enthält daher Korrekturen von grammatischen Fehlern vor allem im Satzbau, Versprechern, Wortwiederholungen und Fülllauten im Sinne einer guten Lesbarkeit der Transkripte. Alle Transkripte sind im Anhang A aufgeführt und mit Seiten- bzw. Zeilennummern versehen und werden auf dieser Grundlage referenziert.

Die Inhaltsanalyse

Auf Basis der Transkripte wurde eine qualitative Inhaltsanalyse erstellt. Dazu wurden die von den Probanden gegebenen Antworten inhaltlich zusammengefasst. Eine explizite, deduktive Codierung der Antworten war in

Struktur und Wortlaut

³³³ sind dem Standard-Evaluationsfragebogen Lehrveranstaltungen der Universität Flensburg entnommen und meiner Fortbildung bzw. Thematik entsprechend angepasst worden. Der Fragebogen der zweiten Gruppe von Befragten (BBS) hatte im Vergleich zur anderen Gruppe ein Item mehr. Während der Prä-Interviews wurde deutlich, dass die Befragten der BBS zwar NoS-Aspekte indirekt in ihrem Unterricht thematisieren, diese aber nicht als solche identifizieren. Das 19. Item sollte daher klären, ob die Befragten nach der Fortbildung Inhalte ihres bisherigen Unterrichts im Nachhinein doch als Aspekte von Nature of Science wieder erkennen.

³³⁴ Weitere in anderen Disziplinen übliche Aspekte, wie nicht vokale Merkmale in Form von Gesten oder Körperhaltung sowie prosodische Merkmale, wie Silbendehnungen, Tonhöhe und Lautstärke, wurden nicht durch das Transkript erfasst.

meiner Fallstudie nicht notwendig, da es sich im Wesentlichen um dichotome Items handelte. Von Interesse waren vielmehr die Gründe für eine positive oder negative Antwort. Daher wurde der Inhalt explorativ und induktiv mit Schlagwörtern in der Marginalie zum jeweiligen Abschnitt in den Transkripten manuell codiert. Die Methodik der empirischen Sozialforschung spricht bei einem solchen Vorgehen von einer Valenzanalyse, bei der neben der eigentlichen Antwort auf eine Frage auch dessen Bewertung von zentralem Interesse ist (vgl. Schnell et al. 2008, 408ff.).

Median-Analyse des Fragebogens

Die Analyse des siebenstufig von "1: trifft nicht zu" bis "7: trifft völlig zu" ordinal skalierten Post-Fragebogens erfolgte auf Grund der kleinen Stichprobe von 12 Befragten lediglich durch eine Interpretation des Antwortverhaltens. Die Verteilung der Antworten wurde mit Median-Boxplots anhand der zwei Fortbildungsgruppen getrennt graphisch aufgetragen. Weitere elaboriertere analytische Tests, die eine quantitative Aussage beispielsweise über die Trennschärfe der Gruppen oder Items mittels Rangsummentest geben könnten, sind mathematisch zwar möglich, aber bezüglich der Fragestellung und auf Grund der geringen Stichprobe nicht erstrebenswert. Ein Fragebogenexemplar, die zugehörige Datenmatrix sowie die sich daraus ergebenden Boxplots sind in Anhang B aufgeführt³³⁵. Diese Daten erlauben ähnlich wie die Interviews höchstens Rückschlüsse auf tendenzielle Gemeinsamkeiten bezüglich der Resonanz auf die Fortbildung. Die fachlich motivierten Nature of Science Items des Fragebogens vergleichend zu analysieren lässt auf Grund der genannten Stichprobenproblematik ebenfalls keinen Mehrwert erhoffen.

4.5 Ergebnisse der Studie

Präambel und allgemeine Ergebnisse

Mit der notwendigen Änderung des intendierten Forschungsdesigns hinsichtlich der befragten Lehrkräfte musste auch die Analysemethode der Evaluationsdaten angepasst werden. Es hat sich bei der Kategorisierung der Daten herausgestellt, dass sich die Gruppe A (Allgemeinbildende Schule) und die Gruppe B (Berufsbildende Schule) nicht nur hinsichtlich der wissenschaftshistorischen Vorbildung deutlich voneinander unterscheiden. Durch die vergleichende Analyse der Daten der Gruppe B wurde deutlich, dass im Bereich der beruflichen Bildung scheinbar ein ganz anderes

³³⁵ Differenziertere und elaborierte Analysen, wie z.B. die Rasch-Analyse, die ich zusammen mit Martin Panusch in einer anderen Studie genutzt habe, machen ebenfalls auf Grund der sehr geringen Stichprobengröße keinen Sinn, vgl. Korff & Panusch 2013, Korff & Panusch 2012.

Verständnis von Bildung existiert, dass wider Erwarten berufsbildende Aspekte in jeden Bereich der schulischen Ausbildung dominierend miteinbezieht. Allgemeinbildende Aspekte, wie in meinem Fall das Wissen über Nature of Science bzw. die Vermittlung dieses Wissens im Unterricht, spielen eine untergeordnete und keine explizite Rolle im Physikunterricht der BBS-Lehrkräfte. Insofern haben einerseits die Inhalte der Fortbildung keinen fruchtbaren Boden gefunden (vgl. Abschnitt III.3.2) und andererseits haben sich einige Items des Fragebogens und des FollowUp-Interviews nicht bewährt. Man muss daher konstatieren, dass die Kluft zwischen allgemeinbildenden und berufsbildenden Schulen größer ist, als dies bisher zumindest in der universitären Lehrerbildung wahrgenommen wird. Die Analyse der Daten im Sinne einer Vergleichsstudie erscheint aus dieser Warte heraus wenig aussichtsreich. Im Zentrum der Analyse werden daher die Längsschnitt-Ergebnisse von Gruppe A stehen, was der gesamten Evaluation dadurch eher den Charakter ein Pilotstudie auf einer Einzelfall-Ebene, als den einer Vergleichsstudie aufprägt. Trotzdem sind die Ergebnisse dieser Gruppe hinreichend genug, um dieses Vorgehen zu rechtfertigen.

Die Einzelfallergebnisse

Vorab lässt sich für alle Befragten feststellen, dass niemand sich erneut für eine thematisch ähnlich verortete Fortbildung angemeldet hat oder aktiv danach gesucht hat. Die Präsentation der weiteren Daten ist nicht erschöpfend, sondern legt entsprechend der Fragestellung hinsichtlich *Nature of Science* induktiv inhaltliche Schwerpunkte.

"Herr Elster", seit 2013 im Schuldienst

Herr Elster ist mit Wissenschaftsgeschichte und dessen Einsatz im Physikunterricht während seines Studiums in Oldenburg in Kontakt gekommen. Eigene praktische, unterrichtliche Erfahrung besteht nur über das sporadische Einbinden von personenbezogenen oder allgemeinen historischen Kontexten in den Regelunterricht. Als thematische Beispiele wurden thermodynamische Kreisprozesse im Kontext der Industrialisierung genannt und die epistemologischen Unterschiede zwischen Theorie und Experiment im Fall des elektrostatischen Grundgesetzes nach Coulomb. Über eine explizitere Einbindung in den Unterricht wurde aber noch nicht nachgedacht, da die Inhalte des schulinternen Lehrplans Vorrang hätten. Das Schulbuch wird von Herrn Elster dabei als lehrplankonforme Inspirationsquelle für die Unterrichtsvorbereitung genutzt. Die Hauptinformationsquellen sind jedoch die im Studienseminar besprochenen Themen sowie Inhalte des Studiums und eigene Recherchen auf Grund von privatem fachlichen Interesse. Geschichtliche Inhalte spielen sowohl im Studienseminar als auch im Schulbuch keine oder nur eine kleine Rolle. Für die historische Kontextualisierung der Fachinhalte des Physikunterrichts würden die im Schulbuch kurz präsentierten, vornehmlich biographischen Inhalte in der Regel nicht ausreichen, was weitere Recherchen nötig machen würde. Diesen Aufwand für die nicht im Lehrplan erfassten Zusatzinhalte zu treiben, stünde aber in einem schlechten Verhältnis zu der zur Verfügung stehenden Zeit. Deshalb greift er in diesem Fall bisher nur auf schon bestehendes Wissen zurück. Die Themen Radioaktivität und Atomphysik hat Herr Elster bisher noch nicht unterrichtet. Das Geiger-Müller Zählrohr wurde daher auch noch nicht eingesetzt. Im Zentrum würden aber eher die damit durchgeführten Messungen stehen und nicht das Instrument samt dessen Funktionsweise. Herr Elster hat im Vergleich zu den anderen fünf Lehrkräften das am stärksten ausgeprägte Verständnis des Begriffs Nature of Science. Er verbindet den Begriff mit Wissenschaftsgeschichte, mit erkenntnistheoretischen Aspekten, mit der wechselseitigen Kommunikation unter Wissenschaftlern und mit dem tentativen Charakter von Wissen. Auf einer wissenschaftsphilosophischen Ebene spielen solche Aspekte auch im Unterricht über Quantenphysik und Thermodynamik von Herrn Elster eine Rolle. Sein persönliches Fortbildungsverhalten beschreibt er auf der privaten Ebene als sehr offen und vielschichtig. Extern angebotene Fortbildungen wurden aber bisher noch nie besucht.

Im Post-Fragebogen gab Herr Elster an, dass die Menge an vermittelten Informationen in der Fortbildung zu wenig war (18, 2v7)³³⁶. Trotzdem waren die Anforderungen genau richtig (I11, 4v7) und der subjektiv eingeschätzte Lernzuwachs allgemein (I12, 6v7) und in Bezug auf das Thema Nature of Science (I13, 6v7) hoch. Insgesamt hat die Fortbildung das Interesse von Herrn Elster am Thema NoS sehr positiv beeinflusst (I15, 7v7). Eine leichte Änderung des Selbstkonzepts von NoS wird angegeben (I16, 5v7). Die in der Fortbildung erarbeiteten Materialien möchte er in seinem Unterricht nutzen Dennoch wird konstatiert, dass das Potential Wissenschaftsgeschichte (I18, 5v7) und NoS (I17, 4v7) für den eigenen Unterricht eher durchschnittlich sei. Wissenschaftsgeschichte wird dabei aber im direkten Vergleich ein Skalenpunkt mehr Bedeutung beigemessen. Im FollowUp-Interview gibt Herr Elster an, dass er bisher weiterhin nicht die Gelegenheit hatte, Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten. Es ist jedoch geplant die Entstehungsgeschichte des Zählrohrs zu thematisieren. Die Inhalte der Fortbildung wurden auch bei anderen unterrichtlichen Themen bisher nicht genutzt. Bei der Frage nach dem Begriff

Nature of Science wirkte Herr Elster im Gegensatz zum Prä-Interview erstaunlich unsicher. Er vermutete, dass damit soziale Faktoren von

³³⁶ Kurzschrift für: "Fragebogen Item **8**, **2 v**on **7** Skalenpunkten".

Naturwissenschaften und die dynamischen Entstehungsprozesse von Wissen gemeint sind. Besonders letztere würden im Lehrbuch eher linear und unvorteilhaft gekürzt dargestellt. Solche oder andere Aspekte hat er aber seit der Fortbildung nicht im Unterricht einsetzen können, da das schulinterne Curriculum zu eng sei. Die Inhalte, die Herrn Elster am deutlichsten im Gedächtnis geblieben sind, sind die Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte des Zählrohrs sowie der Nachbau desselbigen. Im Falle einer erneuten Fortbildung mit ähnlicher Thematik würde die Wahl zu Gunsten von *Nature of Science* und nicht von Wissenschaftsgeschichte ausfallen.

"Herr Kepler", seit 2002 im Schuldienst

Herr Kepler hat auch Vorerfahrungen mit Wissenschaftsgeschichte, jedoch nicht aus dem Studium. Aus einem privaten Interesse heraus haben historische Aspekte im Unterricht einen Platz bekommen. Vorwiegend handelt es sich dabei aber um personenbezogene Daten und vereinzelt um einen gesellschaftlichen Kontext. Als Beispiel erzählte er hier über die Thematisierung der Salonkultur des Experimentierens im 18. Jahrhundert am Beispiel des Wright of Derby Gemäldes An Experiment on a Bird in an Airpump. Die Vorbereitung und Planung des eigenen Unterrichts passiert auf Grundlage der Inhalte des Referendariats, Lehrbüchern und der eigenen Kreativität. Das Schulbuch sei jedoch nicht gut geeignet, da die materiellen Anforderungen nicht mit der Physiksammlung der Schule übereinstimmen würden. Historische Inhalte würden bei der Vorbereitung grundsätzlich auch eine Rolle spielen. Quelle für diese Inhalte seien die Sonderseiten im Schulbuch sowie eine von der Universität Oldenburg herausgegebene DVD mit historisch kontextualisierten Experimenten³³⁷. Generell käme so ein historischer Zugang aber explizit nur in Sondersituationen, wie einer Projektwoche zum Einsatz. Im Regelunterricht sei der zeitliche und materielle Aufwand, den z.B. ein historisch-genetischer Zugang benötige, zu intensiv. Dennoch nutzt Herr Kepler insbesondere beim Thema Radioaktivität gerade historische Zugänge, da an seinen Schulen das Experimentiermaterial für diesen Themenkomplex bisher sehr rar war. Um geschichtliche Aspekte des Themas zu illustrieren, nutzt Herr Kepler Filmoder Buchmaterial, um insbesondere Marie Curie als Rollenvorbild für eine in den Naturwissenschaften tätige Frau zu thematisieren. Das Geiger-Müller Zählrohr wird im Unterricht von Herrn Kepler anhand seine Funktionsweise und der Bestimmung der Nullrate behandelt. Da das Instrument zur Zeit nicht im Lehrplan der Sekundarstufe I verortet ist, wäre die Behandlung des als wichtig eingeschätzten Instruments oft aus Zeitgründen nicht mehr

³³⁷ Darauf enthalten sind: Die schiefe Ebene von Galilei, Musschenbroeks Sprungschanze, Ampères Stromwaage und die Elektromotoren von Faraday und Jacobi, histodid@unioldenburg.de.

möglich. *Nature of Science* verbindet er mit den schon beschriebenen genetischen bzw. epistemologischen Aspekten, bei letzterem insbesondere die Bedeutung von bzw. den Umgang mit Fehlschlägen in der Geschichte der Naturwissenschaften. Die Thematisierung erfolgt bei entsprechender Gelegenheit, wie Projektarbeiten explizit und nur en bloc. Herr Kepler verspricht sich dadurch die Förderung von prozessbezogenen Kompetenzen durch ungewohnte Problemstellungen, einen interdisziplinären Ausblick in andere Fächer und die bessere Vernetzung von fachwissenschaftlichen Inhalten. Er beschreibt sein Fortbildungsverhalten als rege auf Grund der Teilnahme an vielen Fortbildungen und dem Eigenstudium von abonnierten, fachdidaktischen Zeitschriften. Generell konstatiert er aber einen Mangel an Angebot gerade im Bereich der Mittelstufenphysik sowie an kleinen, konkret umsetzbaren, lehrplankonformen Modulen an Stelle von großen Einheiten. Ein wissenschaftshistorisches Angebot hat Herr Kepler bisher in der Region Oldenburg nicht wahrgenommen, obwohl ein Interesse daran bestünde.

Im Post-Fragebogen konstatierte Herr Kepler einen als hoch empfundenen allgemeinen Lernzuwachs (I12, 6v7 und I13, 5v7). Das Selbstkonzept in Bezug auf *Nature of Science* hätte sich jedoch auch durch den Besuch der Fortbildung eher wenig geändert (I16, 3v7). Dennoch hat der Besuch der Fortbildung das Interesse an *Nature of Science*-Inhalten für den Physikunterricht bestärkt (I15, 5v7), wenngleich das auch schon vor der Fortbildung bestehende, starke persönliche Interesse an Wissenschaftsgeschichte (I9, 7v7) auch bei der nachträglichen Einschätzung des Nutzens der selbigen im Physikunterricht (I18, 7v7) höher eingeschätzt wird, als der von *Nature of Science* (I17, 5v7).

Im FollowUp Interview gibt Herr Kepler an, dass er das Thema Radioaktivität schon zur Zeit der Fortbildung gerade unterrichtete und einen Einsatz der in der Fortbildung erarbeiteten Materialien vorbereitet hatte. Geplant war der Nachvollzug der Konstruktion bzw. dessen Evolution anhand des in der Fortbildung präsentierten YouTube-Videos sowie mit Materialien aus dem Baumarkt (Messingrohr, Draht, ...). Auf Grund von spontanem Zeitmangel wegen eines anderen Projektes ist das Vorhaben aber in der Planungsphase stecken geblieben. Andere Inhalte der Fortbildung seien höchstens in Form des historisch-genetischen Verfahrens in den Physikunterricht weiter eingeflossen. Die Vermittlung von Nature of Science Aspekten verbindet Herr Kepler ein halbes Jahr nach der Fortbildung mit dem Nachvollzug des Entstehungsprozesses von Erkenntnis in den Naturwissenschaften. Im Unterricht hätte dies aber in der Zwischenzeit auf Grund des kurzen Sommerhalbjahrs 2013 keinen Platz gefunden. Am deutlichsten im Gedächtnis geblieben sind der Lehrkraft neben dem YouTube-Video über den Nachbau die verwendeten Originalquellen. Ein Interesse an weiteren an *Nature of Science* orientierten Fortbildungen besteht.

"Herr Dalton", seit 1998 im Schuldienst

Herr Dalton hat während seines Studiums erste Erfahrungen mit Wissenschaftsgeschichte im Physikunterricht sammeln können und sie durch praktische Anwendung im eigenen Unterricht (vorwiegend Elektrostatik) und durch die Teilnahme am HIPST-Projekt vertieft. Auf Grund der langen Unterrichtserfahrung hat er ein eingespieltes und über die Dienstjahre etabliertes Unterrichtsprogramm, an dem situativ nur Details verändert werden. Im Fall des Themas Radioaktivität sind das zum Beispiel aktuelle Bezüge zum tagespolitischen Geschehen, wie zur Endlagersuche oder Energiepolitik. Zur allgemeinen Vorbereitung von Unterricht werden Inhalte aus dem Studium, populärwissenschaftliche Artikel aus Tageszeitungen, Artikel aus fachdidaktischen Zeitschriften sowie Projektideen von Jugend forscht – Schüler experimentieren (auf Grund einer Jurorentätigkeit) oder der jährlichen MNU Tagung genutzt. Historische Inhalte spielen bei der Vorbereitung auf Unterricht keine Rolle. Im Unterricht werden solche Aspekte höchstens über 'name-droping' kurz angesprochen. Beim Thema Radioaktivität geschieht dies durch die Nennung von Marie Curie als erste in den Naturwissenschaften tätige Frau und Henri Becquerel als Pionier der Radioaktivitätsforschung. Das Geiger-Müller Zählrohr wird dabei als reines Black-Box Instrument zur demonstrativen Messung der Nullrate eingeführt. Auch bei mehr zur Verfügung stehender Zeit für das Thema bekäme das Zählrohr nicht mehr Raum, da die Lehrkraft andere Dinge, wie energiepolitische Diskussionen um Atomenergie, um Strahlungsgrenzwerte, die Endlagerproblematik, etc. als wichtiger empfindet. Nature of Science ist für Herrn Dalton die Antwort auf die allgemeine Frage wie Naturwissenschaft funktioniert, insbesondere welche Rolle Experimente und Messprozesse in Kontext von Erkenntnisgewinnung spielen. Eine explizite Rolle in seinem Physikunterricht spielen diese Aspekte aber nicht. Implizit und eher als einzelne Unterrichtsstunde sei das nur bei der gesellschaftlichen Verantwortung naturwissenschaftlicher Forschung von insbesondere beim schon geschilderten Thema Radioaktivität. Herr Dalton beschreibt sein Fortbildungsverhalten als "Mischung zwischen Arroganz und Neugier" (Korff 2014a, A-43), da er einerseits über das schon beschriebene, etablierte Unterrichtsprogramm verfügt, aber andererseits dennoch interessiert an neuen Ideen für den Unterricht ist. Das regionale Fortbildungsangebot schätzt er als ausreichend ein, wenngleich auch keine wissenschaftsgeschichtlichen Fortbildungen wahrgenommen wurden. Das persönliche Interesse läge dabei aber an Stelle von Wissenschaftsgeschichte und curricularen Fortbildungen bei Fortbildungen zu tatsächlich nutzbaren Fachinhalten.

Im Post-Fragebogen gibt Herr Dalton ein moderates Interesse an Wissenschaftsgeschichte an (19, 4v7). Bei einem idealen Anforderungsniveau

der Fortbildung hinsichtlich Qualität und Menge der Inhalte (I8 und I11, je 4v7) und ausreichend Vorwissen (I10, 4v7) gibt er an, allgemein viel gelernt zu haben (I12, 6v7) und speziell bezüglich der behandelten Inhalte sogar sehr viel (I12, 7v7). Er signalisiert Bereitschaft, die erarbeiteten Materialien im Unterricht einzusetzen (I15, 5v7) und schätzt den Nutzen sowohl von Wissenschaftsgeschichte als auch von *Nature of Science* für den persönlichen Physikunterricht als hoch ein (I17 und I18, je 6v7).

Im FollowUp-Interview gibt Herr Dalton an, dass er seit der Fortbildung in einer 10. Klasse die Gelegenheit hatte, das Thema Radioaktivität zu unterrichten. Er nutzte seinen bisherigen jedoch Ablauf der Unterrichtseinheit. Ergänzt wurde lediglich ein Einstieg zum Atommodell sowie der bisher seltene Einsatz des Geiger-Müller Zählrohrs. Diesbezüglich hätte sich auch geändert, dass er auf Grund der Fortbildung nun konsequent darauf achten würde, das Instrument nicht als 'Geigerzähler', sondern als Geiger-Müller Zählrohr zu bezeichnen. Aspekte von Nature of Science oder historische Inhalte hätten aber keine Rolle gespielt, sondern eher fachliche. In Bezug auf das Selbstkonzept zu Nature of Science vermutet Herr Dalton keinerlei Änderungen im Vergleich zum Prä-Interview. Nature of Science beschreibe die Regeln, nach denen Naturwissenschaften 'funktioniere'. Naturwissenschaftliche Erkenntnisse wären immer subjektiv an Personen gebunden, die in einem weitläufigen Netzwerk mit anderen Wissenschaftlern interagieren und dort zum Beispiel um gegenseitige Anerkennung buhlen. Diese Aspekte hat Herr Dalton lediglich in der Elektrizitätslehre thematisiert, aber auf einem nach eigener Einschätzung sehr geringem Niveau. Am deutlichsten im Gedächtnis geblieben ist ihm die in der Geschichte des Zählrohrs deutlich gewordene Ungerechtigkeit gegenüber Müller sowie die Funktionsweise des Zählrohrs. Eine Wahl zwischen einer erneuten Fortbildung zu Wissenschaftsgeschichte oder Nature of Science wäre vom Thema abhängig.

"Frau Bassi", seit 2004 im Schuldienst

Frau Bassi hat durch ihr Studium in Oldenburg Erfahrungen mit der unterrichtlichen Verwendung von Wissenschaftsgeschichte sammeln können und dies auch im eigenen Elektrizitätslehre-Unterricht als festen Bestandteil etabliert. Sporadisch tritt eine Einbindung von historischen Inhalten auch in Form von Schülerreferaten auf. Historische Zugänge auch in anderen Themenbereichen des Physikunterrichts zu nutzen ist ein noch zu realisierender Wunsch von Frau Bassi. Sie bereitet sich vornehmlich anhand des Schulbuchs oder anhand der in der Schulsammlung zur Verfügung stehenden Experimentiermaterialien auf den Unterricht vor. Ideen für Arbeitsblätter bezieht sie aus dem Internet, aus alten eigenen Unterlagen sowie aus fachdidaktischen Zeitschriften. Historische Inhalte spielen dabei

keine Rolle, da entweder die notwendigen Versuchsmaterialien nicht vorhanden sind oder ihr historische Zugänge nicht bekannt sind. Im Themenkomplex Radioaktivität trainiert Frau Bassi mit ihren SchülerInnen das Verfassen von Referaten. Einige der Themen seien dabei geschichtliche, wie z.B. das Leben und Werk von Marie Curie oder Henri Becquerel. Primäre Informationsquelle für die Schüler sei dabei das Schulbuch. Sekundär würden die Schüler auch die Schulbibliothek und das Internet für ihre Recherchen nutzen. Das Geiger-Müller Zählrohr steht zwar als Thema auch immer auf der Referate-Liste, wurde aber von den SchülerInnen bisher nie gewählt. Daher übernimmt Frau Bassi diesen Inhalt des Unterrichts selber und führt das Zählrohr über dessen Funktionsweise und der experimentellen Bestimmung der Abstandsregel und der Nullrate ein. Frau Bassi legt dabei bereits in Klasse 9 nach eigener Aussage viel Wert auf die Vermittlung der Funktionsweise des Zählrohrs. Mit dem Begriff Nature of Science verbindet sie die Frage was Naturwissenschaft ist und die Neugierde als treibende Kraft für naturwissenschaftlich Forschende. Außerdem sei der in der Fachphysik notwendige mathematische Formalismus auch Teil der Nature of Science³³⁸. Gerade diesen Aspekt thematisiert Frau Bassi in ihrer Wahrnehmung besonders in der Oberstufe, aber eher implizit. Der Grund für die nichtexplizite Verwendung auch der anderen NoS-Aspekte sei, dass ihre Unterrichtsstunden ein wiedererkennbares Muster haben sollen, welches sporadische, explizite Einbindung solcher NoS-Inhalte aufgebrochen werden würde. Ihr persönliches Fortbildungsverhalten beschreibt Frau Bassi als rege. Sie besucht von der Schule selbst organisierte, eingeladene Fortbildungen. Die dort vermittelten Inhalte werden in der Regel auch sofort im eigenen Unterricht ausprobiert. Wissenschaftsgeschichtliche Themen wurden aber bisher noch nie angeboten oder von anderen Lehrkräften nachgefragt, trotz persönlich großem Interesse. Das restliche Angebot sei aber ausreichend.

Im Post-Fragebogen gibt Frau Bassi an, dass sie trotz optimalem Anforderungsniveau (I11, 4v7), der Menge an vermitteltem Inhalt (I8, 4v7) und ausreichend Vorwissen (I19, 4v7) allgemein durch den Besuch der Fortbildung nur moderat dazu gelernt hat (I12 und I13, je 4v7). Das Selbstkonzept über *Nature of Science* hätte sich durch den Besuch der Fortbildung ebenso nur moderat geändert (I16, 4v7). Das unterrichtliche Potential von Wissenschaftsgeschichte (I18, 7v7) wird von Frau Bassi einen Skalenpunkt höher eingeschätzt als der von *Nature of Science* (I17, 6v7).

Im FollowUp Interview berichtete Frau Bassi von einem erfolgreichen Einsatz der Originalquellen im Physikunterricht. Sie hat von SchülerInnen

 338 Die Mathematik als Teil der Fachdisziplin Physik zu sehen mag in Einzelfällen berechtigt sein. Die Ausweitung auf <u>alle</u> Naturwissenschaften und die Klassifizierung als "Wesensart" der selbigen scheint aber nicht konsensfähig, vgl Abbildung 87, S. 215.

der 9. Klasse und der Oberstufe auf Basis einiger Briefe von Müller an seine Eltern eigene Briefe oder Dialoge verfassen lassen. Bei dieser für die SchülerInnen ungewohnten Methode hätten sich auch die sonst eher stillen und zurückhaltenden SchülerInnen eingebracht. Mit Nature of Science verbindet Frau Bassi ein halbes Jahr nach der Fortbildung noch kommunikative Aspekte, wie das Protokollieren von Experimenten und die Nutzung von Fachsprache sowie soziale und gesellschaftliche Aspekte. Als Beispiel führt sie das Leben von Marie Curie an. Am deutlichsten im Gedächtnis geblieben ist ihr die Geschichte über das Zählrohr, die zur Verfügung gestellten Originalquellen sowie der Prozess des Nachbaus. Frau Bassi sagte bzgl. der Originalquellen folgendes:

[...] auf jeden Fall die persönlichen Briefe von Müller... Also diese menschliche Seite... die habe ich total noch im Kopf. Ich denke, dass es Schülern ähnlich gehen wird und dass sie sich dann auch die anderen Dinge über das Zählrohr besser merken können [dadurch]. [...] (Korff 2014b, A-11)

Das thematische Interesse bei einer ähnlichen, zukünftigen Fortbildung läge eher auf Wissenschaftsgeschichte, als auf *Nature of Science*.

"Herr Franklin", seit 2004 im Schuldienst

Herr Franklin hat auch durch das Studium in Oldenburg Erfahrungen im Bereich Wissenschaftsgeschichte. Im eigenen Unterricht verwendet er historische Aspekte zur Elektrostatik und im Bereich Mechanik zum Thema schiefe Ebene. Weiteren Input durch das Referendariat oder andere Fortbildungen gab es nicht. Anregungen und Ideen für den Physikunterricht bezieht Herr Franklin vorwiegend aus dem Internet. Das Schulbuch wird zum Nachschlagen von Experimentalaufbauten genutzt. Geschichtliche Inhalte spielen bei der Unterrichtsvorbereitung keine Rolle, da er das notwendige Material aus verschiedensten Quellen intensiv recherchieren müsste. Das Wissen um die historischen Inhalte zur Elektrostatik und zur Mechanik bezieht er aus seiner Mitarbeit beim HIPST-Projekt. Im Unterricht über Radioaktivität zeigt Herr Franklin in der Regel die zugehörigen Filme aus der Reihe Meilensteine der Naturwissenschaft und Technik. Das Geiger-Müller Zählrohr wird im Unterricht anhand des Messprinzips eingeführt und zu demonstrativen Messungen an schwach radioaktiven Substanzen genutzt. Für die eigentlich favorisierten Schülerexperimente sind leider zu wenige Zählrohre in der Schulsammlung vorhanden. Mit dem Begriff Nature of Science verbindet er hauptsächlich philosophische und erkenntnistheoretische Aspekte. So spielt zum Beispiel das Thema Modellbildung in der Oberstufe eine kleine Rolle. Generell sei aber die Abiturvorbereitung hier wichtiger. In der Mittelstufe thematisiert Herr Franklin solche Aspekte gar nicht, da er die Zeit lieber für Schülerexperimente nutzt. Sein Fortbildungsverhalten beschreibt er mit einer bis vier Fortbildungen im Jahr als sehr

regelmäßig. Die regionale Auswahl sei gut, wenn gleich auch historische Themen nur randständig vorkommen würden. Ein Interesse an solchen Veranstaltungen würde jedoch bestehen.

Im Post-Fragebogen gibt Herr Franklin an, dass er sich trotz ausreichend Vorwissen (I10, 4v7) leicht unterfordert gefühlt hat (I11, 3v7). Dennoch habe er allgemein (I12, 6v7) und auf das Thema bezogen (I13, 5v7) viel gelernt. Es wird auch Bereitschaft signalisiert, die erarbeiteten Materialien im eigenen Unterricht zu benutzen (I14, 6v7). Sein Verständnis darüber, was mit *Nature of Science* im fachdidaktischen Kontext gemeint ist, hätte sich aber nach dem Besuch der Fortbildung eher nicht gewandelt (I16, 2v7). Das Wissen über *Nature of Science* und Wissenschaftsgeschichte bereichert den Unterricht von Herrn Franklin in gleichem Maße hoch (I17 und I18, je 6v7).

Im FollowUp-Interview gibt Herr Franklin an, dass seit dem Besuch der Fortbildung keine Gelegenheit bestand, das Thema Radioaktivität zu unterrichten. Inhalte aus der Fortbildung seien in Form der Funktionsweise und der technischen Aspekte in anderen Unterricht eingeflossen. Die Unterrichtsmaterialien möchte er bei entsprechender Gelegenheit in seinem Unterricht verwenden. Mit Nature of Science verbindet er ein halbes Jahr nach der Fortbildung die Details des Forschungsprozesses in den Naturwissenschaften. Dieser bestehe aus der Abarbeitung von aneinander gereihten Fragen, die sich zum Teil erst selbst aus dem Forschungsprozess ergeben. Thematisiert hat Herr Franklin solche Aspekte, wie gehabt, nur in der Elektrizitätslehre und der Mechanik. Die deutlichste Erinnerung an die Fortbildung sind die Nachbauten der Zählrohre. Auf Grund einer subjektiv wahrgenommenen, inhaltlichen Nähe würde keine Präferenz Wissenschaftsgeschichte oder Nature of Science bei der Themenauswahl für eine potentielle weitere Fortbildung bestehen.

"Frau Herschel", seit 2009 im Schuldienst

Frau Herschel hat die reichhaltigsten Erfahrungen mit Wissenschaftsgeschichte und dem Thema Nature of Science, nicht nur in Theorie wie Herr Elster, sondern auch in der Unterrichtspraxis. Diese resultieren vorwiegend aus Praktika, Abschlussarbeiten und der Mitarbeit in der Didaktik-Arbeitsgruppe des Physikinstituts während und nach dem Studium in Oldenburg. Die praktische Anwendung dieses Wissens erfolgte einerseits durch eigenes Ausprobieren dieser Konzepte im Physikunterricht sowie andererseits initiiert durch das HIPST-Projekt. Im Wahlpflicht-Unterricht und im Seminarfach in der Oberstufe hat Frau Herschel daher vor allem die Themen Mechanik (Kinematik, Akustik, Druck) und Elektrostatik mit den entsprechenden durch **HIPST** propagierten Ansätzen historisch kontextualisiert. Im Regelunterricht in der Oberstufe kämen geschichtliche Inhalte aber aus Zeitgründen nicht vor. Zur Vorbereitung auf ihren RegelUnterricht nutzt Frau Herschel vorwiegend das Schulbuch sowie die zugehörigen Lehrerhandreichungen als Ersatz für das Kerncurriculum. Im Wahlpflichtbereich ist das Internet die primäre Informationsquelle, da "google" und "Leifi" einen schnellen Zugriff auf Materialien erlauben würden. Ergänzend nutzt sie den Austausch mit anderen Kollegen. Inhalte aus fachdidaktischen Zeitschriften werden kaum rezipiert. Historische Aspekte spielen bei der Unterrichtsvorbereitung keine Rolle, da Nachschlagewerke o.ä. nicht bekannt seien und man notwendiges Material sehr zeitaufwendig recherchieren müsste. Ausnahme seien entsprechende Themenhefte der physikdidaktischen Zeitschriften. Die Einbindung in den Unterricht passiert sonst nur durch den Rückgriff auf das eigene Wissen. Das Geiger-Müller Zählrohr hat im Physikunterricht von Frau Herschel bisher noch keine Rolle gespielt, da das Thema Radioaktivität noch nicht unterrichtet wurde. Durch eigene Erfahrungen mit dem Instrument im Chemieunterricht sei ihr jedoch das Funktionsprinzip wichtig und dies gerade weil SchülerInnen das Gerät mit seinem charakteristischen Knacken in Verbindung bringen. Nature of Science verbindet Frau Herschel mit identifizierbaren verallgemeinerbaren Eigenschaften von Naturwissenschaften und wie sich diese auf Grund verschiedenster gesellschaftlicher, historischer und philosophischer Einflüsse verändert haben. Eine weitere Rolle spielen erkenntnistheoretische Aspekte, wie Theoriebildung, die Ableitung von Gesetzen sowie die Schaffung, Rezeption und der Wandel von Modellvorstellungen in den Naturwissenschaften. Die Thematisierung dieser Aspekte passiert entweder implizit oder in einem speziellen Fall explizit als komplettes Seminarfach mit dem Thema "Die Natur der Naturwissenschaften". Eine Orientierung an Wissenschaftsgeschichte oder Nature of Science für eine komplette Einheit im Regelunterricht sei aber noch nicht vorgekommen. Die implizite Vermittlung von *NoS*-Inhalten sorge dahingegen für Abwechslung bei den SchülerInnen. Ihr Fortbildungsverhalten beschreibt Frau Herschel als unermüdlich und sehr rege. Die Auswahl der Fortbildungen passiert dabei interessensgesteuert und eher orientiert an fachlichen Themen. Pädagogische oder didaktische Thematiken seien für sie weniger Vermisst werden neben interessant. jahrgangsspezifischen Fortbildungsreihen und kollegialen, geleiteten Gesprächskreisen auch wissenschaftshistorische Fortbildungen.

Im Post-Fragebogen gibt Frau Herschel an, dass ihr Vorwissen ausgereicht hat, um der Fortbildung folgen zu können (I10, 4v7). Jedoch sei die persönlich empfundene Anforderung zu gering gewesen (I11, 3v7). Der subjektiv konstatierte Lernzuwachs durch die Fortbildung fällt im Vergleich mit den anderen Teilnehmenden geringer aus (I12 und I13, je 5v7). Obwohl Frau Herschel angibt, dass sowohl Wissenschaftsgeschichte und *Nature of Science* ihren Unterricht eher mittelmäßig bereichern (I17 und I18, je 4v7),

möchte sie die erarbeiteten Materialien für ihren Unterricht nutzen (I14, 6v7). Das Selbstkonzept von *Nature of Science* hätte sich auf Grund des Besuchs der Fortbildung auch eher wenig geändert (I16, 4v7).

Im FollowUp-Interview berichtete Frau Herschel dann, dass sie zur Zeit einen Oberstufenkurs zur Atomphysik unterrichtet. Bisher seien sie aber noch nicht beim Thema Radioaktivität angelangt. Sie plant aber fest den Einsatz der Quellenmaterialien im Physik-Grundkurs, um die Entstehungsgeschichte des Geiger-Müller Zählrohrs zu thematisieren³³⁹. Dies soll für Abwechslung zu dem sonst sehr Mathematik-lastigen Unterricht führen. In Bezug auf das Selbstkonzept zu *Nature of Science* vermutet sie keine Änderung im Vergleich zum Prä-Interview. NoS verbindet sie mit dem Entstehungsprozess von Gesetzen, Begriffen und Erfindungen und der Thematisierung von Parallelentwicklungen, Rückschlägen und epistemologischen Aspekten. Im Unterricht hätten solche Inhalte seit dem Besuch der Fortbildung bei der Einführung von Atommodellen in dem Oberstufen-Grundkurs eine wesentliche und explizite Rolle gespielt. Im Wahlpflichtunterricht hat Frau Herschel die Farbenlehre nach Goethe behandelt und in der Mechanik erneut die Bewegungslehre anhand des HIPST-Vorschlags. Das Seminarfach "Natur der Naturwissenschaften" hätte sich dagegen in eine unerwartete Richtung entwickelt. Trotz der Wahlfreiheit der SchülerInnen haben die wenigsten Teilnehmenden das Fach aus Interesse gewählt, sondern aus Mangel an Alternativen³⁴⁰. Die Mehrheit der Schüler hat die inhaltliche Arbeit daher eher als Biographie-Recherche begriffen. Frau Herschel hat zu diesem Punkt gesagt:

Philosophische Sachen, die ich eigentlich vorgehabt hätte, kann ich jetzt nicht machen, weil die meisten in dem Kurs das jetzt nicht interessiert. Denen reicht meistens ein Name, ein Geburts- und Todesdatum und wichtige Errungenschaften, wie bei wikipedia. Mehr wollen die nicht wissen. Das sind so typische 'Abdecker'. (Korff 2014b, A-56)

Jedoch würden im Seminarfach eher verschiedene Methoden, wie das Verfassen von Essays, Bibliotheksrecherche und das Anfertigen einer Präsentation anstatt Fachinhalte im Vordergrund stehen. Die Inhalte seien dabei Mittel für diesen Zweck und eher zweitrangig. Das Geiger-Müller Zählrohr war auch ein mit den Inhalten der Fortbildung versehenes Thema für die SchülerInnen. Es wurde aber von niemandem gewählt. Die deutlichste Erinnerung an die Fortbildung verbindet Frau Herschel mit den Nachbauten

³⁴⁰ Vielen SchülerInnen wählen nach Aussage von Frau Herschel das Seminarfach anhand der dort angebotenen Kursfahrt. Der in diesem speziellen Fall beliebteste, aber teilnehmerbegrenzte China-Kurs war aus diesem Grund von vielen SchülerInnen der Favorit. Die meisten, die keinen Platz in diesem Kurs bekommen haben, seien dann in den "Natur der Naturwissenschaften" Kurs gewechselt.

³³⁹ Ob es tatsächlich zu einem Einsatz der Materialien kam, konnte bis zum Abschluss dieser Arbeit leider nicht in Erfahrung gebracht werden, da die Lehrkraft für eine weitere, kurze Befragung nicht mehr zur Verfügung stand.

der Zählrohre, bzw. den Film darüber sowie mit den Quellenmaterialien. Das primäre Interesse läge aber im Fall einer erneuten Teilnahme einer ähnlichen Fortbildung bei einem wissenschaftsgeschichtlichen Thema.

Die Lehrkraftgruppe B

Über die Lehrkräfte der Gruppe B lässt sich auf Grund der schlechten Passung von Fortbildungsinhalt und den konstatierten Bildungszielen an beruflichen Schulen wenig sagen. Aus den geführten Prä-Interviews lässt sich ableiten, dass historische Inhalte, wenn überhaupt, nur in Form von frei nachempfundenen Anekdoten (Herr Geitel, Herr Maxwell) in den Unterricht einfließen. Herr Geitel berichtete außerdem von einer letztendlich historisch-orientierten Unterrichtseinheit zum gescheiterten perpetuum mobile'. Das Konzept der *Nature of Science* war fünf von sechs Lehrkräften unter diesem Schlagwort nicht bekannt. Herr Ohm verbindet den Begriff wissenschaftlich tragfähig lediglich mit dem Wechselspiel von Naturwissenschaft und Technik. Dennoch gaben vier der sechs Lehrkräfte an, dass sie im Nachgang der Fortbildung verstanden hätten, was mit diesem Begriff im fachdidaktischen Kontext gemeint ist und dass sie nachträglich Aspekte ihres eigenen Unterrichts damit identifizieren würden (I19). Zudem konstatierten erneut vier der sechs Lehrkräfte, dass sich ihr fachdidaktisches Selbstkonzept bzgl. Nature of Science gewandelt habe (I16). In der Analyse der FollowUp-Interviews konnte dieses zunächst als positiv zu wertende Antwortverhalten nur in Ansätzen bestätigt werden. Ein variiertes Selbstkonzept von Nature of Science bestand nur bei zwei Lehrkräften (Herr durch Geitel. Herr Maxwell) die Identifizierung von wissenschaftsgeschichtlichen Inhalten. Aber gerade diese Lehrkräfte haben im Prä-Interview angegeben, dass sie historische Anekdoten gelegentlich als Einstieg in ihren Unterricht einfließen lassen und auch privat ein Interesse an geschichtlichen Themen hätten. Bezieht man die individuellen Antworten (je 5 von 7) dieser Lehrkräfte auf das Item 19 des Postfragebogens in diese Überlegung mit ein, ergibt sich daher ein plausibles Bild, welches nicht unbedingt auf Inhalte der Fortbildung zurückzuführen ist.

5. Bewertung, Interpretation und fachdidaktischer Ausblick

Auf Grund der kleinen Stichprobe ergibt das Herausarbeiten von Lehrkraft-Prototypen zur weiteren Analyse gerade bei einer Beschränkung auf die Lehrkräfte der Gruppe A keinen Sinn. Es lassen sich jedoch bei diesen Auffälligkeiten herausarbeiten. sechs Befragten Den interviewten Lehrkräften ist gemein, dass sie mit Wissenschaftsgeschichte und mit historisch-orientierten Vermittlungskonzepten im Physikunterricht vertraut sind. Der Grad dieser Vorerfahrung ist jedoch individuell unterschiedlich und reicht von theoretischen Betrachtungen im Studium bis hin zum praktischen Einsatz im eigenen Unterricht in der Schule sowie der Mitarbeit bei der Ausarbeitung wissenschaftsgeschichtlich-orientierter Unterrichtskonzepte, wie beim HIPST-Projekt. Dieser Umstand hat vermutlich zu dem mehrheitlich als ausreichend eingeschätztem Maß an Vorwissen und dem Anforderungsniveau bzgl. der Fortbildung geführt. Während Herr Elster und Herr Franklin angegeben haben, dass sie aus schul-organisatorischen Gründen die Inhalte der Fortbildung auch sechs Monate nach der selbigen nicht anwenden konnten und Herr Dalton trotz bestehender Gelegenheit sich gegen den Einsatz der historischen Materialien entschieden hat, haben Frau Bassi und Frau Herschel den Einsatz für ihre jeweiligen akuten Durchgänge der Unterrichtseinheit Radioaktivität fest eingeplant. Frau Bassi konnte beim FollowUp-Interview bereits von einem erfolgreichen Einsatz der erarbeiteten Unterrichtsskizzen berichten. Bemerkenswert ist hier ihre Beobachtung, dass auch die sonst stilleren SchülerInnen sich nun eigenständig in den Unterricht eingebracht haben. Die Methode scheint als zumindest in diesem Fall entweder mehre verschiedene oder eine andere Klientel von SchülerInnen anzusprechen und nicht nur die eh schon physik-, technik- und mathematikaffinen SchülerInnen.

Es ist außerdem auffällig, dass teilweise die Benennung von Aspekten der Nature of Science im Zusammenhang mit der deutlichsten Erinnerung (Frage 2 und 3 im FollowUp-Interview) an die sechs Monate zurückliegende Fortbildung steht. So gibt zum Beispiel Frau Bassi an, dass ihr das Quellenmaterial und insbesondere Müllers Briefe am deutlichsten im Gedächtnis geblieben. Gleichzeitig gibt sie der kommunikativen Facette von Nature of Science im FollowUp-Interview im Vergleich zum Prä-Interview den Vorrang. Herr Dalton hatte die gleiche deutlichste Erinnerung und nannte im FollowUp-Interview ebenfalls den kommunikativen Aspekt, dafür erwähnte er aber die gesellschaftlichen Dimension naturwissenschaftlicher Forschung nicht mehr. Dieses Phänomen ist ebenfalls bei Frau Herschel und Herrn Elster zu beobachten. Herr Franklin ergänzte einen weiteren Aspekte von NoS und ist damit die einzige Lehrkraft, die sein oder ihr vorhandenes

Wissen nicht umgeschichtet, sondern ausgebaut hat. Herr Kepler hat sein vorwiegend epistemologisch und fachwissenschaftlich geprägtes Bild von Nature of Science beibehalten. Zudem kann man konstatieren, dass sowohl in Gruppe A als auch in Gruppe B die vereinzelt im Prä-Interview genannten, aber wissenschaftlich nicht tragfähigen NoS-Aspekte³⁴¹ im FollowUp-Interview keine Erwähnung mehr finden. Zudem erkennt man in den Prä-Interviews von vier Lehrkräften der Gruppe A (Herr Dalton, Frau Bassi, Herr Franklin, Frau Herschel) Indizien dafür, dass zumindest diese vier Lehrkräfte historische Inhalte für ihren Physikunterricht, die über biographische Aspekte hinaus gehen, nur aus dem Wissen beziehen, was sie sich im Studium oder durch eine Fortbildung bzw. Projekt-Teilnahme selber erarbeitet haben. Nur Frau Herschel gab an, dass sie gelegentlich historisch orientierte Themenhefte von fachdidaktischen Zeitschriften rezipiert. Auf dieser Basis kann man die zu prüfende Hypothese formulieren, dass historische Kontexte eher bis in den Physikunterricht gelangen, wenn diese auf Erfahrungswissen der Lehrkräfte gegründet sind. Die alleinige Publizierung von Studien oder Unterrichtsideen in Sammelbänden, Monographien oder fachdidaktischen Zeitschriften stellt für die befragten Lehrkräfte dieser Studie keinen Mehrwert dar.

Aus meiner Sicht als Fortbildender muss ich herausstellen, dass meine Erwartungshaltung, die ich an den Verlauf und besonders an das Ergebnis der Fortbildung hatte, übertroffen worden ist. Insbesondere auf Grund der paradoxen Situation, dass die Lehrkräfte der Gruppe A sich im Vorfeld auf Grund fehlender und mühsam zu recherchierender Unterrichtsmaterialien eher zurückhaltend gegenüber historisch orientierten Unterrichtsinhalten geäußert haben, aber dann in der Fortbildung sehr kreativ und zielorientiert gemeinsam einen solche Zugang erarbeitet haben, der dann sogar bis in die Hände und Köpfe von SchülerInnen vorgedrungen ist. Insofern war ich aber enttäuscht, als der Verlauf der zweiten Fortbildung für Gruppe B nicht annähernd einen ähnlich produktiven Verlauf auf Grund der schon geschilderten Gründe genommen hat.

Offene Fragen

Neben der provokanten und gewagten Hypothese bezüglich der Rezeption von fachdidaktischen Studien bleiben trotz der durchaus positiven Ergebnisse der Studie einige Fragen offen, die erst während bzw. nach der Studie aufgekommen sind. Zunächst muss man sich die Frage stellen, warum die Abweichung vom geplanten Studienverlauf notwendig wurde. Der Anlass dafür war, dass zu wenig Lehrkräfte in Schleswig-Holstein und

_

³⁴¹ Diese waren die Mathematisierung von naturwissenschaftlichen Inhalten bei den Lehrkräften Herrn Millikan und Frau Bassi, bzw. die Verifikation und Falsifikation von Hypothesen als treibendes Moment für Naturwissenschaftler bei Herrn Geitel.

Niedersachsen meiner allgemeinen Einladung zu weiteren Fortbildungen gefolgt sind. Damit kam auch die Kontrollgruppe für die angedachte Studie nicht wie intendiert zu Stande. Die Gründe dafür können vielschichtig sein und sind im Nachhinein nicht rekonstruierbar. Denkbar wären neben einem von den Adressaten zu spezifischen eingeschätzten und damit unterrichtlich schwer nutzbaren Thema vornehmlich organisatorische Gründe³⁴². Zudem war meine Ausschreibung der Fortbildung möglicherweise auch zu akademisch und zu ergebnisoffen formuliert. Dadurch hätte ebenfalls der Eindruck entstehen können, dass die Fortbildung für den Regelunterricht in der Schule nur schwer einzusetzen ist. Wenn man Regelhaftigkeiten eines solchen, höchst spekulativen Fortbildungsverhalten von Lehrkräften erheben wollen würde, müsste an Stelle dieser vagen Vermutungen eine Anschluss-Fortbildung bzw. -studie treten.

Primäres Interesse sollte aber bei so einem Vorhaben auf der Validierung der Vermittlungsaspekte von *Nature of Science* liegen, die aber auf eine empirisch stabilere und belastbarere Basis gestellt werden müsste, um die größte Schwäche dieser vorliegenden Studie auszugleichen. Insbesondere gilt es weiterhin die eingangs aufgestellte Hypothese zu prüfen, wie mit Wissenschaftsgeschichte nicht vertraute, allgemeinbildende Lehrkräfte eine inhaltlich ähnlich gestaltete Fortbildung annehmen. Ein Vergleich mit einer Gruppe von Lehrkräften, die Erfahrung mit Wissenschaftsgeschichte haben, wäre ergänzend denkbar. Ich denke aber, dass die Ergebnisse dieser Einzelfallstudie dafür sprechen, dass eine entsprechend sozialisierte Gruppe von Lehrkräften historisch aufgearbeitetes Quellenmaterial für deren Unterricht bearbeiten und anschließend nutzen kann. Ob dies nur unter Anleitung eines Wissenschaftshistorikers, der die zu Grunde liegende Fallstudie erstellt hat, passieren kann, wäre ebenfalls zu klären. Denkbar und wünschenswert wäre, dass eine Person, die sich mit intensiv mit einer fremden Fallstudie auseinander gesetzt hat, eine Fortbildung oder einen Arbeitskreis in ähnlicher Weise anleiten kann. Meine eigene Wahrnehmung war, dass ich als Referent in der Arbeitsphase lediglich beratend zur Seite

³⁴² Zwei Lehrkräfte aus Schleswig-Holstein haben mir zurückgemeldet, dass ihnen der angebotene Termin aus persönlichen Gründen ungünstig wäre bzw. die Fahrtzeit nach Flensburg - in diesem speziellen Fall von Ratzeburg aus - trotz bestehendem Interesse an der Thematik zu lang und zeitaufwendig wäre. Zudem besteht in Schleswig-Holstein und in Niedersachsen keine dienstliche Verpflichtung für Lehrkräfte an Fortbildungen teilzunehmen. Beworben wurde die Fortbildung in Schleswig-Holstein durch ein Anschreiben mit einem landesweiten Email-Verteiler und die Einrichtung der Universität Flensburg und des IQSH für Unterrichtsentwicklung, Lernkultur und Evaluation (EULE) sowie über das Institut für Qualitätsentwicklung an Schulen Schleswig-Holstein (IQSH) selbst. In Niedersachsen wurde die Werbung bzw. Bekanntmachung des Angebots durch das Oldenburger Fortbildungszentrum (OfZ) organisiert. Im Gegensatz zum Standort Flensburg war sowohl die Fortbildung der eingeladenen Lehrkräfte, als auch die geplante weitere Fortbildung mit 45 € zwar vergleichsweise günstig, aber nicht kostenlos. Meine geplante Studie zu dem Thema wurde in den jeweiligen Ausschreibungen nicht erwähnt.

stand und auf Nachfrage Hinweise auf das zur Verfügung stehende Quellenmaterial gegeben habe. Aber gerade der letzte Punkt erfordert entweder eine konkrete Vorstellung über die zu thematisierenden Inhalte oder eigene, mitunter zeitraubende Arbeit mit den Originalquellen, die publizierten wissenschaftshistorischen in kursorisch und nicht mit dem notwendigen Maß an Tiefe betrachtet werden. Darauf aufbauend wäre zudem zu prüfen, ob andere, nicht an der Fortbildung beteiligte Lehrkräfte das dort erarbeitete Material für ihren eigenen Unterricht ebenfalls nutzen können. Sowohl die Interviews mit der Gruppe von BBS-Lehrkräften, als auch die mit den allgemeinbildenden Lehrkräften haben gezeigt, dass Unsicherheiten in Bezug auf den Inhalt, die Verfügbarkeit von anwendbaren historischen Fallstudien und deren Vermittlung im Physikunterricht bestehen. Diese Hürde scheint zumindest bei den allgemeinbildenden Lehrkräften durch die eigene Auseinandersetzung mit der Fallstudie reduziert oder sogar überwunden worden zu sein. Bei Lehrkräften, die entsprechendes Unterrichtsmaterial in fachdidaktischen Zeitschriften oder im Internet vorfinden, dürften die individuellen Voraussetzungen viel breiter gestreut und eventuell sogar voreingenommener sein. Zusammengefasst könnte man also danach fragen, ob historisch kontextualisiertes Unterrichtsmaterial (in meinem Fall zur Vermittlung von Aspekten der Nature of Science) autark, also ohne den verantwortlichen Wissenschaftshistoriker und nicht nur durch die Autoren der Unterrichtsmaterialien, nutzbar ist.

Ähnlich wie beim HIPST-Projekt wäre ein letzter möglicher Schritt die begleitende Evaluation des Einsatzes der konstruierten Unterrichtsepisoden und -materialien durch entsprechend geschulte, aber auch ungeschulte Lehrkräfte in deren Unterricht. Differenzieren könnte man weiter, indem man Arbeitsgruppen bildet, in denen sich die Lehrkräfte untereinander austauschen und zusammen an ihren Unterrichtsentwürfen arbeiten; eine Gruppe mit und die Vergleichsgruppe ohne fachkundige Anleitung sowie ggf. alleine arbeitende Lehrkräfte. Hierbei wären dann vorwiegend der Vergleich der Herangehensweisen und die gefühlte Arbeitsbelastung sowie die der teilnehmenden Lehrkräfte individuellen Einschätzungen von Interesse. Denkbar wäre für diesen Zweck vorrangigem die Videographierung und anschließender Analyse der Arbeitsgruppen und des Unterrichts in Kombination mit begleitenden Interviews.

KAPITEL IV

Reflektionen

Für den Wissenschaftshistoriker ergibt sich daraus die Schwierigkeit, dass die Begradigungen, die er Geschichte nennt, nichts weiter als Fiktionen sind, Geschöpfe zur Befriedigung des Begehrens nach einem logos-getriebenen Prozess. (Rheinberger 1992, 53)

Je sorgfältiger man mit der Geschichte umgeht, je näher man am tatsächlichen historischen Entwicklungsgang ist, umso enger wird der individuelle Entwicklungsgang, wenn man entlang der Physikgeschichte Physik lernen soll. (Frercks 2012, 247)

Physikhistorische Inhalte haben bereits seit längerer Zeit und in unterschiedlichster Form einen festen Platz im Physikunterricht. Die Idee Nature of Science - Inhalte mit Hilfe von wissenschaftsgeschichtlichen Kontexten zu vermitteln, ist ebenfalls kein neuer, jedoch aktuell diskutierter Ansatz der Fachdidaktik. Gleiches gilt für die Idee Lehrkräfte in die Konstruktion der historisch oder auch nicht historisch orientierten Unterrichtsepisoden maßgeblich miteinzubinden (z.B. Höttecke et al. 2012, Nawrath 2010b). Die Frage hinter meiner Arbeit war vielmehr, ob es gelingen kann, dass der gesamte, quasi interdisziplinäre Prozess von historischer Quellenexegese, über dessen Analyse, dem Verfassen einer wissenschaftshistorischen Studie, der fachdidaktischen Umsetzung bis hin zu einer kleinen, begleitenden Evaluationsstudie von einer Person geleistet werden kann und wenn ja, ob dieses komprimierte, prozess- und ergebnisorientierte Ein-Mann-Dissertationsprojekt schlechtere, vergleichbare oder gar bessere Resultate hervorbringt, als konkurrierende, aber groß angelegte Projekte, wie z.B. HIPST oder S@TM.

Die im Vorwort dieser Arbeit durch Falk Rieß angemahnten und durch die Planung des Projekts forcierten Identitätsprobleme habe ich bisher versucht durch die strikte Trennung von wissenschaftshistorischer und fachdidaktischer Analyse in die Kapitel II und III zu vermeiden. Aber spätestens bei der Diskussion historisch kontextualisierter Facetten von Nature of Science kann und sollte man auch als Fachdidaktiker eine mehr oder minder strenge Lesart der wissenschaftshistorischen Studie nicht ablegen. Diese Identitätsprobleme einer Personalunion von Fachdidaktiker

und Wissenschaftshistoriker können sich auf vielen Ebenen manifestieren. Wie die eingangs präsentierten Zitate von Rheinberger und Frercks vermuten lassen, spielen insbesondere Aspekte von Ambivalenz eine nicht unwesentliche Rolle. Durch die Behandlung von Wissenschaftsgeschichte im Physikunterricht muss man sich einem intellektuellen Zwiespalt stellen und diesen zu lösen versuchen. Frercks schafft dies, indem er strikt zwischen dem Lernen über physikalische Forschung durch Wissenschaftsgeschichte, dem Lernen von Physik durch Wissenschaftsgeschichte und dem Lernen von Wissenschaftsgeschichte unterscheidet. Letzteres gehöre nicht in den Physik-, sondern im Zweifelsfall eher in den Geschichtsunterricht³⁴³. Wissenschafts-historische Details spielen in meiner fachdidaktischen Studie bei der Kontextualisierung von Physikunterricht aber eine untergeordnete Rolle. Eine komplette, detaillierte Kenntnis der wissenschaftshistorischen Studie könnte im Spiegel von Rheinbergers Feststellung in gewisser Weise sogar für den Einsatz im Unterricht hinderlich sein. Frercks formuliert dies so: "Je mehr man also über den tatsächlichen Gang der Geschichte weiß, umso schmaler ist der mögliche Pfad der Rekonstruktion" (Frercks 2012, 247). Obwohl hier natürlich die wissenschaftshistorische Rekonstruktion gemeint ist, kann man die Behauptung auch auf die didaktische Rekonstruktion übertragen, also der Strukturierung des (Physik-) Unterrichts unter dem wechselseitigen und rückgekoppelten Einbezug, sowohl von fachlichen Inhalten, als auch der zugehörigen Präkonzepten der Lernenden (vgl. Kattmann et al. 1997). Der Unterrichtsgegenstand wäre in diesem Fall Nature of Science, also ein prozessorientiertes Lernen über Physik in einem wissenschaftshistorischen Kontext. Typische und nicht nur auf SchülerInnen begrenzte Präkonzepte (Allchin 2004, 189; Höttecke 2001b) über naturwissenschaftliche Forschung bilden dabei den zweiten Baustein für diese konstruktivistische Unterrichtsplanung. Um Fachinhalte so aufbereiten zu können ist nicht umsonst ein Fachstudium notwendig, welches aber in der Regel nur für Physik und nicht auch noch für Wissenschaftsgeschichte bei Lehrkräften vorliegt und auch nicht ohne

Tatsächlich scheint auf den ersten Blick die Umsetzung der Forderung rein formal möglich. Die Formulierungen im zugehörigen Kerncurriculum für das Fach Geschichte des Landes Niedersachsen sind anfänglich so offen, dass die zu vermittelnden Bildungsziele auch mit der Thematisierung von wissenschaftshistorischen Inhalten erreicht werden könnten. Die jeweilige Zeitperiode ist dabei jedoch explizit die Ordnungsstruktur des Unterrichts. Betrachtet man meine Fallstudie, so muss man sie zeitlich in die Phase der Weimarer Republik einordnen in der im traditionellen Geschichtsunterricht die gesellschaftlichen, politischen und sozialen Faktoren erörtert werden, welche die Machtergreifung Adolf Hitlers begünstigt haben. Zudem hätte "[d]er Geschichtsunterricht [hat] eine im Verhältnis zur Unterrichtszeit unangemessene Fülle an Details und Spezialthemen zu vermeiden." (Kultusministerium 2008, 7f) Diese formalen Voraussetzungen machen die Umsetzung von Frercks' Forderung zumindest im Regelunterricht schwierig und in meinem speziellen Fall auf Grund der thematischen Binnenkonkurrenz fast unmöglich.

weiteres erwartet werden kann. Allchin (2004) merkt zu Recht an, dass aber auch Lehrkräfte ohne ein Studium der Wissenschaftsgeschichte ein Gespür sowohl für physikalische, als auch für historische Fehler haben und so die Vermittlung von 'false history' ausgeschlossen werden könne. Das Problem sei vielmehr die schon angesprochene 'pseudohistory': ³⁴⁴

Pseudohistory conveys false ideas about the historical process of science and the nature of scientific knowledge, even if based on acknowledged facts. Fragmentary accounts of real historical events that omit context can mislead, even while purporting to show how science works. (Allchin 2004, 186)

Es scheint also für die Vermittlung von Nature of Science an Lehrkräfte durch eine Fortbildung ein Balanceakt notwendig zu sein und das in zweierlei Hinsicht: Einerseits auf Grund der Abwägung zwischen Wissenschaftshistoriker und Fachdidaktiker in der Person des/der Fortbildenden und der Auswahl und Dosierung der zu vermittelnden Inhalte. Die fachdidaktische Studie hat gezeigt, dass dies aber durchaus mit Erfolg möglich ist. Ich als Wissenschaftshistoriker habe praktizierenden Lehrkräften eine Fülle an historischem Quellenmaterial zur Verfügung gestellt, aus denen die Lehrkräfte sich selber jene ausgesucht haben, die sie für ihren Physikunterricht didaktisch bearbeiten wollten. Den konstruierten Unterrichtsskizzen ist gemein, dass sie nicht die Physik oder gar die Entwicklungsgeschichte des Geiger-Müller Zählrohrs ins Zentrum der Betrachtung gestellt haben, sondern diese tatsächlich nur als Kontext verwendet haben, um Aspekte von Nature of Science zu vermitteln. Wie und was die SchülerInnen aus diesem Unterricht mitnehmen, ist eine schon in Kapitel III angesprochene, aber für meine Studie zweitrangige Frage. Vorrangig ging es mir um die Rezeption und Resonanz der Lehrkräfte auf diese Inhalte. 'Pseudohistorische' Auffassungen über naturwissenschaftliche Forschung sind in den FollowUp-Interviews auch lange Zeit nach der Beschäftigung mit der wissenschaftshistorischen Studie und dem Lehrkonzept Nature of Science nicht mehr aufgetaucht. Insbesondere das sporadisch aufgetretene, wissenschaftshistorisch nicht Rollenvorbild Marie Curie und die Popper'sche Klassifizierung von Physik in die evidenzbasierte Dialektik von Verifikation und Falsifikation wurden nach der Fortbildung zumindest nicht mehr spontan mit Bildungszielen im Unterricht über Radioaktivität oder Physikunterricht allgemein genannt. Ob diese bedenklichen Konzepte gänzlich getilgt oder verändern worden sind, lässt sich aber nicht sagen. Dieser Aspekte der Auslassung ist insofern bemerkenswert, als dass in der Fortbildung die Aspekte von Nature of Science

³⁴⁴ Aus einer wissenschaftsphilosophischen Perspektive bleibt dieses Vergehen natürlich weiterhin bedenklich, da durch eine fachdidaktische Bearbeitung einer wissenschaftshistorischen Fallstudie quasi eine – um mit Rheinberger zu sprechen – Begradigung der Begradigung der historische Abläufe passiert.

nur als Sammlung von Phrasen vorgestellt worden sind, ohne diese mit Inhalt oder Beispielen zu illustrieren. Der notwendige Transfer geschah durch die Gruppe von Lehrkräften selbst auf der Basis der präsentierten Erzählung der wissenschaftshistorischen Studie. So wird der damit geplante Unterricht nicht zu einem oktrovierten Physik-Wissenschaftsgeschichte-Hybriden eines in meinem Fall im Schulalltag wenig erfahrenen Fachdidaktikers und Wissenschaftshistorikers, sondern zu einem durch die Lehrkräfte selbst erarbeiteten und gestalteten Physikunterricht. recherchierten. Wissenschaftsgeschichte stellt damit nur eine Art Initialzündung oder Anlass für Lehrkräfte und SchülerInnen dar, sich dem so kontextualisierten Gegenstand intensiver, aber streng genommen ahistorisch auseinander zu setzen. Denn weder Müllers Dialog mit Dritten, noch seine fiktive Nobellaudatio haben im historischen Entwicklungsprozess oder in der zugehörigen wissenschaftshistorischen Rekonstruktion eine Rolle gespielt. Dennoch hat die Beschäftigung mit der Thematik zumindest bei den Lehrkräften zu einer Änderung des Selbstkonzepts und eine Sensibilisierung von Nature of Science geführt. Daher wäre zu überlegen, Wissenschaftsgeschichte nicht nur in Fortbildungen, sondern auch in der universitären Lehrerbildung einen expliziteren Platz verdient hätte. Dies scheint insbesondere in Hinblick auf die Förderung aller vier Kompetenzbereiche sinnvoll. Bemisst man Lehramtsstudiengänge daran, so ist der Kompetenzbereich Fachwissen in der Mehrheit der Fälle deutlich überrepräsentiert³⁴⁵.

Darüberhinaus bleibt aber für den Einsatz der wissenschaftshistorischen Studie ungeklärt, ob es auch Möglichkeiten gibt, z.B. anhand der Laborbücher die Funktionsweise und den Aufbau eines Zählrohrs nachzuvollziehen. Diese Herangehensweise wäre nicht ahistorisch und würde nicht nur ein Lernen über, sondern auch von Physik durch Wissenschaftsgeschichte ermöglichen. Die genutzte Studie wird damit nicht nur zum Anlass, sondern auch zum Gegenstand mit dem charakteristische Eigenschaften von Nature of Science und der physikalischen Grundlagen mit SchülerInnen erarbeitet werden können³⁴⁶. Grundsätzlich sollte es bei so einem Ansatz aber möglich sein, den Erfolg oder Misserfolg von der behandelten Fallstudie zu entkoppeln. Rückblickend betrachtet scheint das Thema Geiger-Müller Zählrohr bzw. die

³⁴⁵ Eine entsprechende Anpassung der starren und vorwiegend von Fachwissenschaftlern (und nicht von Fachdidaktikern) konstruierten und bewirtschafteten Studieninhalte erscheint zum Teil notwendig und wurde auch in der Vergangenheit als Lehramtsstudium sui generis von einer Gruppe von Fachdidaktikern der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (2006) gefordert, ist aber nicht Gegenstand meiner Arbeit. Für eine aktuelle von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Auftrag gegebene Studie zur Lehramtsausbildung in Physik siehe: Gesellschaft 2014.

³⁴⁶ Ein Beispiel für eine physikgeschichtliche Fallstudie, die im Unterricht nicht nur das Lernen über, sondern auch von Physik den SchülerInnen ermöglichen kann, ist jene über die Arbeiten von Michael Faraday zur Induktion von Michael Barth (2004).

frühe Radioaktivitätsforschung sowohl für Lehrkräfte als auch für SchülerInnen von Frau Bassi fachlich und lebensweltlich sehr attraktiv gewesen zu sein. Dieser Umstand könnte mit den ohnehin schon wissenschaftshistorisch interessierten und aufgeschlossenen Lehrkräften der Studie einen nicht unerheblichen Einfluss für die Rezeption der Fortbildung gehabt haben.

Michael Barth (2012) beschreibt fünf grundsätzliche Probleme, die praktizierende Lehrkräfte bei der Einbindung von Wissenschaftsgeschichte in den Physikunterricht haben: vorsätzlich erzeugte fachliche Unsicherheit, fehlende Unterstützung von erfahrenen Kollegen, zu wenig Zeit für die Vorbereitung, kein zur Verfügung stehendes Unterrichtsmaterial und eine fehlende Legitimationsbasis für den Einsatz von Wissenschaftsgeschichte im Physikunterricht. Ich denke, dass für die ersten vier Probleme mindestens ein Lösungsweg im Rahmen der Fortbildung den teilnehmenden Lehrkräften vermittelt worden ist. Den Aspekt der Unsicherheit muss man zunächst als Wesensart von wissenschaftshistorischer und naturwissenschaftlicher Forschung akzeptieren lernen. Diese Erkenntnis nicht erzwingen, sondern nur durch Auseinandersetzung mit einer Fallstudie erreichen. Die oft durch Lehrkräfte vermisste Anleitung durch einen Fachmann/eine Fachfrau ist in Form der Fortbildung erfolgt. Da man als Lehrkraft im Tagesgeschäft per se nicht viel Zeit für Unterrichtsvorbereitung hat, sollte man sich diese bei Interesse einfach nehmen. Genutzt wurde sie um das vierte Problem zu lösen und selbstständig das Unterrichtsmaterial mit Beratung zu erstellen, das sogar den Weg in den Unterricht von Frau Bassi gefunden hat. Die Antwort auf Barths fünfte Frage ist gerade im Hinblick auf einen modernen, kompetenzorientierten und mitunter interdisziplinären Physikunterricht leicht zu beantworten. Die Beschäftigung mit Wissenschaftsgeschichte und Nature of Science erlaubt einen Blick über die traditionell starren Fächergrenzen des Physikunterrichts hinweg. Es ermöglicht SchülerInnen und Lehrkräften eine andere und realitätsnähere Perspektive auf Physik und physikalische Forschung, welche sie durch die Beschränkung auf traditionelle Zugänge in meiner Auffassung nur sehr viel schwerer erreichen können.

Insgesamt kann ich konstatieren, dass die fachdidaktische Studie sehr stark von der wissenschaftshistorischen Analyse profitiert hat. Es bleibt also zu klären, ob es auch in der anderen Richtung einen sich befruchtenden Aspekt gegeben hat. In der Retrospektive muss ich das für meine Arbeit verneinen, da ich während der etwa zwei Jahre andauernden wissenschaftshistorischen Arbeit nur sehr wenige Gedanken an die bevorstehende fachdidaktische Umsetzung verloren habe. Lediglich die Auswahl des Analysegegenstandes geschah auch unter einem fachdidaktischen Gesichtspunkt, als dass das

nachzubauende Instrument in direkter Nähe zum schulischen Alltag stehen sollte. Ich kann aber ausschließen, dass fachdidaktische Überlegungen den späteren Verlauf der wissenschaftshistorischen Studie in irgendeiner Weise beeinflusst haben.

Als der gegen diese zweiköpfige Chimäre der Wissenschaftsgeschichte und Physikdidaktik kämpfende Bellerophon (vgl. Vorwort) bleibt mir am Ende dieser Arbeit noch zu sagen, dass retrospektiv gesehen nicht der Spagat zwischen den zwei Fachdisziplinen zu monströs, zu komplex oder gar zu interdisziplinär ist, wie es in manchen Passagen dieses letzten Kapitel vielleicht hätte erscheinen können, sondern ähnlich den Erfahrungen der Teilnehmenden der Fortbildung höchstens der Respekt vor dem Spagat.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Unterscheidungskriterien für α-, β- und γ-Strahlung. Das Magnetfeld tritt aus der Zeichenebene hinaus (nach Simonyi 2004, 484)1
Abbildung 2: Exemplarische Darstellung einer Einteilchen-Potentialbarriere E(r) in
Abhängigkeit zum Abstand r vom Kernmittelpunkt. ECoulomb (r) beschreibt das
Coulomb-Potential der elektromagnetischen Wechselwirkung. Εα ist die
Zerfallsenergie Q, die dem α-Teilchen als kin. Energie zum Verlassen des Kerns zur
Verfügung steht. Grau schraffiert ist der energetische Bereich, der aus 'klassischer'
Sicht von dem α-Teilchen daher nicht überwunden werden (nach:Lieb 2003, 782)13
Abbildung 3: Wechselwirkung von γ-Strahlung mit Materie als Feynman-Diagramme.
Dargestellt sind der Compton Effekt (1), der Paarerzeugungseffekt (2) und der
Photoeffekt (3). e-: Elektron, e+:Positron, Z: Atomkern. (1) und (2) nach Schmüser 1995
4617 Abbildung 4: Der Absorptionskoeffizient μ von Blei als Funktion der Energie E von
Elektronen. Dargestellt sind die Anteile des Compton-Effektes, des Fotoeffektes und
der Paarerzeugung sowie die Summe aller drei Wechselwirkungsprozesse (nach Grehn
& Krause 2007, 492)
Abbildung 5: Längsschnitt des komplett geschlossenen Zählrohr Prototypen von 192819
Abbildung 6: einfache Registrierungsschaltung für ein selbstlöschendes Zählrohr. Einer
Skizze von Geiger nachempfunden. Widerstände jeweils 1 G Ω , Kondensator im pF-
Bereich
Abbildung 7: Einsatzspannung für den Geiger-Müller Zählbetrieb für Luft, Wasserstoff, Argon
und Helium (je 99% rein) bei verschiedenen Drucken und einem Zählrohr mit 1cm
Durchmesser und einem Draht mit 3mm Durchmesser. Der übliche Druck im Zählrohr
beträgt zwischen 7 und 20 cmHg, also etwa 93 bis 26mbar (Korff 1947, 46)24
Abbildung 8: Längsschnitt eines modernen Endfensterzählrohrs26
Abbildung 9: Durchlässigkeit D und Absorption A von Glimmer für drei verschiedene Dicken
d für monoenergetische $\beta\text{-}Strahlung$ in Abhängigkeit von dessen Energie E (aus Kment
& Kuhn 1953, 11)26
Abbildung 10: Durchlässigkeit D und Absorption A von Glimmer für drei verschiedene
Dicken d für γ-Strahlung in Abhängigkeit von dessen Energie E (aus Kment & Kuhn
1953 , 12)
Abbildung 11: Spannungsamplitude U_R am Arbeitswiderstand in qualitativer Abhängigkeit
zur Zählrohrspannung U für α - und β -Strahlung (aus Kment & Kuhn 1953, 2)28
Abbildung 12: Zählrate N in Abhängigkeit der Zählrohrspannung U. Exemplarischer
Ausschnitt des Bereichs E aus Abbildung 11 (aus Kment & Kuhn 1953, 8)29
Abbildung 13: (a) P.J. Kirkbys Ionisationskammer von 1901 (aus Townsend 1915, 272); (b)
Die Ionisationskammer von Rutherford und Geiger 1908b, 143; (c) Müllers
Ionisationskammer von 1927/28 (aus Müller 1928a, 627. Mit freundlicher
Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg) und (d) Längsschnitt nach
Laborbuchskizze des Geiger-Müller Zählrohr Prototypen, Mai 192847
Abbildung 14: Walter Müller mit Dr. Vodicka bei General Motors Defense in San Carlos,
Kalifornien (um 1960). Mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums in
München

Abbildung 15: lonisationskammer für α -Teilchen samt Peripherie nach Rutherford und
Geiger (1908b, 143)57
Abbildung 16: Geiger und Rutherford in Geigers Labor ('liquid air & research room') im Jahr
1912 im Kellergeschoss des Physikinstituts in Manchester. Mit freundlicher
Genehmigung der Emilio Segre Visual Archives, American Institute of Physics College
Park, MD, USA59
Abbildung 17: Grundriss der Keller- und Erdgeschosses des Physikinstituts in Manchester
um 1912 (Todd 2012, 80). Markiert ist Geigers Labor im Kellergeschoss: "Liquid Air &
Research, 55' 10" x 20'4" " Das entspricht einer Fläche von etwa 105 m ² . Mit
freundlicher Genehmigung des Directorate of Estates and Facilities, Manchester
University, UK. Drawing No. 013AB-B00159
Abbildung 18: Längsschnitt eines Kugelzähler von 1912 (links) und Spitzenzähler (rechts)
von 191362
Abbildung 19: oben: Horizontalschnitt des Versuchsaufbaus von Geiger und Bothe (1925b,
641). unten: Ausschnitt des Aufbaus mit den beiden Spitzenzählern und schematischen
Darstellung des vermuteten Streuungseffektes (Bothe & Geiger 1925a, 441). Mit
freundlicher Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg65
Abbildung 20: links: Hans Geiger (aus: Laue & Pohl 1947) und rechts: Walter Müller als
Student in Kiel. Mit freundlicher Genehmigung des Deutschen Museums München72
Abbildung 21: Schaltbild zu Müllers Versuchen mit der Ionisationskammer I inkl. einem nich
eingezeichneten Vorschaltwiderstand von 40 Ω . K ist ein Kondensator mit 0,05 μF , S
ein Schalter, der mit einer Glimmerfolie betätigt wird und W, einem
Erdungswiderstand ("Wasserwiderstand") mit 3 bis 980 kΩ. Der Draht liegt auf
positivem Potential. (Müller 1928b, 643) Mit freundlicher Genehmigung des Springer
Verlags Heidelberg73
Abbildung 22: Eintrag zu Curtiss' Artikel in Müllers Laborbuch: "Zähler mit Phosphorsäure
bearbeiten. Phys.[ical] Rev.[iew] Febr.[uar] 1928, p.[age] 302. (Curtiss[)]"77
Abbildung 23: Eintrag vom 5.Mai 1928 aus Walter Müllers Laborbuch78
Abbildung 24: Ausschnitt aus Müllers Berechnungen zu Abstandsabhängigkeit mit 1/r ² -
Charaktersitik. Rot markiert ist ein offensichtlicher Rechenfehler: Der korrekte Wert
beträgt 62,7 statt 63,5 bzw. 15,7 statt 16. Dennoch erscheint der Messwert bei c auf
Grund seines deutlich verschiedenen Produkts von 61,8 auffälliger80
Abbildung 25: Übertrag aus Müllers Laborbuchseite (Abbildung 24) auf dessen Basis
Abbildung 26 erstellt wurde. Messung a ist die Nullrate, die in Zeile (3) von den Brutto-
Zählraten in Zeile (2) abgezogen wurde. Der Abstand r des unbekannten Präparats zum
Zählrohr ist in Zeile (4) aufgelistet81
Abbildung 26: Meine (bewusst anachronistische) graphische Darstellung von Müllers
Messwerten mit von mir ergänztem statistischen Fehler N. Der geplottete Fit entsprich
der erwarteten quadratischen Funktion $f(r) = 16.2 \cdot r-2$ bei 91% Übereinstimmung.
Bei erte mit dem quadratischen Fit 98,2 %. Ein optimaler Fit von Müllers Messwerten
ergäbe $f(r) = 24.5 \cdot r - 1.3$ bei 97% Übereinstimmung; Bei maskiertem c: $f(r) = 20.9 \cdot r$
r-1,6 bei 99,9% Übereinstimmung81
Abbildung 27: Eintragung in Müllers Laborbuch bzgl. des zweiten und dritten Zählrohrs82
Abbildung 28: Längsschnitt der Ionisationskammer für hohe Drucke aus Müllers Dissertation
(Müller 1928b, 627). Mit freundlicher Genehmigung des Springer Verlags Heidelberg.
All:11 20 E: 11: 61: 1 Cl. b. D: 1 Cl. b.
Abbildung 29: Eine kleine Skizze einer elektrischen Schaltung. Die zwei anderen, weniger
elaborierten Skizzen auf der Seite lassen vermuten, dass der linke Draht die Anode A
des ebenfalls geerdeten Zählrohrs ist. Das Wort "Faden" an dem Messgerät in einer der
anderen Skizzen lässt auf die Verwendung eines Fadenelektrometers schließen. Im
Aufbau entspricht die Schaltung aus zwei Widerständen R, einem Kondensator C, der
Spannungsquelle U und dem Elektrometer E dem der kleinen Skizze in einem später
von mir thematisierten Brief von Geiger (Abbildung 72, S. 157)85
Abbildung 30: Müllers Liste von radioaktiven Präparaten im Institut, Juni 1928.
"Nebenzimmer; 9m; 1mg// Radioact. Zimmer; 27m; 34mg// Direktorzimmer; 13m;
4mg"

Abbildung 31: Mullers Abschatzung über die auf Grund von Höhenstrahlung zu erwartende	
Anzahl an Zählereignissen. I meint vermutlich den Ionenstrom, auf den er schon vorh	
Bezug genommen hat	39
Abbildung 32: Müllers Ergebnis zur ,Messung der γ-Absorption von Radium' . Dies ist die	
einzige mathematische Nebenrechnung, die in seinem Laborbuch zu finden ist	39
Abbildung 33: Meine anachronistische grafische Darstellung von Müllers Messwerten und	
einem exponentiellen Fit	90
Abbildung 34: Notizen zu Riesenzähler 11. "Wirks.[ame] Drahtlänge 25,6 cm, d _i =0,2mm.	
D=29mm, Wandstärke 0,5mm, Oberfläche 245qcm, Volumen 180ccm."	12
Abbildung 35: Müllers Skizze zu seiner "Apparatur im Erdgeschoß". Zu sehen ist das	_
Zählrohr mit zwei Verbindungen zum Gehäuse und zum Zähldraht sowie die	
Metallabschirmung: "Nach unten. 30cm Eisenpanzer, d[er]gl.[eiche] seitlich. Nach	
vorne 10 cm Blei."	13
Abbildung 36: Müllers Ergebnis zur zweiten Absorptionsmessung der Höhenstrahlung mit	, 5
Eisen	15
Abbildung 37: Müllers Skizze zum ersten dokumentierten Umbau eines Zählrohrs, hier Nr.	
Abbituding 37. Munici's Skizze zum ersten dokumenterten ombat emes zum om s, mer ivi.	
Abbildung 38: Parameter für Zählrohr Nr. 12	
Abbildung 39: Skizze und Parameter von Zählrohr 14-16 . Die Berechnung des Volumens de	
Zählrohrs ist nachvollziehbar; die der Oberfläche nicht. Die gesamte Oberfläche des	.3
Zählrohrs beträgt nach meiner Rechnung jedoch 47,1 cm ² . Wenn man annimmt, dass	_
die Werte in der Spalte "wirksam" die jeweilige Oberfläche bzw. Volumen im mittleren	.1
Bereich des Zählrohrs meinen, würde die Länge dieses "wirksamen" Bereichs etwa 6	
cm betragen	
Abbildung 40: Notizen über eine erste Messung an Uran. In Anbetracht des Ergebnisses (91	-
37) ist wohl in der Zeile "ohne Uran" ein Kommafehler aufgetreten. Der	
nachvollziehbare Wert wäre 54 statt 5,410	
Abbildung 41: Skizze der Zählrohre 19-21 . "Messing. Cu-Kapillare. 1mm Wandstärke, 2 cm	
Durchm.[esser], 13,6 cm Länge, Wirks[ame] Drahtlänge ca 8,5cm. Oberfl[äche]: 55qcm	
+ 7 (Hartgummi)"10)1
Abbildung 42: erster Eintrag von Geiger über die Zählrohre Plön I und Plön II10	
Abbildung 43: Eintrag in Müllers Labor direkt vor dem 22.10.192810)4
Abbildung 44: vermutliche Skizze der Zählrohre Plön I und II in einer wasserdichten	
Kammer in Müllers Laborbuch10)5
Abbildung 45: Notizen zur Empfindlichkeitsmessung an Zähler Plön I zwischen 25. Oktober	
und 6. November 192810)6
Abbildung 46: Notizen zu Messungen mit dem Rutherford Zähler (vermutlich Nr. 22). Zu	
lesen ist die Anzahl an Ausschlägen auf Grund von 1mg Radium in 1m Entfernung von	i
800. Gemessen wurde dies mit 1/20 mg Radium in 53cm Abstand (113 Ausschläge pr	
Minute). Außerdem eine Tabelle und ein zugehöriger Graph über das Verhältnis von	•
angelegter Spannung und Ausschlags-Anzahl. Ab 1300 Volt erkennt man den heute als	2
"Geiger-Plateau" bezeichneten Bereich des Arbeitspunktes	
Abbildung 47: Skizze zu einem Richtungsversuch.	
Abbildung 48: Tabelle aus (Geiger & Müller 1928a, 840). Nr. 1, 2 und 3 entsprechen den	
Zählrohren 35, 30 und 37 im Laborbuch. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel	. –
Verlags Leipzig	. 5
Abbildung 49: Ausschnitte aus Müllers Laborbuch bzgl. der Zählrohre 37 (oben) und 30	
(unten)	6،
Abbildung 50: links: Abdruck (Geiger & Müller 1928a, 841. Mit freundlicher Genehmigung	
des Hirzel Verlags Leipzig) und rechts: Skizze zur Abschirmung des Zählrohrs durch	
Eisen	
Abbildung 51: Zugehörige Daten zu Absorptionsmessungen der Höhenstrahlung in Eisen.11	
Abbildung 52: links: Laborbuchskizze und rechts: Artikelabbildung (Geiger & Müller 1929c	,
489. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig) zur Abhängigkeit von	
Teilchenanzahl, Gasdruck und Drahtdicke sowie Rohrdurchmesser11	19
Abbildung 53: Laborbuchnotizen und –skizzen zur Ortsabhängigkeit eines Strahlers sowie	
unten rechts die entsprechende Abbildung in der Publikation (Geiger & Müller 1929c,	
491. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig)	

Abbildung 54: Erste Eintragung in Mullers Laborbuch über ein alternatives Gas in	
Zählrohren am 2. Juli 192812	1
Abbildung 55b: ausführlichere Messreihe zu alternativen Gasen (CO ₂ und Ar) im Zählrohr	
Anfang November 1928	
Abbildung 56: Oben: Der Karusselapparat im Artikel mit Messwert-Tabelle (Geiger & Müller	
1929c, 492. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig) sowie unten: di	
zugehörigen Eintragen im Münchener Laborbuch (unten links) und Müllers Laborbuch	
(unten rechts)	4
Abbildung 57: Laborbuchausschnitte zur Karusselapparatur im vierten Laborbuch von	
Müller12	
Abbildung 58: veröffentlichte Zeichnung (oben, Geiger & Müller 1929c, 493. Mit freundliche	r
Genehmigung des Hirzel Verlags Leipzig) und Skizze mit Notizen im Münchener	
Laborbuch (Mitte) und in Müllers Laborbuch (Unten). Die Handschrift in den	
Laborbüchern scheint jedoch in beiden Fällen Müllers zu sein12	6
Abbildung 59: links Laborbuch- und rechts Artikeldarstellung des Halbzylinder-Zählers	
(Geiger & Müller 1929c, 492. Mit freundlicher Genehmigung des Hirzel Verlags	
Leipzig)12	7
Abbildung 60: Der Zähler nach Hess & Lawson (Hess & Lawson 1916, 5). Gehäuseradius	
etwa 9mm, innerer Kugelradius 2mm, angelegte Spannung 1480V. Mit freundlicher	
Genehmigung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien12	9
Abbildung 61: Längsschnitt des Kugelzählers (Geiger & Rutherford 1912, 620) "It consisted	
of a metallic hemisphere, near the centre of which was a spherical electrode A	
supported by a metal rod. The α particles entered in the hemisphere through the	
opening B which was covered with a thin sheet of mica." Mit freundlicher Genehmigur	_
der Taylor & Francis Verlagsgruppe13	
Abbildung 62: Vergleich der Feldstärken E in Abhängigkeit des Abstands r zur Anode. Zähle	r
nach Hess und Lawson (HL): Gehäuseradius 9mm, Anodenradius 2mm, U=1450 V.	
Geiger-Müller Zählrohr Prototyp (GM): Gehäuseradius 10mm, Anodenradius 0,15mm,	
U=1200 V13	
Abbildung 63: Längsschnitt eines Spitzenzählers mit einer später häufig verwendeten Wuls	
13	9
Abbildung 64: Zählrohr Nr. 16 im Archiv der Smithsonian Institution, Juli 2011. Links:	
Draufsicht, rechts: Detailaufnahme der Markierung14	·6
Abbildung 65: Zählrohr Nr. 16, links: Dichtung mit Glaskapillare des Artefakts, rechts:	
Ausschnitt aus dem Laborbuch mit Angaben zur Größe des Zählrohrs, der Oberfläche	
und des Volumens, unten: Röntgenaufnahme des Artefakts. Mit freundlicher	_
Genehmigung der Smithsonian Institution Washington, DC.	.8
Abbildung 66: Detailaufnahme des Röntgenbildes vom Zählrohr Artefakt aus zwei	
verschiedenen Blickrichtungen. Bariumsulfat-Öl-Dichtung (a), Ebonitstopfen (b),	
Anodendraht (c), Aufhängung des Drahtes (d) und ein drittes Material, welches Draht	
und Aufhängung verbindet (e).	.9
Abbildung 67: Im Vergleich zu Abbildung 66 ist hier die gegen-überliegende Seite des	_
Zählrohrartefakts als Röntgenbild im Detail dargestellt	
Abbildung 68: Laborbuchskizzen der designierten Zählrohr-generationen15	0
Abbildung 69: Schemata der drei ersten Zählrohrgenerationen. Prototyp, Zählrohr 10 und	
Zählrohr 14-16	
Abbildung 70: kurze Auflistung von Müller über die ersten neun Zählrohre vom 6. Juni 1928	<i>.</i>
Nr. 4 war Müllers "Alte Ionis.[ations]kammer f.[ür] hohe Drucke", Nr. 5 war eine	
"Versenkkammer (Werkstattzeichnung" deren Zweck auch im Folgenden nicht näher	
erläutert wird	1
Abbildung 71: frühe Skizze von Müller zum experimentellen Aufbau seinen	
Ionisationskammer-Experimenten mit einer Vakuumglocke, den Schaltzeichen für ein	
Quadrantenelektrometer (links) und eine Spannungsquelle (mittig) sowie einem	
Manometer und Hahn (rechts)15	
Abbildung 72: Geigers Schaltskizze zum einfachen Betrieb eines Zählrohrs (Nr. 68 in Müller	S
Laborbuch) mit zwei " 10^9 Ohm" = 1 G Ω -Widerständen, einem	
"Sicherheitskond.[ensator], Spannungsquelle mit 1280 Volt und	
"Fadenel.[ektrometer]"15	5

Literaturverzeichnis

- Abele, Johannes, 2002. *Wachhund des Atomzeitalters Geigerzähler in der Geschichte des Strahlenschutzes*, München, Deutsches Museum.
- Allchin, Douglas, 2004. Pseudohistory and Pseudoscience. In: *Science & Education*, 13, 179-195.
- Allchin, Douglas, 2013. *Teaching the Nature of Science. Perspectives & Resources,* Saint Paul, SHiPS Education Press.
- Alsop, Steve, 2001. Living with and learning about radioactivity: A comparative conceptual study. In: *International Journal of Science Education*, 23, 263ff.
- Atkins, Peter W., 1990. Physikalische Chemie, Weinheim, VCH.
- Backmund, U. & Wilhelm, T., 2009. Selbstbau einer kontinuierlichen Diffusions-Nebelkammer. In: *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 58, 27-32.
- Badash, Lawrence, 1969. *Rutherford and Boltwood: Letters on Radioactivity,* New Haven, Yale University Press.
- Badash, Lawrence, 1985. *Kapitza, Rutherford and the Kremlin,* New Haven, Yale University Press.
- Barkla, Charles, 1904. Polarization in Röntgen Rays. In: Nature, 69, 463.
- Barth, Michael, 2004. Faraday bei der Entdeckung der Induktion über die Schulter geschaut. *In:* C. Hößle, Höttecke, D. & Kircher, E. (eds.): *Lehren und Lernen über die Natur der Naturwissenschaften.* Hohengehren: Schneider-Verlag.
- Barth, Michael, 2010. Prozessbezogene Kompetenzen: Eine Lanze für historische Zugänge. In: *Praxis der Naturwissenschaften Physik*, 59, 23-28.
- Barth, Michael, 2012. Durchbrechen wir den Teufelskreis! Erfahrungen aus meinem Unterricht und Überlegungen zur Implementation von Naturwissenschaftsgeschichte in der Lehrerausbildung. *In:* P. Heering, Markert, M. & Weber, H. (eds.): *Experimentelle Wissenschaftsgeschichte didaktisch nutzbar machen. Ideen, Überlegungen und Fallstudien.* Flensburg: Flensburg University Press.
- Bateman, Harry, 1910. The solution of a system of differential equations occuring in the theory of radio-active transformations. In: *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Mathematical and physical sciences,* 15, 423-427.
- Becquerel, Henri, 1896. Sur les radiations invisibles émises par les corp s phosphorescents. In: *Comptes Rendus de l'Académie des sciences*, 122, 501-503.
- Benetsch, A., 1913. Silit und seine Verwendung in Industrie und Wissenschaft. In: *Polytechnisches Journal*, 328, 166-169.
- Bortz, Jürgen & Döring, Nicole, 2006. Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler, Heidelberg, Springer.
- Bothe, Walter, 1942. Die Geigerschen Zählmethoden. In: *Die Naturwissenschaften,* 30. Jahrgang, 593-599.

- Bothe, Walther, 1944. Der Physiker und sein Werkzeug, Berlin, de Gruyter.
- Bothe, Walther & Geiger, Hans, 1924. Ein Weg zur experimentellen Nachprüfung der Theorie von Bohr, Kramers und Slater. In: Zeitschrift für Physik, 26, 44.
- Bothe, Walther & Geiger, Hans, 1925a. Experimentelles zur Theorie von Bohr, Kramers und Slater. In: Die Naturwissenschaften, 440-441.
- Bothe, Walther & Geiger, Hans, 1925b. Über das Wesen des Comptoneffekts; ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung. In: Zeitschrift für Physik, 32, 639-663.
- Boyes, Edward & Stanisstreet, Martin, 1994. Children's Ideas about Radioactivity and Radiation: sources, mode of travel, uses and dangers. In: Research in Science & Technological Education, 12, 145ff.
- Breidbach, Olaf; Heering, Peter; Müller, Matthias & Weber, Heiko, 2010. Experimentelle Wissenschaftsgeschichte. In: O. Breidbach, Heering, P., Müller, M. & Weber, H. (eds.): Experimentelle Wissenschaftsgeschichte. München: Wilhelm Fink.
- Bromberg, Joan Lisa, 1993. The laser in America, 1950-1970, Cambridge, Mass., MIT
- Cassidy, David, 1979. Gustav Hertz, Hans Geiger und das Physikalische Institut der Technischen Hochschule Berlin in den Jahren 1933 bis 1945. In: R. Rürup (ed.): Wissenschaft und Gesellschaft : Beiträge zur Geschichte der Technischen *Universität Berlin 1879 - 1979.* Berlin: Springer.
- Ceranski, Beate, 2013. Helium from Radium. Looking at a crucial experiment in early radioactivity research. In: P. Heering, Klassen, S. & Metz, D. (eds.): Enabling Scientific Understanding through Historical Instruments and Experiments in Formal and Non-Formal Learning Environments. Flensburg: Flensburg University Press.
- Collins, Harry, 1974. The TEA Set: Tacit Knowledge and Scientific Networks. In: *Science Studies,* **4,** 165-186.
- Collins, Harry, 2011. Tacit and Explicit Knowledge, Chicago and London, The University of Chicago Press.
- Compton, Arthur H., 1923. A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements. In: *Physical Review*, 21, 297, 483-502.
- Crawford, Elisabeth, 2002. The Nobel Population 1901-1950. A Census of the Nominators and Nominees for the Prizes in Physics and Chemistry, Tokyo, Universal Academy Press.
- Curie, Pierre; Curie, Marie & Bémont, Gustave, 1898. Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende. In: Comptes rendus de *l'Académie des Sciences,* 127, 1215-1217.
- Curtiss, Leon F., 1928. Minutes of the Nashville Meeting. In: *Physical Review*, 31, 302. Curtiss, Leon F., 1950. The Geiger-Müller Counter, Washington, D.C., National Bureau of Standards.
- Czichos, H. & Hennecke, M., 2007. Hütte: Das Ingenieurwissen, Berlin u.a., Springer.
- Dasannacharya, B. & Moorthy, T.S., 1937. Sensitiveness of a geiger point counter in the region between its threshold voltage and the voltage for constant counting. In: Philosophical Magazine Series 7, 23, 609-620.
- Demtröder, Wolfgang, 1996. Experimentalphysik 3 Atome, Moleküle und Festkörper, Berlin, u.a., Springer.
- Deutschland, Bundesrepublik. 2001. Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) [Online]. Available: https://http://www.vbg.de/apl/gv/strlschv/anl3.htm.
- Deutschland, Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminster der Länder in der Bundesrepublik, 2005. Bildungsstandards im Fach Physik für den

- Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10), München, Neuwied, Wolters Kluwer.
- Drake, Stillman., 1978. Galileo at Work. His Scientific Biography, New York, Dover Publications.
- Engels, Timo, 2012. Kurze Geschichte der Dichtemessung von Flüssigkeiten. In: P. Heering, Markert, Weber, (eds.): Experimentelle M. & Н. Wissenschaftsgeschichte didaktisch nutzbar machen. Ideen, Überlegungen und Fallstudien. Flensburg: Flensburg University Press.
- Engels, Wolfgang, 2006a. Der "Volkskühlschrank" von Albert Einstein und Leo Szilard. In: *Physik in unserer Zeit*, 3, 144.
- Engels, Wolfgang, 2006b. Die Nebelkammeraufnahme das automatisch generierte Laborbuch? In: M. Heßler (ed.): Konstruierte Sichtbarkeiten. Wissenschaftsund Technikbilder seit der Frühen Neuzeit. München: Fink Verlag.
- Fajans, Kasimir, 1913. Radioactive transformations and the periodic system of the elements. In: Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 46, 422-439.
- Fick, Dieter & Kant, Horst, 2008. Walther Bothe's contributions to the particle-wave dualism of light. In: Preprints des MPI für Wissenschaftsgeschichte, 360, 20.
- Fick, Dieter & Kant, Horst, 2009. Walther Bothe's contributions to the understanding of the wave-particle duality of light. In: Studies in History and Philosophy of *Modern Physics*, 40, 395-405.
- Fleck, Ludwik, 1980. Entstehung und Entwicklung einer wissenschaftlichen Tatsache, Frankfurt am Main, Suhrkamp.
- Frercks, Jan. 2001. Die Forschungspraxis Hippolyte Fizeaus. Eine Charakterisierung ausgehend von der Replikation seines Ätherwindexperiments von 1852 Berlin, Wissenschaft und Technik Verlag.
- Frercks, Jan, 2012. Wissenschaftsgeschichte in der Schule? Ja, aber im Geschichtsunterricht! *In:* P. Heering, Markert, M. & Weber, H. (eds.): Experimentelle Wissenschaftsgeschichte didaktisch nutzbar machen. Ideen, Überlegungen und Fallstudien. Flensburg: Flensburg University Press.
- Frey, Werner. 2007. Radioaktivität und Strahlenschutz Materialien zum Erwerb der Fachkunde im Strahlenschutz [Online]. Stuttgart: Landesinstitut für Schulentwicklung. Available: http://grundpraktikum.physik.unisaarland.de/scripts/Naturwissenschaftlicher_Unterricht_Radioaktivitaet.pdf [Accessed 26.03.2014.
- Galison, Peter, 1997. Image and Logic A material Culture of Microphysics, Chicago, University of Chicago Press.
- Geiger, Hans, 1906. Strahlungs-, Temperatur- und Potentialmessungen in Entladungsröhren bei starken Strömen, Leipzig, Johann Ambrosius Barth.
- Geiger, Hans, 1908. The irregularities in the radiation from radioaktive bodies. In: Philosophical Magazine Series 6, 15, 539-547.
- Geiger, Hans, 1913. Über eine einfache Methode zur Zählung von alpha und beta Strahlen. In: Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft, 15, 534-539.
- Geiger, Hans, 1914. Stoßweise Spitzenentladung und die elektrische Methode der Zählung der alpha Teilchen - Erwiderung auf die gleichlautende Arbeit der Herren L. Myssowsky und K. Nesturch. In: Annalen der Physik, 44, 813-815.
- Geiger, Hans, 1932. Bemerkung zur Arbeit Neufeldt über die Struktur von Absorptionskanten leichter Elemente. In: Zeitschrift für Physik, 76, 420.
- Geiger, Hans, 1933. Durchgang von α -Strahlung durch Materie. In: H. Geiger & Scheel, K. (eds.): Handbuch der Physik. Berlin: Springer.
- Geiger, Hans & Klemperer, Otto, 1928. Beitrag zur Wirkungsweise des Spitzenzählers. In: Zeitschrift für Physik, 49, 753-760.

- Geiger, Hans & Makower, Walter, 1920. Meßmethoden auf dem Gebiete der Radioaktivität, Braunschweig, Vieweg & Sohn.
- Geiger, Hans & Marsden, Ernest, 1909. On a diffuse reflection of the alpha-Particles. In: *Proceedings of the royal society*, 82, 495-500.
- Geiger, Hans & Marsden, Ernest, 1913. The laws of deflexion of alpha particles through large angles. In: *Philosophical Magazine Series 6*, 25, 604-623.
- Geiger, Hans & Müller, Walther, 1928a. Das Elektronenzählrohr. In: Physikalische Zeitschrift, 29, 839-841.
- Geiger, Hans & Müller, Walther, 1928b. Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten. In: Die Naturwissenschaften, 617-618.
- Geiger, Hans & Müller, Walther, 1929a. Das Elektronenzählrohr, seine Arbeitsweise und Anwendbarkeit. In: Forschungen und Fortschritte, Sonderabdruck April 1929.
- Geiger, Hans & Müller, Walther, 1929b. Demonstration des Elektronenzählrohrs. In: *Physikalische Zeitschrift*, 30, 523.
- Geiger, Hans & Müller, Walther, 1929c. Technische Bemerkungen zum Elektronenzählrohr. In: Physikalische Zeitschrift, 30, 489-493.
- Geiger, Hans & Nutall, J. M. 1912a. The ranges of the alpha particles from the thorium and actinium products. In: Philosophical Magazine Series 6, 24, 647-
- Geiger, Hans & Nutall, J.M., 1912b. The Ranges of the alpha particles from Uranium. In: *Philosophical Magazine Series* 6, 23, 439-445.
- Geiger, Hans & Rutherford, Ernest, 1912. Photographic registration of alpha particles. In: *Philosophical Magazine Series* 6, 24, 618-623.
- Geiger, Hans & Werner, A., 1924. Die Zahl der von Radium ausgesandten alpha Teilchen. In: Zeitschrift für Physik, 21, 187ff.
- Gesellschaft, Deutsche Physikalische 2006. Thesen für Lehramtsstudium im Fach Physik. Bad Honnef: DPG.
- Gesellschaft, Deutsche Physikalische 2014. Zur fachlichen und fachdidaktischen Ausbildung für das Lehramt Physik. Bad Honnef: DPG.
- Grehn, Joachim & Krause, Joachim, 2007. Metzler Physik, Braunschweig, Westermann Schroedel Diesterweg.
- Gröber, S.; Vetter, M.; Eckert, B. & Jodl, H.J., 2010. Experimente zur Radioaktivität -Remotely Controlled Laboratory (RCL). Naturwissenschaften Physik, 59, 44-48.
- Halliday, David; Resnick, Robert & Walker, Jearl, 2003. Physik, Weinheim, Wiley CVH Hamblin, F. T. & Johnson, C.H., 1937. Geiger-Müller counters for radiochemical investigations. In: *Philosophical Magazine Series 7*, 24, 553-571.
- Härtig, H.; Kauertz, A. & Fischer, H. E., 2012. Nutzung von Schulbüchern zur Unterrichtsvorbereitung in Physik. In: MNU - Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 65, 197-200.
- Haxel, Otto, 1987. Hans Geiger. In: W. Ribbe (ed.): Berlinische Lebensbilder. Berlin: Colloquium Verlag.
- Heering, Peter, 1992. On Coulomb's inverse square law. In: American Journal of Physics, 60, 988-996.
- Heering, Peter, 1997. Durch Schläge zum Verstehen. In: A. Dally, Nielsen, T. & Rieß, F. (eds.): Geschichte und Theorie der Naturwissenschaften im Unterricht: Ein Weg zur naturwissenschaftlich-technischen Allgemeinbildung? Loccum: Evangelische Akademie.
- Heering, Peter, 1998. Das Grundgesetz der Elektrostatik. Experimentelle Replikation und wissenschaftshistorische Analyse, Wiesbaden, Deutscher Universitäts Verlag.

- Heering, Peter, 2007. Das Konzept des Experimentierstils zur Beschreibung historischer Experimentierpraxis. In: B. Choluj & Joerden, J. C. (eds.): Von der wissenschaftlichen Tatsache zur Wissensproduktion. Ludwig Fleck und seine Bedeutung für die Wissenschaft und Praxis. Frankfurt am Main u.a.: Peter Lang.
- Heering, Peter, 2008. The Enlightened Microscope Re-enacting and Analysing Projections with 18th Century Solar Microscopes. In: British Journal for the History of Science, 41, 345-367.
- Heering, Peter, 2010a. An experimenter's gotta do what an experimenter's gotta do but how? In: ISIS, 101, 794-805.
- Heering, Peter, 2010b. Materialisiertes Handlungswissen die Praxis mit dem Sonnenmikroskop (1780/1791). In: O. Breidbach, Heering, P., Müller, M. & Weber, H. (eds.): Experimentelle Wissenschaftsgeschichte. München: Wilhelm Fink.
- Heering, Peter, 2014. Historical Approaches in German Science Education. In: Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, accepted.
- Heering, Peter & Höttecke, Dietmar, 2011. Was ist Physik? In: H. Wiesner, Schecker, H. & Hopf, M. (eds.): Physikdidaktik kompakt. Hallbergmoos: Aulis.
- Heering, Peter; Markert, Michael & Weber, Heiko, 2012. Experimentelle Wissenschaftsgeschichte didaktisch nutzbar machen. Ideen, Überlegungen und Fallstudien., Flensburg, Flensburg University Press.
- Heilbron, J.L., 1979. Electricity in the 17th and 18th Centuries, Berkley, Los Angeles, University of California Press.
- Heinicke, Susanne, 2012. Aus Fehlern wird man klug: eine genetisch-didaktische Rekonstruktion des "Messfehlers", Berlin, Logos.
- Heinicke, Susanne, 2014. "Radioaktivität entsteht, wenn man Strom herstellt" -Alltagsvorstellungen zu Radioaktivität und Kernzerfall bei Schülerinnen und Schülern. In: Naturwissenschaft im Unterricht Physik, 9-13.
- Hentschel, Klaus, 2008. Unsichtbare Hände. Zur Rolle von Laborassistenten, Mechanikern, Zeichnern u. a. Amanuenses in der physikalischen Forschungsund Entwicklungsarbeit, Stuttgart, GNT.
- Hess, Victor F. & Lawson, Robert W., 1916. Eine Methode zur "Zählung" der gamma Strahlen In: Mitteilungen aus dem Institut für Radiumforschung, 90.
- Hess, Victor F. & Lawson, Robert W., 1924. The number of alpha particles emitted by radium. In: *Philosophical Magazine Series* 6, 48, 200-207.
- Hild, Kurt, 1930. Arbeitsweise des Geigerschen Spitzenzählers. Inaugural Dissertation,
- Hoffmann, Dieter 2002. Hans Geiger. In: B. Harrison & Matthew, H. (eds.) Oxford dictionary of national biography. Oxford: Oxford University Press.
- Hoffmann, Dieter, 2012. Werner Kolhörster: Pionier der Höhenstrahlungsforschung. In: *Physik in unserer Zeit*, 281-287.
- Holmes, Frederic L.; Renn, Jürgen & Rheinberger, Hans-Jörg, 2003a. Introduction. In: F. L. Holmes, Renn, J. & Rheinberger, H.-J. (eds.): Reworking the Bench. Research Notebooks in the History of Science. Dodrecht: Kluwer Academic.
- Holmes, Frederic L.; Renn, Jürgen & Rheinberger, Hans-Jörg 2003b. Reworking the Bench: Research Notebooks in the History of Science. Archimedes, New *Studies in the History and Philosophy of Science and Technology 7.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Hößle, Corinna; Höttecke, Dietmar & Kircher, Ernst, 2004. Lehren und Lernen über die Natur der Naturwissenschaften, Hohengehren, Schneider Verlag.
- Höttecke, Dietmar, 2001a. Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen, Berlin, Logos.

- Höttecke, Dietmar, 2001b. Die Vorstellungen von Schülern und Schülerinnen von der "Natur der Naturwissenschaften". In: Zeitschrift für Didaktik der *Naturwissenschaften*, 7, 7-23.
- Höttecke, Dietmar, 2012. In der Schule mit Geschichte über Naturwissenschaften lernen. Begründen, Probleme, Strategien und ein Beispiel. In: P. Heering, Markert, M. & Weber, H. (eds.): Experimentelle Wissenschaftsgeschichte didaktisch nutzbar machen. Ideen, Überlegungen und Fallstudien. Flensburg: Flensburg University Press.
- Höttecke, Dietmar; Henke, Andreas & Rieß, Falk, 2012. Implementing History and Philosophy in Science Teaching - Strategies, Methods, Results and Experiences from the European Project HIPST. In: Science & Education, 21, 1233-1261.
- Hughes, Jeff, 1993. The Radioactivists. Community, Controversy and the Rise of Nuclear Physics. PhD Thesis, University of Cambridge.
- Hughes, Jeff, 1998. Plasticine and Valves: Industry, Instrumentation and the Emergence of Nuclear Physics. In: J.-P. Gaudillière & Löwy, I. (eds.): The Invisible Industrialist. London: Macmillan.
- Hughes, Jeff, 2008. William Kay, Samuel Devons and memories of practice in Ruhterford's Manchester laboratory. In: Notes & Records of The Royal Society,
- Jennings, S. G., 1988. The Mean Free Path in Air. In: Journal of Aerosol Science, 19, 159-166.
- Kattmann, Ulrich; Duit, Reinders; Gropengießer, Harald & Komorek, Michael, 1997. Das Model der Didaktischen Rekonstruktion - Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. In: Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften, 3, 3-18.
- Kirkby, P.J., 1902. On the electrical conductivities produced in air by the motion of negative ions. In: Philosophical Magazine Series 6, 3, 212-225.
- Klemperer, Otto, 1928a. Über die Einsatzspannung des Geigerschen Spitzenzählers. In: Zeitschrift für Physik, 51, 341ff.
- Klemperer, Otto, 1928b. Untersuchungen mit dem Geigerschen Spitzenzähler über den Einfluß des Kathodenmaterials auf das Funkenpotential. In: *Physikalische Zeitschrift,* 29, 947f.
- Kment, V. & Kuhn, A., 1953. Das Geiger-Müller-Zählrohr Aufbau, Schaltung und Handhabung, Leipzig, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G.
- Kniepkamp, Heinrich, 1929. Zur Wirkungsweise des Elektronenzählrohres von Geiger und Müller. In: *Physikalische Zeitschrift*, 30, 237-238.
- Kolhörster, Werner, 1926a. Bericht über die durchdringende Strahlung in der Atmosphäre. In: Die Naturwissenschaften, 14, 290-295.
- Kolhörster, Werner, 1926b. Bericht über die durchdringende Strahlung in der Atmosphäre - Schluß. In: Die Naturwissenschaften, 14, 313-319.
- Kolhörster, Werner, 1932. Vorschlag zu einheitlicher Bezeichnung der Ionisierungsstärke in Gasen. In: Zeitschrift für Physik, 79, 682-683.
- Korff, Sebastian, 2011. Wie das Knacken in den Geigerzähler kam. In: Physik in unserer Zeit, 203-204.
- Korff, Sebastian, 2012a. Das Geiger-Müller-Zählrohr. Eine wissenschaftshistorische Analyse mit der Replikationsmethode. In: NTM - Journal of the History of Science, Technology, and Medicine, 20, 271-308.
- Korff, Sebastian, 2012b. Geigers Werk und Müllers Beitrag. Elektrische Zählmethoden der Radioaktivitätsforschung des frühen 20. Jahrhunderts. In: Heering, Markert, M. & Weber, H. (eds.): Experimentelle

- Wissenschaftsgeschichte didaktisch nutzbar machen. Ideen, Überlegungen und Fallstudien. Flensburg: Flensburg University Press.
- Korff, Sebastian, 2013a. Beyond the Geiger-Müller Counter. In: P. Heering, Klassen, S. & Metz, D. (eds.): Enabling Scientific Understanding through Historical Instruments and Experiments in Formal and Non-Formal Learning *Environments.* Flensburg: Flensburg University Press.
- Korff, Sebastian, 2013b. How the Geiger Counter started to crackle: Electrical counting methods in early radioactivity research. In: Annalen der Physik (Berlin), 525, A88-92.
- Korff, Sebastian, 2014a. Wer zählt Geiger oder Müller? Die Geschichte von Geiger, Müller und ihrem Zählrohr als Zugang zu Aspekten von Nature of Science. In: *Naturwissenschaft im Unterricht Physik*, 141/142, 32-37.
- Sebastian, 2014b. Wie das Knacken in den Geigerzähler kam. Korff. Wissenschaftshistorische Analyse und fachdidaktische Aspekte des Geiger-Müller Zählrohrs. Dissertationsschrift, Universität Flensburg.
- Korff, Sebastian & Panusch, Martin 2012. Vorkurse auf dem Prüfstand -Mathematischer Kompetenzerwerb im GHR Lehramts Physik Studium. PhyDid B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung.
- Korff, Sebastian & Panusch, Martin, 2013. Analyse von mathematischem Kompetenzerwerb mit dem Rasch-Modell. In: S. Bernholt (ed.): Inquiry-based Learning - Forschendes Lernen. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Hannover 2012. Kiel: IPN.
- Korff, Serge A., 1947. Electron and Nuclear Counters Theory and Use, New York u.a., D. Van Nostrand Company
- Korff, Serge A., 1949. Electron and Nuclear Counters Theory and Use, New York u.a., D. Van Nostrand Company
- Kovarik, Alois, 1921. On Emergent β Rays from Materials of Different Atomic Weight and Different Thickness Produced by γ Rays: Studied by the Statistical Method. In: Physical Review Series II, 18, 154.
- Kowal, Sabine & O'Connell, Saniel C., 2005. Zur Transkription von Gesprächen. In: U. Flick, Kardorff, E. v. & Steinke, I. (eds.): Qualitative Forschung - Ein Handbuch. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Kubli, Fritz, 2002 [1998]. Plädoyer für Erzählungen im Physikunterricht, Köln, Aulis.
- Kubli, Fritz, 2005. Mit Geschichten und Erzählungen motivieren Beispiele für den mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht, Köln, Aulis.
- Kuhn, Thomas S., 2012. The Structure of Scientific Revolutions, Chicago, University of Chicago Press.
- Kultusministerium, Niedersächsisches. 2008. Kerncurriculum für das Gymnasium Schuljahrgänge *5-10.* Geschichte [Online]. Hannover. Available: http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/kc_gym_gesch_08_nib.pdf [Accessed 06.04.2014.
- Kultusministerium, Niedersächsisches. 2009. Kerncurriculum für das Gymnasium, die Gesamtschule, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg. [Online]. Available: http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/kc_physik_go_i_2009.pdf [Accessed 30.01.2014.
- Kultusministerkonferenz. 2004. Einheitliche Prüfungsanforderungen in der Abiturprüfung Physik (EPA) [Online]. Available: http://db2.nibis.de/1db/cuvo/datei/epa_physik.pdf [Accessed 30.01.2014.
- Lacki, Jan & Yacin, Karim, 2005. Replication of Guye and Lavanchy's experiment on the velocity dependency of inertia. In: *Archives des Sciences*, 58, 159-170.

- Laue, Max von der & Pohl, R.W., 1947. Hans Geiger (Nachruf). In: Zeitschrift für Physik, 124.
- Lawson, Robert & Hess, Victor, 1918. Erfahrungen und Spezialergebnisse bei der Zählung von alpha-Teilchen. In: Mitteilungen des Instituts für Radiumforschung, 108.
- Lieb, Klaus-Peter, 2003. Atomkerne. In: W. Raith (ed.): Bestandteile der Materie -Atome, Moleküle, Atomkerne, Elementarteilchen. 2 ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter.
- Linjse, P.L.; Eijkelhof, H.M.C.; Klaassen, C.W.J.M. & Scholte, R.L.J., 1990. Pupils' and mass-media ideas about radioactivity. In: International Journal of Science Education, 12, 67 ff.
- Lukner, C., 2007. Endlagerung radioaktiver Abfälle. In: **Praxis** der *Naturwissenschaften Physik*, 56, 31-35.
- Makus, Andreas, 2002. Felix Ehrenhaft und der Streit um das Elektron. In: Blätter für *Technikgeschichte*, 64, 25-45.
- Makus, Andreas, 2003. Zur Konstitution der elektrischen Ladung: Replikation der Ladungsmessungen Felix Ehrenhafts mit Quecksilber-Aerosol. Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität.
- Malley, Marjorie C., 2011. Radioactivity. A History of a Mysterious Science, Oxford, Oxford University Press.
- Markert, Michael, 2012. Wissenschaftsgeschichte im Unterricht. Eine Analyse von Schulbüchern im Fach Biologie. . Dissertation, Jena.
- McComas, William, 1998. The Nature of Science in Science Education. Rationales and Strategies, Dodrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers.
- McComas, William; Clough, Michael & Almazroa, Hiya, 1998. The Role and Character of the Nature of Science in Science Education. In: W. McComas (ed.): The Nature of Science in Science Education. Rationales and Strategies. Dodrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Merzyn, Gottfried, 1994. Physikschulbücher, Physiklehrer und Physikunterricht. Beiträge auf der Grundlage einer Befragung westdeutscher Physiklehrer, Kiel,
- Millar, Robin, 1994. School students' understanding of key ideas about radioactivity and ionizing radiation. In: *Public Understand. Sci.*, 3, 53-70.
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein. o.J.-a. Lehrplan für die Sekundarstufe I der weiterführenden allgemeinbildenden Schulen [Online]. http://lehrplan.lernnetz.de/index.php?wahl=143 [Accessed 30.01.2014.
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig-Holstein. o.J.-b. Lehrplan für die Sekundarstufe II [Online]. Available: http://lehrplan.lernnetz.de/index.php?wahl=102 [Accessed 30.01.2014.
- Montgomery, C. G. & Montgomery, D. D., 1940. The discharge mechanism of Geiger-Mueller Counters. In: *Journal of the Franklin Institute*, 230, 780.
- Mork, Sonja M., 2011. An interactive learning environment designed to increase the possibilities for learning and communicating about radioactivity. In: *Interactive learning environments,* 19, 163-177.
- Müller, Falk, 2004. Gasentladungsforschung im 19. Jahrhundert, Berlin, Diepholz, GNT-Verlag.
- Müller, Rainer, 2012. Radioaktivität auf dem Spielplatz. In: Praxis der Naturwissenschaften Physik, 61, 42-43.
- Müller, Walter 1928a. Die Rolle des positiven Ions bei der selbsttätigen Entladung in Luft. Kiel: Deutsches Museum München NL024.

- Müller, Walther, 1928b. Die Rolle des positiven Ions bei der selbsttätigen Entladung in Luft. In: Zeitschrift für Physik, 48, 624-646.
- Myssowsky, L. & Nesturch, K., 1914. Stoßweise Spitzenentladungen und die elektrische Methode der Zählung der alpha Teilchen. In: Annalen der Physik, 43, 461-472.
- Nawrath, Dennis, 2010a. Die Analyse von Newtons Prismenexperimenten zur Untersuchung von Licht und Farben (1672) mit der Methode der Replikation - Ein Erfahrungsbericht. In: O. Breidbach, Heering, P., Müller, M. & Weber, H. (eds.): Experimentelle Wissenschaftsgeschichte. München: Wilhelm Fink.
- Nawrath, Dennis, 2010b. Kontextorientierung. Rekonstruktion einer fachdidaktischen Konzeption für den Physikunterricht. Doktor Dissertation, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg.
- Neufeldt, H., 1931. Struktur von Absorptionskanten leichter Elemente gemessen mit dem Elektronenzählrohr. In: Zeitschrift für Physik, 68, 659-674.
- Neumann, Susanne & Hopf, Martin, 2011. Schülervorstellungen zum Thema "Strahlung" - Ergebnisse einer Interviewstudie. In: S. Bernholt (ed.): Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht. Münster: LIT.
- Panusch, Martin, 2012. Millikan's Vessels. In: Bulletin of the Scientific Instrument *Society* 113, 32-37.
- Piel, Alexander, 2008. Hans Geiger Atomphysiker und Entdecker. In: Forschungen und Berichte aus der Christian-Albrechts-Universität Kiel, 79ff.
- Polanyi, Michael, 1958. Personal Knowledge, Chicago, The University of Chicago Press.
- Polanyi, Michael, 1985. *Implizites Wissen*, Frankfurt am Main, Suhrkamp.
- Pukies, Jens, 1979. Das Verstehen der Naturwissenschaften, Braunschweig, Westermann.
- Rapp, Thomas, 2008. Experimente mit selbst gebauten geigerzählern, Funken- & Nebelkammern. Grundlagen und Praxis der radioaktiven Messtechnik., Poing, Franzis Verlag GmbH.
- Rauner, Max, 2005. Einsteins Kühlschrank. In: Die Zeit, 1/05, 42-46.
- Rheinberger, Hans-Jörg, 1992. Experiment, Differenz, Schrift: Zur Geschichte epistemischer Dinge, Marburg, Basilisken-Presse.
- Rheinberger, Hans-Jörg 1999. Putting Isotopes to work: Liquid Scintillation Counters 1950-1970. Berlin: Max Planck Institut Wissenschaftsgeschichte.
- Rheingans, Friedrich G., 1988. Hans Geiger und die elektrischen Zählmethoden 1908-1928, Berlin, D.A.V.I.D. Verlagsgesellschaft mbH.
- Richter, Heinz, 1957. Atomstrahlen Geigerzähler, Stuttgart, Franckh.
- Riesch, Werner & Westphal, Walter, 1975. Modellhafte Schülervorstellungen zur Ausbreitung radioaktiver Strahlung. In: Der Physikunterricht, 9, 75-85.
- Rieß, Falk, 2000a. Formen experimenteller Praxis: Rückblick und Ausblick. In: P. Heering, Rieß, F. & Sichau, C. (eds.): Im Labor der Physikgeschichte. Oldenburg: BIS Verlag.
- Rieß, Falk, 2000b. Vorwort. In: P. Heering, Rieß, F. & Sichau, C. (eds.): Im Labor der Physikgeschichte. Oldenburg: BIS Verlag.
- Rieß, Falk & Schulz, R., 1994. Naturwissenschaftlernen als Textverstehen und Geräteverstehen. Naturwissenschaftsdidaktik in hermeneutischer Absicht und die Rekonstruktion historischer Experimentierpraxis. In: W. Misgeld, Ohly, K. P., Rühaak, H. & Wiemann, H. (eds.): Historisch-genetisches Lernen in den Naturwissenschaften. Weinheim: Deutscher Studienverlag.
- Risch, Matthias, 2005. Neue Messungen zur Radioaktivität im Tabakrauch. In: MNU, 58, 21-24.

- Röntgen, Wilhelm Conrad, 1895. Über eine neue Art von Strahlen (Erste Mittheilung). In: Sitzungsberichte der Physikalisch-Medizinischen Gesellschaft in Würzburg, 137, 132-141.
- Rutherford, Ernest, 1911. The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. In: *Philosophical Magazine Series 6*, 21, 669-688.
- Rutherford, Ernest & Andrade, C., 1914a. The spectrum of the penetrating γ rays from radium B and radium C. In: Philosophical Magazine Series 6, 28, 263-
- Rutherford, Ernest & Andrade, C., 1914b. The wave-length of the soft γ rays from radium B. In: *Philosophical Magazine Series* 6, 27, 854-868.
- Rutherford, Ernest & Geiger, Hans, 1908a. The Charge and Nature of the alpha Particle. In: *Proceedings of the Royal Society of London*, 81, 162-173.
- Rutherford, Ernest & Geiger, Hans, 1908b. An Electrical Method of Counting the Number of alpha-Particles from Radio-active Substances. In: *Proceedings of* the Royal Society of London, 81, 141-161.
- Schmidt-Schönbeck, Charlotte, 1965. 300 Jahre Physik und Astronomie an der Kieler Universität, Kiel, Verlag Ferdinand Hirt.
- Schmüser. Peter, 1995. Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker, Berlin, Heidelberg, Springer.
- Schnell, Rainer; Hill, Paul B. & Esser, Elke, 2008. Methoden der empirischen Sozialforschung, München, Wien, Oldenbourg Verlag.
- Settle, Tom, 1961. An Experiment in the History of Science. In: Science, 133, 19-23.
- Shapin, Steven, 1989. The Invisible Technician. In: American Scientist, 77, 554-563.
- Shapin, Steven & Schaffer, Simon, [1985] 2011. Leviathan and the Air-Pump. Hobbes, Boyle. and the Experimental Life, Princeton and Oxford, Princeton University Press.
- Shinn, Terry, 1988. Instrument hierarchies: laboratories, industry, and divisons of labour. In: J.-P. Gaudillière (ed.): The Invisible Industrialist. Manufacture and the Production of Scientific Knowledge. Houndsmill: MacMillan.
- Sibum, Heinz Otto, 1995. Reworking the Mechanical Value of Heat: Instruments of Precision and Gestures of Accuracy in Early Victorian England. In: Studies in history and philosophy of science, 26, 73-106.
- Sichau, Christian, 2000. Die Replikationsmethode: Zur Rekonstruktion historicher Experimente. In: P. Heering, Rieß, F. & Sichau, C. (eds.): Im Labor der Physikgeschichte. Oldenburg: BIS Verlag.
- Sichau, Christian, 2002. Die Viskositätsexperimente von J.C. Maxwell und O.E. Meyer. Eine wissenschaftshistorische Studie über die Entstehung, Messung und Verwendung einer physikalischen Größe, Berlin, Logos Verlag.
- Simonyi, Karoly, 2004. Kulturgeschichte der Physik, Frankfurt am Main, Harri Deutsch.
- Soddy, Frederic, 1913. The Radio Elements and the Periodic Law. In: Chem. News, 107, 97-99.
- Steinle, Friedrich, 1996. Exploratives vs. theoriebestimmtes Experimentieren im frühen Elektromagnetismus bei Ampère und Faraday, Berlin, Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte Preprints.
- Steinle, Friedrich, 2005. Explorative Experimente. Ampere, Faraday und die *Ursprünge der Elektrodynamik*, Stuttgart, Steiner.
- Stinner, Arthur, 2010. Teaching Modern Physics, using Selected Nobel Lectures. In: P. Kokkotas, Malamitsa, K. & Rizaki, A. (eds.): Adapting Historical Knowledge *Production to the Classroom.* Rotterdam, u.a.: Sense Publishers
- Stuhlinger, Ernst, 1984. Hans Geiger zum Gedächtnis, 1884-1984. In: Bausteine zur *Tübinger Universitätsgeschichte*, 1, 149-169.

- Swinne, Edgar, 1988. Hans Geiger Spuren aus einem Leben, Berlin, D.A.V.I.D. Verlagsgesellschaft.
- Teichmann, Jürgen, 2013. Historical Experiments and Science Education From Conceptual Planning of Exhibitions to Continuing Education for teachers. *In:* P. Heering, Klassen, S. & Metz, D. (eds.): Enabling Scientific Understanding through Historical Instruments and Experiments in Formal and Non-Formal Learning Environments. Flensburg: Flensburg University Press.
- Todd, Neil, 2012. A Physics Heritage Tour of Manchester University. In: Institute of Physics Newsletter - Special Issue "Nucleus to Neutrons", 77-92.
- Townsend, John Sealy, 1915. *Electricity in Gases*, Oxford, The Clarendon Press.
- Trenn, Thaddeus J., 1974. The Geiger-Marsden Scattering Results and Rutherford's Atom. In: *Isis*, 65, 74-82.
- Trenn, Thaddeus J., 1976a. Die Erfindung des Geiger-Müller-Zählrohres. In: Abhandlungen und Berichte des Deutschen Museums, 44. Jahrgang, 54-64.
- Trenn, Thaddeus J., 1976b. Rutherford on the alpha-beta-gamma classification of radioactive Rays. In: Isis, 67, 61-75.
- Trenn, Thaddeus J., 1986. The Geiger-Müller Counter of 1928. In: Annals of Science, 43, 111-135.
- Voerste, T. & Demuth, R., 2008. Der Weg zum Rutherford Atommodell. In: Praxis der *Naturwissenschaften Chemie*, 57, 16-20.
- Wagenschein, Martin, 1968. Verstehen lernen. Genetisch-sokratisch-exemplarisch., Weinheim, Beltz.
- Weart, Spencer, 1988. Nuclear fear: a history of images, Cambridge, Havard University Press.
- Weart, Spencer, 2012. The rise of nuclear fear, Cambridge, Havard University Press.
- Weber, Heiko, 2010. Die Elektrisiermaschine von Georg Christoph Schmidt (1773). In: O. Breidbach, Heering, P., Müller, M. & Weber, H. (eds.): Experimentelle Wissenschaftsgeschichte. München: Wilhelm Fink.
- Westrich, Claus-Peter, 1982. Festgabe der Stadt Neustadt an der Weinstraße zum 100. Geburtstag des Atomphysikers Hans Geiger - abgedrucktes Manuskript des von Geiger geplanten Buches: Experimentierkunst und Entdeckerfreuden.
- Wodzinski, Rita, 2013. Lernen mit gestuften Hilfen. In: *Physik Journal*, 12, 45-49.
- Wodzinski, Rita & Stäudel, Lutz, 2009. Aufgaben mit gestuften Hilfen für den Physikunterricht, Seelze, Friedrich
- Zgorzelski, Michael, 2011. Schülervorstellungen zum Thema Radioaktivität Eine qualitative Empirische Untersuchung von Schülervorstellungen Radioaktivität. Bachelorarbeit, Universität Flensburg.
- Zgorzelski, Michael, 2013. Vorstellungen über Radioaktivität unter Studierenden der Universität Flensburg. Masterarbeit, Universität Flensburg.

A. Transkripte der geführten Interviews

A.	Transkripte der gefunrten Interviews	1
1.	Frau Bassi aus Gruppe A	2
1.	1. Prä-Interview	2
1.	2. FollowUp-Interview	10
1.	3. Ergänzung zum FollowUp-Interview	11
2.	Herr Ohm aus Gruppe B	14
2.	1. Prä-Interview	14
2.	2. FollowUp-Interview	
3.	Herr Newton aus Gruppe B	19
3.	1. Prä-Interview	19
_	2. FollowUp-Interview	
4.	Herr Franklin aus Gruppe A	22
4.	1. Prä-Interview	22
4.	2. FollowUp-Interview	28
5.	Herr Geitel aus Gruppe B	30
_	1. Prä-Interview	
	2. FollowUp-Interview	
6.	Frau Noether aus Gruppe B	
	1. Prä-Interview	
	2. FollowUp-Interview	
	Herr Dalton aus Gruppe A	
	1. Prä-Interview	
	2. FollowUp-Interview	
8.		
_	1. Prä-Interview	
	2. FollowUp-Interview	
9.	T P P	
	1. Prä-Interview	
	2. FollowUp-Interview	
	0. Herr Millikan aus Gruppe B	
	0.1. Prä-Interview	
1(0.2. FollowUp-Interview	
1.	1. Herr Elster aus Gruppe A	
	1.1. Prä-Interview	
	1.2. FollowUp-Interview	
	2. Herr Kepler aus Gruppe A	
	2.1. Prä-Interview	
	2.2. FollowUp-Interview	/9 01
14	4. Leitfaden für das FollowUp-Interview	ŏ۷

In den Marginalien sind die Abschnitte von mir inhaltlich codiert.

1. Frau Bassi aus Gruppe A

1.1. Prä-Interview

0. Wurdest du schon mal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Gar nicht.

Wie stellst du dir die Rolle vor, die du jetzt einnehmen sollst?

10

Also jetzt nichts schlimmes, aber ich bin gespannt auf jeden Fall, aber ich habe jetzt nicht den Eindruck, dass ich jetzt irgendwie furchtbare Auswirkungen auf die Ergebnisse haben könnte. Weiter darüber nachgedacht habe ich nicht. Ich habe nur gedacht: 'man braucht ja irgendwelche Menschen, also bin ich das dann gerne.' (lacht)

Also einfach aus der Lehrerrolle heraus antworten.

Also Neugierde, denk ich.

20

Es sind meistens nur Einschätzungsfragen, die dann aus dem Beruf des Lehrers heraus beantwortet werden sollen.

Ok.

Ok, dann geht's los.

1. Hast du generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischen Unterrichtsverfahren oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

30

Da ich ja in Oldenburg studiert habe: auf jeden Fall. Ja, ausprobiert hab ich ja nun auch schon ein bisschen mehr.

Studium in OL

Was denn ausprobiert?

Wir haben in Oldenburg damals so Freihandversuche gemacht. Also so was dann eher. Das ist ja nicht unbedingt historisch, aber das dann schon eher. Historisch an sich hab ich dann eher darauf geachtet, bestimmten Schülern bestimmte Referate zuzutrauen, die dann ein bisschen mehr über die Geschichte erzählen können. Also solche Sachen. Um auch – wie soll ich sagen – mehr Interesse daran wecken zu können, wenn dann da auch noch ein besonderer Mensch dabei war.

Ja, in Form von Referaten mit historischen Themen

40

Woher kam der Input dafür hauptsächlich – also für dich jetzt?

Ich glaube schon durch die Praktika, die wir gemacht haben, also das Demopraktikum zum Beispiel. Solche Sachen. Es ist dann ja natürlich schade, dass man dann so was an der Schule nicht hat – alleine bei den netten Reibungselektrizitäts-Versuchen. Natürlich haben wir so ein Katzenfell und solche Sachen – das nutz ich natürlich auch – und Elektroskop. Das ist ja schon ein bisschen dieser historische Ansatz. Man hätte aber natürlich schon gerne so

Input aus dem Studium.

50

schönes Spielzeug, wie in Oldenburg – hat man dann nicht. Aber der Ansatz ist dann ja trotzdem da.

... und aus dem Referendariat oder anderen Fortbildungen? Gab es da Input aus dieser Richtung?

60

Aus der historischen Richtung nicht. Ich bin ja auch in dieser Multiplikatorengruppe¹, aber da haben wir uns dann sehr auf das Kerncurriculum gestürzt und eben da versucht etwas zu erneuern. Gut, da bin ich auch erst das zweite Mal gewesen, aber da ist der historische Ansatz jetzt nicht so dabei. Also schon eher noch aus dem Studium.

Kein Input aus anderen Fortbildungen.

Würdest du denn im Unterricht gern mehr in dieser Richtung machen mit Schülern?

70

Ja, ich glaube weil das auch mehr ankommt. Viele [Schüler] sagen auch, wenn die in der Zehnten [Klasse] sind – heute zum Beispiel: "ja, wenn ich dann wirklich eine Facharbeit schreiben soll in Physik … das kann ich mir nicht vorstellen. In Chemie kann ich mir das eher vorstellen." Und ich denke die [Schüler] können sich das eher vorstellen, wenn sie den historischen Ansatz haben… also denk ich… dass es einfacher wäre für die.

Der Wunsch nach mehr historischen Inhalten besteht.

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel, indem dargestellt wurde, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten – also anhand welcher Materialien. Wie bereitest du dich auf Unterricht vor oder wo holst du deine Ideen und Anregungen her?

80

Ja natürlich: klassisch Schulbuch oder danach, was man in der Schulsammlung hat. Im Referendariat hatten wir sogar so einen netten Katalog zu Hause wo man genau abhaken konnte: wo ist was in der Sammlung abgepackt. Das war Luxus. Wir haben jetzt nur auf den Schränken drauf stehen: Da ist es drin. Also muss man die Sammlung zu Hause ablaufen. Also Schulbuch, Sammlung, Internet natürlich auch, alte Unterlagen von mir.

Schulbuch, Versuche in der Sammlung, Internet und alte Unterlagen.

90

Inwiefern Internet?

... dass ich mal eben irgendwie google, ob ich ein Arbeitsblatt finden kann zum Beispiel. Also das selten, weil man dann ja auch irgendwann immer recycled, was man selber gemacht hat. Aber am Anfang schon auch das. Und Zufallsideen auch. Beim Einkaufen: Ah, das kann man gut benutzen. Solche Sachen dann natürlich auch.

... und [fachdidaktische] Zeitschriften?

100

Die "Physik im Unterricht" bekomme ich immer. Die lese ich natürlich auch immer, sonst würde ich das Geld dafür nicht bezahlen und vom Aulis Verlag ein paar Sachen dann schon, klar.

fachdidaktische Zeitschriften

¹ Eine Gruppe von Lehrern, die sich um ein Curriculum-nahes Fortbildungsprogramm in ihrer Region bemühen.

3. Welche Rolle spielen historische Anteile bei der Vorbereitung oder bei der Auswahl von Materialien?

Nicht so eine große muss ich zugeben. Also nur die Sachen, die ich eben weiß... was man gut machen könnte, aber dann zusätzlich noch... ne (lacht) eher weniger. Schon eher [durch die Materialien?] vorgegebenes.

Spielt keine große Rolle.

... weil das Material nicht da ist?

... weil das Versuchsmaterial schon nicht da ist. Also wenn ich jetzt Referate verteile, dann achte ich schon da drauf. Aber wenn ich jetzt ein Demoexperiment machen möchte geht das natürlich nur mit den Sachen, die ich dann habe. Dann ist der historische Gang von mir aus bei Reibungselektrizität sofort da. Überhaupt wenn ich mit Elektrizität anfange. Das ist so ein Standartanfang bei mir. Dann achte ich da natürlich auch darauf, aber wenn ich jetzt mit einem anderen Thema anfange ist das dann schwierig. Also meinetwegen Wärmekapazität: Da komm ich immer mit einem Wasserkocher. Das ist nun wirklich nicht historisch, aber es ist das einfachste denk ich (lacht).

Wie sieht das im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik aus mit Geschichte?

Da ist es so tatsächlich, dass ich - seit ich hier an dieser Schule nach dem Referendariat angefangen habe – grundsätzlich über Schülervorträge mache. Das mach ich in Physik immer in der 9. [Klasse] bei Radioaktivität... dass ich das für die [Schüler] aufteile und die [Schüler] ne bestimmte Anzahl von Unterrichtsstunden haben, wo sie sich da dann in ihrer Kleingruppe drauf vorbereitenmeist sind sie zu zweit – und dann gezielt Fragen stellen können. Und dann ist es natürlich so, dass da erst mal mein Anteil rausfällt und ich dann immer erst mal informierend bin und die [Schüler] eben auch bisschen Freiraum haben, um die Geschichte mit reinzubringen.

Schülerreferate zu hist. Themen

Was sind das so für Geschichten?

Wenn sie [die Schüler] wollen, dann kommt zum Beispiel was über Marie Curie... also wie das mit Radium anfing.... solche Sachen. Aber wie gesagt, sie sind da sehr frei. Es kommt immer darauf an, wer denn da gerade ist. Ganz häufig sind es dann schon Marie Curie gewesen oder Becquerel vielleicht. Also Geiger-Müller Zählrohr ist auch immer ein Thema gewesen. Es ist aber glaube ich keine Gruppe bisher über das Historische gegangen, sondern: "hier da, guckt mal den Aufbau an ... und: so und so funktioniert das." Also es kommt immer auf die Person drauf an, der man das dann in die Hand drückt. Mein Material für die Schüler ist dann natürlich erst mal nur das Buch... Eingrenzen welchen Bereich sie dann abarbeiten sollen und dann gucken sie dann selbstständig im Internet oder in der Bibliothek noch nach, was sie dazu holen können.

Marie Curie, Henri Becquerel Schulbuch als primäre Quelle, sekundär Bibliothek oder Internet durch die Schüler selbst.

Du hast schon das Geiger-Müller Zählrohr angesprochen.

110

120

140

130

150

4. Wie bindest du das allgemein im Unterricht ein, wenn nicht über so ein Schülerreferat?

Dann Nullrate bestimmen. Also das auf jeden Fall. Präparate habe ich in der Sek[undarstufe] 1 nie benutzt, weil ich selber keinen Strahlenschutzbeauftragten-Schein hatte - Hab ich jetzt, aber jetzt hab ich keine 9. [Klasse]. Also mal gucken, wie sich das jetzt darauf auswirkt, ob ich immer noch sage: "ich lass das lieber im Schrank" oder ich hol's dann eben her. In der Oberstufe eigentlich auch nur für solche Sachen oder eben mal, um die Abstandsregel zu messen. Ja, als klassisches Messgerät dann in dem Fall.

Nullrate, Abstandsregel

170

... auch hinsichtlich der Funktionsweise?

Bei der Funktionsweise habe ich meistens eher die Ionisationskammer gehabt. Dass sie [die Schüler] da dann irgendeine Abklingkurve dann haben und da dann auch über die Funktionsweise nachdenken. Beim Zählrohr... natürlich wird das angesprochen wie es funktioniert... Sie müssen es auch beschreiben und erklären können, aber ich glaube im Fokus ist es dann mehr in der 9. [Klasse] die Funktionsweise. Und da leg ich dann nicht den Schwerpunkt drauf in der 12. [Klasse].

Funktionsweise des GMZs in Klasse 9, in der Oberstufe eher weniger.

180

Nochmal eine Rückfrage zu den Präparaten. Würdest du sie jetzt mit dem Strahlenschutz-Schein benutzten und wenn ja, warum und wenn nein, warum nicht?

Also da ich jetzt dieses Jahr keine Neunte hab hat sich die Frage für mich noch nicht gestellt, aber ich glaube, dass ich es tatsächlich machen würde, aber eben natürlich nur als Demoexperiment, damit sie eben auch sehen: das ist nicht nur theoretisch so, man hört wirklich ein lauteres Geräusch. Aber ich weiß tatsächlich nicht, ob ich nicht – wie soll ich sagen - Alltagsgegenstände nehmen würde, die dann eben auch schon strahlen... meinetwegen Glühstrumpf oder so. Ob es dann unbedingt das [Präparat] sein muss, weiß ich tatsächlich nicht, wegen der Lebenswelt... wenn man dann da mit so einem Strahler ankommt.... das ist eben bei mir so verankert, dass ich immer versuche Sachen zu bringen, die sie eben auch kennen. Ich schließ das nicht aus, wir haben es ja schließlich angeschafft. Ich denke, dass sie [die Schüler] jetzt auch viel begriffen haben [ohne den Einsatz der Präparate].

Präparate zu Demo-Zwecken vorstellbar, aber bisher nicht eingesetzt.

200

190

Was ist die im Kontext Geiger-Müller Zählrohr besonders wichtig?

Das es ja eigentlich ein ganz einfaches Gerät ist... selber Bauen ist jetzt übertrieben, aber was [ein Gerät] man sich gut vorstellen kann. Es ist eben schon sehr komplex. Deswegen kann man es auch in der 9. Klasse schon gut behandeln von der Funktion her. Das find ich schön daran. Das ist mir glaub ich auch wichtig das immer wieder zu betonen. Also keine Black Box. Das ist eben wichtig.

Das GMZ ist ein einfaches Gerät und von der Funktionsweise her gut vorzustellen. Keine Black Box.

210

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht oder ein alternativer Inhalt für den Physikunterricht. Was verbindest du mit diesem Begriff?

Das find ich schwer... Also wenn ich jetzt an die 5. Klasse, wenn ich jetzt das erste Mal Physik unterrichte, wenn ich mich von da aus da ran taste... dann überlegt man erst mal: was ist überhaupt Naturwissenschaft. So soll das ja vielleicht in die Richtung jetzt gehen ... das man erst mal das beschreibt, was man sieht, dann hinterfragt wieso ist das denn eigentlich so... ja die Neugierde des Menschen... und dass das ist, was Physiker antreibt. Das versuche ich den Kleinen erst mal so zu vermitteln damit sie das Interesse auch nicht verlieren und meiner Meinung nach ist das ja auch so. Warum experimentiert man? Ja aus diesem Grund... weil man neugierig ist und wissen möchte was dahinter steckt. Ich glaub das

"Was ist NaWi?" Neugierde treibt Physiker an

220

... und wie sieht das bei höheren Klassenstufen aus?

ist gefährliches Halbwissen gerade (lacht).

230

Ich glaub das nehmen die schon dann so mit... also wenn ich mir meine 11 angucke, dann haben sie am Anfang immer Angst vor dem Formalismus... vor irgendwelchen Herleitungen. Das bauen die jetzt aber so langsam ab... also gut, die sind ja jetzt auch schon fast fertig mit der 11.... kommen in die 12. Sie müssen es abbauen, aber es ist dann ja nicht mehr so schrecklich. Es gibt im Grundkurs viele, die dann sagen: oh, sobald man rechnen muss, geht gar nichts mehr. Die versuchen dann nur die beschreibenden Sachen, die ja auch große Anteile haben. Aber man muss ja auch irgendwie so ein bisschen mit Formeln umgehen können und ich glaube, dass es sich bei mir dahin entwickelt, dass, je älter sie werden, ich da auch immer mehr den Augenmerk drauf lege. Damit sie das dann trainieren fürs Abi.

Mathematischer Formalismus in der Oberstufe

240

Ist dieser mathematische Anteil an Physik Bestandteil von Nature of Science? Also wenn man das platt übersetzt wäre das ja sowas wie "Wesensart" der Naturwissenschaften.

250

Für mich persönlich schon, aber für meinen Unterricht nicht. Für die Kleinen versuche ich es [das Mathematische] so lange wie möglich raus zu halten. Und Auch bei meinen Achtklässlern, die ja leider im Moment auch meine eigenen sind, weiß ich auch was die mathematisch können, hab ich früher immer gedacht: die müssen auch ne Formel umstellen können. Jetzt denk ich mir: gut, so lange da nur drei Variablen sind, komm ich da eben mit so einem albernen Dreieck. Das können sie dann besser und ich muss ihnen in Physik nicht vorwerfen, was ich in Mathe schon vorwerfe. Hab ich vor drei Jahren nicht gedacht, dass ich mich dahin entwickel' und sage: ich versuch das Mathematische so klein wie möglich zu halten. Aber in der Oberstufe ist es für mich auch unmöglich. Mag auch an meinem Wesen liegen. Wenn man sich die Abi-Klausuren anguckt ist es aber ja auch so. Ein gewisses Handwerkszeug müssen sie mitbringen und leider stolpern die auch schon an der Taschenrechnerbedienung. Also wie gebe ich jetzt 'irgendwas hoch 7' ein und komm dann nicht auf die Idee alles im Exponenten zu haben... und auch in den Klausuren. Deswegen muss das ja auch trainiert werden.

260

Wenn du solche Aspekte, wie "Neugierde wecken" in der Unterstufe machst oder die [mathematische] Modellierung in der Oberstufe.. kommt das eher stundenweise im Block oder ist das immer mal wieder implizit eingestreut?

Das ist eigentlich immer wieder eingestreut. Gerade in dem erhöhten Niveau Kurs ist es so, dass wir auch viel an Beispielaufgaben üben, aber diese Neugierde wecken kann man bei denen ja auch nicht abstellen. Das kommt ja auch von denen aus: Wieso sind das denn jetzt gerade die Farben des Regenbogens in dem Spektrum. Versteh ich nicht. Wieso ist das so? Wieso passiert das nochmal mit dem Regenbogen. Natürlich gehen wir dann weg vom Thema, aber andererseits ist es ja auch wichtig und deswegen sind sie [die Schüler] da... und das kommt eigentlich immer... jetzt nicht jede Stunde unbedingt... dass wir so ein bisschen abschweifen... was ist eigentlich sonst interessant... aber jede Woche bestimmt.

Implizite, spontane Verwendung.

280

Wieso nicht genau anders herum, also eher blockweise?

290

Weil ich mit den Block-Sachen... würde natürlich gehen, aber ich denke ich versuche die Stunden immer relativ ähnlich aufzubauen damit sie so einen Wiedererkennungseffekt haben – gerade wenn sie nur wenig Unterricht haben. Also bei den Oberstufenschülern ist es schon so, dass ich im Block dann auch mal was ganz anderes mache - da können sie sich dann besser drauf konzentrieren – bei den kleineren ist es schon bisschen schwieriger. Natürlich hab ich da im Block auch irgendwie – wenn es jetzt um Elektrizität ging – erst mal nur experimentiert und Arbeitsblatt und 'Abarbeiten' und 'Mach das!' – also so ne Art Mini-Praktikum auch schon gemacht und auch gut und dann müssen sie auch keine Aufgaben lösen, weil das is dann ja schon die Aufgabe, aber ich denke so ein bisschen ähnliche Strukturen... das brauchen die einfach, wenn die so nen 8-Stunden Tag haben.

Blockweiser Unterricht
würde ein
wiedererkennbares
Muster einer
Unterrichtsstunde
aufbrechen, daher eher
implizit.

300

Aber mit – auf den ersten Blick – Physikunterricht-fremden Themen, wie eher einer philosophischen Auseinandersetzung mit Physik, so block oder stundenweise… ist das schon vorgekommen?

Ne, philosophisch nicht. Fällt mir jetzt nicht ein. Also sag ich einfach mal: Nein, ist nicht vorkommen.

Keine philosophische Auseinandersetzung mit Wissenschaft.

310 6. Wie würdest du dein persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben? Fortbildungsverhalten in Anführungsstrichen.

Im Allgemeinen oder auf Physik bezogen?

Ruhig allgemein und dann im Speziellen.

320

Ok, ja. Ich denke schon, dass ich immer versuche, das was ich in der Fortbildung aufgenommen habe, gleich umsetze, aber bei mir ist mir persönlich aufgefallen, dass ich das in Physik viel schneller umsetze als in Mathe. In Mathe ist es dann oft so, dass ich dann einen [USB-] Stick wiederfinden und denke: Da waren ja auch tolle Materialien drauf. Das liegt einfach daran, dass ich in Physik mehr eingesetzt bin und dann vergisst man das in Mathe auch einfach

Direkte Umsetzung des in einer Fortbildung vermittelten Inhalts – in Physik eher als in Mathe. schneller. Und da denk ich dann: ist ja klar, das hast du so gemacht. Sich auf etwas Neues einzulassen finde ich in Physik einfacher als in Mathe.

Gehst du oft zu Fortbildungen?

330

Also in Physik machen wir die ja selber sozusagen. Da haben wir ja diese Wochen-Blockveranstaltung irgendwo, wo wir uns von Niedersachsen aus treffen. Das mach ich dann auf jeden Fall fest. Und dann leiten wir das dann auch an. Das funktioniert dieses Jahr scheinbar nicht. Ich habe immer noch keinen Termin, wann wir das machen dürfen. Egal, nicht das Thema. Das auf jeden Fall und vorher, bevor ich nicht in dieser [Multiplikatoren-]Gruppe war bin ich auch immer zu den Physik Fortbildungen gegangen. Das mach ich regelmäßig. Und in Mathe ist es so, dass wir 15 oder 16 Kollegen sind. Da kommen die Fortbildungen immer zu uns. Da muss ich mich aktiv gar nicht darum kümmern. Das ist auch schön. In Physik krieg ich das sofort mit, wenn was da ist und in Mathe dadurch eben auch. Bestimmt 4 [Fortbildungen] im Schuljahr, oder so.

In Physik werden
Fortbildungen selbst
organisiert. In Mathe
werden Referenten an die
Schule eingeladen.
Teilnahme an etwa vier
Fortbildungen pro
Schuljahr.

340

Gibt es genug Angebot oder zu viel Angebot oder zu wenig...?

Ich find das glaub ich schon genau richtig. Also noch mehr würde in diesem Schuljahr gar nicht mehr gehen, weil das so kurz ist. Wahrscheinlich kriegen wie deswegen auch keine Termine an denen wir selber fortbilden dürfen. Aber ich denke schon, dass es richtig ist. Es gab in Physik nie... also in Mathe gab es Fortbildungen, wo man sich gefragt hat: Musste dafür jetzt Unterricht ausfallen? Aber das war auch erst einmal der Fall. Von daher ist es auch nicht so schlimm denk ich.

Angebot an Fortbildungen quantitativ genau richtig. Qualitativ besonders in Mathe manchmal dürftig.

350

... und von den Themen her, die Angeboten werden?

360

... ist das gut. Das ist ja immer so jahrgangsspezifisch. Bei uns zumindest ging es erst um die Oberstufe, weil das Kerncurriculum da jetzt neu war und jetzt um Sek.I. Das ist wirklich ganz gut. Man hat in Mathe zum Beispiel auch Mitspracherecht. Da kann man denen dann sagen: wir würden gerne darüber was hören. Und dann funktioniert das auch ganz gut.

Jahrgangsspezifische Themen.

Also bist du in so einer Lage, dass du eigentlich alles was angeboten wird, mitnehmen kannst und dich nicht irgendwie für eins entscheiden musst.

Ne, also den Eindruck hab ich schon, dass das geht. Es ist auch nicht so, dass die Schulleitung dann sagt. Jetzt warst du schon zu oft auf Fortbildungen. Das ist eigentlich nicht der Fall.

370

Wie ist das in Bezug auf wissenschaftshistorische oder geschichtliche Themen? Gibt es da Angebote?

Nö, also dieses hier jetzt. Deswegen habe ich ja auch gleich "Ja" gerufen. Aber ne, eigentlich nicht. Wir hatten nur so eine merkwürdige Fortbildung fächerunabhängig. Das war furchtbar. Da hat sich unsere Schule dann auch komplett wieder rausgezogen. Wir hatten uns da komplett für angemeldet und sind dann

Es werden keine wissenschaftshistorische n Fortbildungen angeboten, Es besteht aber Interesse.

380

irgendwie so einen Umweg gegangen um da wieder rauszukommen. Das war einfach furchtbar. Gymnasiallehramt mit Realschullehramt unter einem Dach fortgebildet. Das war alles so Kleinkind-Lernen irgendwie, was man dann als Lehrer selber machen musste. Ganz schrecklich. [...] Die Menschen, die uns fortgebildet haben, standen da auch nicht wirklich hinter und wir mussten das machen, was die Schüler machen sollten, zum Beispiel so eine Namenskette um sich zu sortieren. Es wurde einfach nur lächerlich. In Physik oder in Mathe ist so etwas aber noch nicht vorgekommen.

390 OK, dann haben wir es geschafft.

1.2. FollowUp-Interview

1. Hattest du im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Ja, jetzt gerade eine 9. Klasse. Da bin ich gerade bei.

9. Klasse (1a)

Wie ist der grobe Ablauf der Unterrichtseinheit?

10

Das habe ich so wie bei meinen letzten Malen beibehalten, also hauptsächlich über Eigenarbeit und Referate der Schüler. Das was thematisch zu schwer war oder an Themen übrig geblieben ist, habe ich übernommen. Es hat aber niemand das Geiger-Müller Zählrohr gewählt. Da habe ich mir dann überlegt, dass ich das dann geschichtlich machen möchte und dafür dann deine Materialien nutze. Das werde ich aber erst nach der Klassenarbeit machen, um sie dann aus dem Motivationsloch zu holen. Ich glaube, dass ich das mit meiner eigenen 9. Klasse, gut machen kann. Die haben da bestimmt Spaß dran.

Quellenmaterial soll eingesetzt werden (1c)

20

Also ist der Einsatz der Fortbildungsinhalte noch in der Planungsphase?

Genau. Ich denke, aber dass das bald passieren wird, da bald auch die Klassenarbeit ansteht.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

30

(Überlegt) Das ist schwierig da so spontan drauf zu antworten. Ich denke, dass ich jetzt mehr darauf Wert lege, dass den Schülern klar wird, was es bedeutet Physik zu betreiben, z.B. der Zweck von Versuchsprotokollen oder der Wechsel von Alltags- in Fachsprache und das dann auch im Anschluss reflektieren. Die Schüler sollen aktiv mitbekommen, wie es ist Physik zu betreiben.

Versuchsprotokolle Fachsprache

Hast du das auch im bisherigen Unterricht mit der 9. Klasse thematisiert?

40

Da die Schüler ja selbstständig an ihren Referaten arbeiten, eher nicht. Aber eine Gruppe hat ihr Referat über Marie Curie gemacht und dann auch etwas über ihr Leben erzählt. So wie das damals war. Aber sonst eigentlich eher nicht. Das kommt alles noch.

Lebensumstände von Marie Curie

Hattest du denn in anderen unterrichtlichen Kontexten die Möglichkeit so etwas zu thematisieren?

Ja, in der Mechanik in der 8. Klasse. Da habe ich besonders darauf geachtet, dass die Schüler mit der Fachsprache arbeiten. Klarer und ich glaube auch besser, als sonst.

Ja, Mechanik, Nutzung von Fachsprache.

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

Einmal die Geschichte über Geiger und Müller, die du vorgetragen hast und dann noch auf jeden Fall die persönlichen Briefe von Müller... Also diese menschliche Seite... die habe ich total noch im Kopf. Ich denke, dass es Schülern ähnlich gehen wird und dass sie sich dann auch die anderen Dinge über das Zählrohr besser merken können dadurch. Dann fand ich auch noch interessant, wie man das Zählrohr baut. Aber da würde ich mich nicht ran trauen.

Geschichte über GMZ Persönliche Briefe von Müller Der Nachbauprozess

60

Hast du dich seit der GMZ Fortbildung erneut versucht, dich zu einer wissenschaftshistorischen oder NOS-Fortbildung anzumelden?

Nein, habe ich nicht. Ich habe an den Fortbildungen teilgenommen, die hier von meiner Schule aus organisiert werden. Ich selber habe extern nicht weiter geschaut, wo ich mich fortbilden könnte. Nein

Wenn du das jetzt vor hättest, läge da der Fokus mehr auf Wissenschaftsgeschichte oder auf Nature of Science als Thema?

70

Ich denke mehr auf Wissenschaftsgeschichte, aber das liegt ja denk ich auch an meinem Oldenburger Studium. Deswegen find ich das interessant. Ich denke aber auch, dass den Schülern so etwas gut gefällt und die da mehr mitnehmen können, wenn man einen Sachverhalt in die Geschichte einbetten kann.

Eher Wissenschaftsgeschichte

1.3. Ergänzung zum FollowUp-Interview

Offenes Interview, individuelle Ergänzung zum FollowUp im Januar 2014 nach Anwendung der Inhalte im Unterricht.

Dann erzähl mal, wie das im Unterricht gewesen ist.

90

Ja, ich hab das mit den Briefen in meiner 9. Klasse gemacht. Das hat eigentlich ganz gut geklappt. Schüler, die sonst bei physikalischen Sachen nicht so mit machen, haben da jetzt ganz gerne mal den Brief geschrieben oder den Kneipenmonolog geschrieben, also darüber, wie schrecklich das ist mit dem Geiger zusammen zuarbeiten und dass er den ganzen Ruhm für sich haben möchte. Die haben sich da richtig gut reingefühlt. Insgesamt waren es ja 30 Schüler und es war kurz vor den Zeugnissen. Einige haben sich dann natürlich auch rausgezogen und nur drei Sätze geschrieben. Aber viele haben sich da echt Mühe gegeben. Das hat mir ganz gut gefallen.

100

Ich hab dass so gemacht, dass ich erst einmal den Briefwechsel aus Hamburg und Stockholm [bzgl. Nobelpreis zw. Vincke und Jorpes] vorgelesen habe, damit die Schüler merken, dass das etwas wichtiges ist und auch hier in der Nähe passiert ist. Dann habe ich die Briefe von Müller an seine Eltern reingegeben, damit die einen Eindruck von seiner Gefühlslage bekommen und schauen können, was in einem realen Brief verwertet wurde. Den anderen Brief an den Wildhagen habe ich erst einmal zurückgehalten.

Ich habe das auch in der Oberstufe dann gemacht. Bei denen ging das natürlich besser, weil die ein bisschen mehr lebensweltlichen Hintergrund haben und das zeitlich auch besser einordnen konnten. Aber auch bei den Neuntklässlern würde ich das nochmal machen.

In der Oberstufe habe ich das eigentlich nur gemacht, um mal zu gucken, wie das bei "vernünftigeren und erwachseneren" Menschen funktioniert (lacht). Da war es dann auch so, dass sowohl Grund- als auch Leistungskurs sich richtig Mühe gegeben haben. Einer hat sich da so richtig reingefühlt und rumgequängelt, so "Ich werde mir was anderes suchen... Was soll ich eigentlich an der Uni". Auch Müllers Aussage, dass man 10 Jahre an der Uni gewesen sein und gearbeitet haben muss, bis man überhaupt als Physiker wahrgenommen wird, ist in seinem Monolog wieder aufgetaucht. Das fand ich ganz toll.

Wie genau war die Aufgabenstellung, die du den Schülern gegeben hast? Du hast denen die Briefe aus Hamburg und Stockholm, den Lebenslauf und die Briefe an die Eltern vorgelesen... wie ging es dann weiter?

120

110

Ich hatte denen dann noch vorher gesagt, dass sie aufpassen sollen, da sie im Anschluss kreativ arbeiten müssen, also entweder auch einen Brief schreiben oder etwas ähnliches. Sie wussten also, dass sie aufpassen müssen. Bei den Neuntklässlern haben 20 von 30 aufgepasst, würde ich sagen. 10 waren wohl sehr überfordert, weil die im Anschluss immer wieder Nachfragen zum Inhalt hatten. Die haben nicht zu gehört. Aber den anderen war wohl klar, dass sie zuhören müssen. Die konnten sich dann aussuchen, ob die einen Brief an die Eltern oder einen Freund schreiben oder so eine Art Monolog in einer Kneipe schreiben. Der Monolog ist bei den meisten viel besser gelungen oder die haben sich eher getraut das vorzulesen. Das kann auch sein, aber insgesamt war das netter als so ein Brief. Da haben sich die Schüler viel mehr reingesteigert in diese Trotzhaltung. Die Aufgabenstellung war also erst einmal aufpassen und dann sich in die Lage von Müller zu versetzen.

Hat das eine Schulstunde gedauert oder länger?

140

130

Ne, also bei der Oberstufe war es nur eine Stunde, aber in der 9. Klasse sind das Doppelstunden. Das hat auch so lange gedauert. Ich habe ja erst vorgelesen und für das Schreiben hatten die Schüler dann 20 Minuten Zeit und dann haben die auch schon vorgelesen. Danach habe ich dann zum Abschluss den Brief an den Wildhagen nochmal vorgelesen. Bei der 9. Klasse habe ich das auch eingesammelt, weil nicht alle vorlesen konnten und weil ich ja auch das Gefühl hatte, dass ein paar Schüler nicht mitgemacht haben. Insgesamt haben nur drei dann aber wirklich nur einen Satz aufs Papier gebracht.

150 Hast du die Briefe zufällig noch?

Also ich habe noch zwei aus der Oberstufe und von den Neuntklässlern leider keine mehr. Aber ich kann die nochmal danach fragen. Du willst die bestimmt haben, oder?

Ja, eine kleine Auswahl davon wäre schön, aber nicht nur die guten, sondern auch welche aus dem Mittelfeld.

Okay, die Oberstufenschüler frage ich dann mal, ob ich das 160 weitergeben darf und die Neuntklässler frage ich morgen. Das ist bestimmt kein Problem. Ich schick dir das dann zu. Dann hast du das bis zum Wochenende.

War das denn so vom Ablauf, wie du dir das vorgestellt hast?

Ich hatte da ja gar keine Vorstellungen. Die Idee kam ja von euch in der Fortbildung.

Ach ja, stimmt. Das haben wir ja in meiner Gruppe gemacht. Also ich fand das super. Die Oberstufe hat da denk ich mehr von profitiert als die Neuntklässler, aber das macht ja nichts.

Wieso glaubst du das?

170

Ich glaube, die Oberstufenschüler stecken da mehr drin oder haben mehr Interesse an so etwas. Vielleicht ist das auch nur mein Eindruck.

Dann kann ich ja gespannt sein.

2. Herr Ohm aus Gruppe B

2.1. Prä-Interview

0. Wurden sie schon mal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Nein.

Wie sie, welche Rolle sie jetzt einnehmen sollen?

10

Nicht wirklich.

Es soll die professionelle Lehrerrolle jetzt eingenommen werden und aus dieser Perspektive heraus geantwortet werden.

1. Haben sie generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischen Unterrichtsverfahren oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

Ein kleines bisschen. Ein Unterrichtsprojekt habe ich mal gemacht zum Nachempfinden des Galilei Experiments zur schiefen Ebene.

Eigener Unterricht.

Können sie da ein bisschen mehr drüber erzählen?

Das habe ich im beruflichen Gymnasium, Fachrichtung Technik durchgeführt und letztendlich mit der Zielsetzung den Versuch nachzuempfinden und dann Bewegungsgleichungen für den waagerechten Wurf herzuleiten.

Woher kam der Input dafür?

30

Für mich aus so einer Sammlung für historische Experimente. Aber ich weiß nicht mehr genau welche das war.

Ein Buch

Woraus ist das Interesse daran entstanden? Aus Eigenrecherche, Studium, Referendariat,...?

Nur aus eigenem Antrieb. Der Aufhänger für das Experiment war die originale Dokumentation. Da bin ich über eine Analogiebetrachtung von Versuchsbeschreibungen ran gegangen, also ob Galileis Aufzeichnungen einer Dokumentation im heutigen Sinne genügen würde.

Aus eigenem Interesse an der Thematik.

40

Gab es denn im Studium, Referendariat oder auf Fortbildungen mal Input aus dieser Richtung.

Nein.

Wieso gab es nicht mehr historische Episoden im Physikunterricht?

Weil ich grundsätzlich aus der technischen Richtung komme und die Affinität zur Technik groß ist. Unter dem Gesichtspunkt der beruflichen Bildung fehlt da einfach der größere Anknüpfungspunkt zur Beruflichkeit.

Technik und Beruf sind von primärem Interesse

Was haben sie denn studiert? Klassisch Ingenieur?

Ich bin echter Gewerbelehrer mit Physik und Metalltechnik, Schwerpunkt Fahrzeugtechnik.

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel, indem dargestellt wurde, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten. Woher bekommen sie ihre Ideen und Anregungen?

Ich lese sehr aufmerksam Praxis der Naturwissenschaften und Unterricht Physik. Das ist das eine. Das andere hängt damit zusammen, dass ich Studienleiter bin. Da bekomme ich über die Referendare einen riesigen Input in Sachen Unterrichtsgestaltung.

2 Zeitschriften, Input über Referendare

Wie sieht das mit Schulbüchern aus? Nutzen Sie die?

70

Gar nicht (lacht). Weder ich, noch meine Schüler. Ich brauche für die Durchführung des Unterrichts kein Schulbuch. Das entwickelt sich alles aus dem Unterrichtsgeschehen heraus. Wenn der eine oder andere Schüler dann nochmal etwas lesen möchte, kann er das dann im Schulbuch tun. Aber als Arbeitsmaterial ist das nicht geeignet.

Schulbuch gar nicht.

3. Ich gehe mal davon aus, dass dann historische Aspekte bis auf das eine Mal keine Rolle bei der Unterrichtsvorbereitung gespielt haben?

80

Nur eine Kleine. Ich glaube schon, dass man viele Sachen über den historischen Zugang machen kann. Analogiebetrachtungen, Messlogik nachvollziehen, mit einfachen Mitteln Messungen durchzuführen,... das finde ich spannend.

Nur eine kleine.

Wie sieht das im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik aus mit Geschichte mit historischen Anteilen speziell oder der Unterrichtsvorbereitung im Allgemeinen?

90

Radioaktivität habe ich im Unterricht noch nicht thematisiert. Atomphysik nimmt auch eher eine untergeordnete Rolle ein auf Grund der speziellen Themenschwerpunkte an der Berufsschule. R und AP wird nicht gemacht.

4. Also haben sie das Geiger-Müller Zählrohr auch noch nicht im Unterricht eingesetzt?

Doch, aber dann nur rein als Messinstrument im Bereich der Röntgenanalyse.

Reines BlackBox Messinstrument in der Röntgenstrukturanalyse.

100 Was ist ihnen bei dem Instrument wichtig?

Das es funktioniert (lacht). Aber bei der Röntgenstrukturanalyse ist die Funktionsweise nicht wichtig. Da wird das als Black Box behandelt.

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht oder ein

alternativer Inhalt für den Physikunterricht. Was verbindest du mit diesem Begriff?

110

Letztendlich verstehe ich darunter die Einbettung einer Fachdisziplin oder eines Faches in die Gesamtheit aller Fächer. Ich komme aus dem Technik Bereich. Die Kontextorientierung und die Einbettung, also dass Phänomene gleich in technische Zusammenhänge eigeordnet werden.

Interdisziplinarität.

Spielt dieser Aspekt in deinem Unterricht explizit eine Rolle?

120

Ja, und dann eigentlich als übergeordnetes Unterrichtskonzept. So weit es geht. Das geht nicht immer, aber der Grundansatz dies zu tun ist immer da.

Explizite, übergeordnete Verwendung.

6. Wie würdest du dein persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Kontinuierlich und permanent. Ich gebe ja auch Fortbildungen selber und werde dadurch ja quasi ebenfalls fortgebildet. Also etwa vier Veranstaltungen pro Halbjahr als Minimum. Viele Fortbildungen.

130

Gibt es aus ihrer Sicht genug Angebot oder zu viel Angebot oder zu wenig... also aus ihrer Perspektive als Lehrer und nicht als Studienleiter?

Im berufsbildenden Bereich wird gerade eine regionalisierte Fortbildungskultur initiiert. Themenstellungen werden aus den Gruppen selbst generiert. Ich glaube, dass das ein guter Weg ist. Dann ist das bedarfsgerecht und direkt in den Regionen angeboten. Man bekommt dann auch eine Vernetzung der Lehrer. Mehr als zwei Fortbildungen pro Halbjahr sind aber utopisch und auch irgendwann aus Sicht der Schulleitung nicht mehr vertretbar. Die andere Kollegen an der Schule müssen dann ja auch vertreten. Ich glaube aber, dass das ein ganz gutes Angebot ist.

Regionalisierte und interessensgesteuerte Fortbildungen.

140

Wie ist das in Bezug auf wissenschaftshistorische oder geschichtliche Themen? Gibt es da Angebote?

Heute das erste Mal. Aber ich wünsche mir mehr so etwas in der Art.

Es wurden bisher keine wissenschaftshistorische n Fortbildungen angeboten. Es besteht aber Interesse.

2.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Nein. Nein.

Woran lag das?

10 Ich unterrichte im Moment kein Physik, weil ich der Studienleiter in z.Zt. nicht Physik bin. Ich habe aber eine Fortbildung zu dem Thema gemacht. Physiklehrer tätig.

Was war das für eine Fortbildung?

Es ging um den Leybold Experimentierkasten. Der ist in vielen Schulen vorhanden. Da hab ich Einsatzmöglichkeiten auch für die Sekundarstufe gezeigt.

Hatten sie trotzdem Gelegenheit unsere Fortbildungsinhalte in einem 20 anderen Kontext einzubinden?

> Jein. Ich habe natürlich die Informationen in meine Referendarsgruppe weitergetragen - eben auch die Frage nach historischen Ansätzen und wie man so etwas thematisieren kann.

Vermittlung Referendare.

als

an

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

Das ist für mich die Sicht auf das "Gesamte". Man muss es schaffen, im Physikunterricht mehr interdisziplinär zu arbeiten.

"Blick auf das Gesamtsystem Physik"

Können sie das ein wenig mehr spezifizieren, was sie mit der "Sicht auf das Ganze" meinen?

Ja die Physik nicht als Einzeldisziplin zu sehen, sondern tatsächlich den direkten Kontakt z.B. mit den beruflichen Fachrichtungen und mit der Mathematik miteinzubeziehen. Die teilweise schon existenten fächerübergreifenden Ansätze sollte man deutlich weiter fokussieren.

interdisziplinäre Arbeit

40

30

Haben sie solche Aspekte im letzten halben Jahr in anderen unterrichtlichen Kontexten eingesetzt oder haben sie generell nur Physik als Fach?

Ich unterrichte zur Zeit gar nicht in der Schule. Aber generell hat man ja an der Berufsschule eher den Fokus auf die Beruflichkeit und weniger auf allgemeinbildende Aspekte von Schule. Darunter würde ich jetzt auch Nature of Science einordnen. Mein direkte unterrichtliche Erfahrung damit ist aber in letzter Zeit auch gering.

Fokus an der BBS liegt nicht auf solchen allgemeinbildenden Aspekten, sondern auf "Beruflichkeit".

50

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

Das handwerkliche Geschick. Sowohl beim Original als auch bei ihren Nachbauten. Das hat mich total fasziniert. Auch gerade im zeitlichen Kontext. Also mit welchem handwerklichen Geschick zu einer bestimmten Zeit schon gearbeitet wurde.

Haben sie diese Fortbildung zur Radioaktivität, von der sie am Anfang gesprochen haben, thematisch gezielt ausgewählt?

Ich versuche gerade wieder eine Fortbildungskultur im Land herzustellen. Das Thema kam auf Wunsch von Schulen zu Stande, aber ich habe es auch ein bisschen forciert.

Würden sie sich denn als dieser Initiator der Fortbildungskultur mehr wissenschaftshistorische oder mehr Nature-of-Science Fortbildungen wünschen?

Beides gleichwertig. Es gibt eigentlich wenig, was nicht spannend ist.

Man muss sich aber ja irgendwie entscheiden auf Grund von Lehrplänen oder Zeit.

Zeit ist ja immer so ein Totschlagargument. Das wird viel zu inflationär benutzt.

3. Herr Newton aus Gruppe B

3.1. Prä-Interview

0. Wurden sie schon mal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Nein.

Ist denn klar, welche Rolle sie jetzt einnehmen sollen?

10

Ich bin derjenige, der auf ihre Frage antwortet.

Ja genau, aber aus der Perspektive des Lehrers.

1. Haben sie generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischen Unterrichtsverfahren oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen im Physikunterricht?

Nur über die universitären Anteile hier im Studium. Über Herrn Heering. Das waren Vorlesungen, die die genetische Entwicklung von physikalischen Experimenten mit aufgegriffen haben. Studium in FL.

20

Haben sie so etwas auch im Unterricht mal ausprobiert?

Habe ich bis jetzt leider noch keine Gelegenheit zu gehabt.

War das Studium der einzige Input in dieser Richtung oder gab es auch mal Fortbildungen oder im Referendariat etwas?

Überhaupt nichts in der Richtung.

30

Auch nichts aus Zeitschriften oder Büchern.

Nein.

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel, indem dargestellt wurde, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten. Woher bekommen sie ihre Ideen und Anregungen?

Das ist eine Mischung aus den Mitschriften der Universität, die ich hier gemacht habe. Die sind sehr umfangreich. Der Rest ist Bücher. Der Tipler und Schulbücher.

Mitschriften Tipler Schulbücher keine Zeitschriften Uni

Wie sieht das in der Schule mit Zeitschriften aus?

Schlecht. Ich glaube, wir beziehen gar keine Physik-Fachzeitschriften. Privat habe ich ein paar Ausgaben von Zeitschriften, aber das Abo habe ich nicht mehr seit ich aus der Universität raus bin.

3. Spielen den historische Anteile eine Rolle für die Vorbereitung außer jetzt ihre Mitschriften?

Nein

Nein. Ich bin zwar erst ein halbes Jahr dabei, aber bisher noch gar nicht. Ich versuche das immer ein bisschen einfließen zu lassen, aber das würde ich jetzt noch nicht als historischen Anteil bezeichnen. Sondern einfach nur: Wo kommt's her und wo hat es sich entwickelt.

4. Gab es denn schon einmal Gelegenheit Radioaktivität und 60 Atomphysik zu unterrichten.

Leider nicht.

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht. Was verbinden sie mit diesem Begriff?

Ich hab das schon einmal gehört, aber ich weiß nicht mehr was hinter dem Begriff steht. Da müsste ich jetzt raten.

Gar nichts.

70

6. Wie würdest du dein persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Momentan noch stark eingeschränkt. Bisher mache ich noch die Pflicht- und Wahlmodule beim Studienleiter im Referendariat. Diese Fortbildung hier ist jetzt zusätzlich dazu. Wenig, bis gar nicht.

Und im Bereich der privaten Fortbildung?

80

Das ist eine Auseinandersetzung mit Experimenten meistens. Das, was man hier an der Universität nicht unbedingt gemacht hat, was man aber dann mit Schülern oder allgemein im Unterricht machen möchte. Das muss man sich dann privat aneignen.

keine wissenschaftshist. Fortbildungen.

Gibt es auch Fortbildungsangebote zu wissenschaftshistorischen Themen?

Ich wüsste nicht. Nur das jetzt hier. Ich glaube auch nicht, dass die primäre Intention für Donnerstag historisch war und erst im Nachhinein Begeisterung für diesen Zugang beim Studienleiter aufkam.

3.2. FollowUp-Interview

Noch nicht geführt, 13.1.14

4. Herr Franklin aus Gruppe A

4.1. Prä-Interview

0. Wurdest du im Rahmen so einer fachdidaktischer Studie interviewt.

Ia.

Wie war das?

10

Ähnlich wie jetzt. Daniel kam hier her und hat mich interviewt. Ne war gar nicht Daniel, quatsch. Ich komm nicht drauf... Ist egal.

Welches Projekt war das? War das auch ein Promotionsprojekt oder ein größeres?

Das war ein größeres. Das war im Rahmen von HIPST. Ist ne Weile her

Also ist die Rolle, die du jetzt einnehmen sollst, klar?

Ja, ich habe mich aber nicht vorbereitet.

Das ist auch so gewollt. Also einfach nur du selbst sein als Lehrer.

1. Die erste Frage wirst du aber demnach bestimmt mit ja beantworten. Hast du generelle Vorerfahrungen mit historischgenetischem Unterricht oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen im Physikunterricht?

30 (lacht) Ja dein Tipp war richtig.

Welche denn?

Das zur schiefen Ebene, Klasse 7. Dann die Elektrostatik Sachen, Klasse 5/6. Kalorimetrie ist ja nicht drin. Dieses Thema meiner Staatsexamensarbeit ist ja so ein bisschen ausgefallen. Ja, das ist so das wesentliche.

Vorerfahrungen im Bereich Elektrostatik und Mechanik.

Woher kam dieser Input oder das Interesse an diesen Themen?

40

In Osnabrück schon durch den historisch genetischen Ansatz, den die da relativ viel gemacht haben, also Wagenschein. Und dann nach dem Wechsel nach Oldenburg die Arbeitsgruppe [Physikdidaktik].

Input durch Studium in OL und OS.

Kam das denn im Referendariat oder Fortbildungen nochmal?

Die Fortbildungen waren eher fachspezifisch. Historisch wurde relativ wenig gemacht.

wenig Input durch Ref. Oder Fortbildungen.

2. In einer der letzten MNU Ausgaben war ein Beitrag in dem erhoben wurde, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten. Wie bereitest du dich auf Unterricht vor? Oder wie erhältst du Anregungen, Material, Ideen....

Material und Ideen ganz viel aus dem Internet. Ganz verschiedene Quellen. Also man muss suchen. Was ich mir hauptsächlich an Anregungen hole sind manchmal Unterrichtsabläufe. Das ist aber eher selten. Also jetzt nicht einzelne Stunden sondern eher generell was im Großen und Ganzen gemacht wurde. Oder bei einigen Versuchen, dass ich mal Messwerte oder einen Aufbau google.... so die typischen Schulseiten, die man da findet.

Internet, da hauptsächlich Anregungen, Messaufbauten und – werte.

60

Wie sieht das aus mit Zeitschriften und Schulbüchern?

Bücher auch. Meistens Schulbücher. Ich habe aber auch manchmal zu Experimentalaufbauten in so einem Überschlagswerk nachgeguckt. Das haben wir in der Schule stehen. Einmal in blau für Sek I und einmal in rot für Sek II. Schulbuch, Nachschlagewerk für Experimentalaufbauten für die Schule.

Wie sieht es mit Zeitschriften aus?

Zeitschriften seltener

Seltener.

3. Welche Rolle spielen historische Anteil bei der Unterrichtsvorbereitung?

Weniger. Das Problem ist, dass so ein kompaktes Übersichtswissen fehlt in dem Bereich. Da muss man wirklich stark zusammen suchen alles.

historische Anteile spielen eher keine Rolle, weil man da so stark zusammen suchen muss.

80

Inwiefern Übersichtswissen?

Was ich mir wünschen würde gibt es nicht aufm Markt. Das wäre die Schulphysik in diese Richtung mal aufgearbeitet. Das man gezielt Hintergrundwissen findet, z.B. zur schiefen Ebene. Ein paar Messwerte, hier und da mal ein Scan. Also das man historisches Material relativ leicht kriegt. Was ich immer gern mache sind die perpetuum mobiles. Die passen immer ganz gut rein bei Energieerhaltung in Klasse 7/8. Da hat man halt viel mit Abbildungen zu arbeiten. Es gibt kein Buch, wo man durchblättert und man alles einmal gebündelt findet.

Es fehlt ein schulpraktischer Sammelband zu historischen Inhalten.

90

Wo bekommst du dann in Ermangelung dieser Quelle Material dafür?

Bei HIPST habe ich einiges bekommen. Die Sachen, die wir mit Peter gemacht haben. Da ist einiges bei was man gebrauchen kann. Auch diesen Coulomb Versuch. Da kann man immer die Messwerte zur Auswertung reingeben, auch wenn man den Aufbau nicht hat. Es sind dann aber auch eher Fragmente ohne eine runden Rahmen. Da fehlt dann einfach viel.

HIPST ist eine Quelle für Material gewesen.

100

Wie sieht das speziell im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik aus?

Ja, mau. Da hab ich wenig. Also man kann so ein bisschen historische Filme zusammensuchen, in denen halt nachgespielt wurde, wie die da halt damals auch experimentiert haben und welche Auswirkungen die Unfälle hatten. Das kann man dann zeigen. Die Rolle von Wechselstrom und Gleichstrom, also Edison

Filme als historisches Material zu Radioaktivität.

und Tesla. Da bin ich bisher noch nicht so drauf eingegangen. Das müsste ich beim nächsten Mal machen. Das will ich mal beim nächsten Leistungskurs Durchgang in der Oberstufe historisch machen. Das Material habe ich zu spät gefunden. Ich habe dazu einen Film gefunden. Das bietet sich an, dass man solche Sachen dann einfach mal als Film zeigt. Das sagt manchmal viel mehr aus über die Problematik als man selber experimentell machen kann. Gerade im Bereich Wechselstrom und Gleichstrom. Da kommen Beispiele, die man nicht bringen kann. Außerdem habe ich auch selten mal die Gelegenheit einen vernünftigen Film zu zeigen, der mit Inhalt gefüllt ist.

120

4. Das Geiger-Müller Zählrohr. Kommt das in deinem Unterricht vor und wenn ja, wie bindest du es in den Unterricht ein?

In Klasse 9 und in der Oberstufe ist das Thema. Man misst halt radioaktive Strahlung und macht die entsprechenden Vorversuche, also dass radioaktive Strahlung ionisiert und dann kann man das Messprinzip relativ schnell erklären. In der 9 geh ich dann nicht auf Feinheiten ein, wie die Auswirkungen der Veränderung der Spannung oder Totzeit. Das fällt natürlich völlig unter den Tisch. haben auch ein paar kaputte [Zählrohre] Anschauungsmaterial. Schülerversuche können wir in Brake nicht machen, weil wir dazu zu wenig Messgeräte haben. Ich messe dann so Sachen wie Kalium. Keine wilden Sachen. Uranpräparate nehme ich meistens gar nicht mehr. Pechblende wäre ja schon viel zu radioaktiv. Nur Präparate die knapp über der Nullgrenze liegen.

GMZ in Klasse 9, mit Messprinzip.

SchüEx wegen zu weniger Messgeräte nicht möglich.

keine starken Präparate.

Nutzt du die schwachen Strahler nur aus pragmatischen Gesichtsgründen im Unterricht oder aus Sicherheits- oder Rechtsgründen.

140

130

Ne, ich habe einen Strahlenschutzschein. Aber ich finde es viel spannender zu zeigen, dass in natürlich vorkommenden Substanzen Radioaktivität drin ist. Wenn ich da jetzt Radium oder Americium auspacke.... Zeig ich auch, dass das irre knattert. Da kann man aber nur sagen: Das ist jetzt gefährlich und dass es gut ist, das es jetzt nicht in der natürlichen Umgebung vorkommt. Ich finde es aber mit den anderen Sachen spannender.

Messung von natürlich vorkommenden radioaktiven Substanzen interessanter.

Was ist dir im Bezug auf das Zählrohr wichtig in der Vermittlung?

150

Grundlegend ist, dass die ionisierende Wirkung der Strahlung zur Messung genutzt wird. Das ist für mich der wichtigste Punkt.

Wie vermittelst du das?

160

Habe ich ja gerade schon versucht anzudeuten. Ich mache zwei grundlegende Versuche. Einmal Entladung eines Elektroskops. Einfach ein geladenes Elektroskop mit einem etwas stärkeren Strahler entladen... und über eine Funkenstrecke. Also zwei Versuche, die eigentlich das gleiche als Inhalt bringen. Ionisierende Strahlung ionisiert die Luft, die dadurch leitend wird. Und dann kommt es ein drittes Mal beim Geiger-Müller Zählrohr. Das sollte wohl dann genügen, damit sie [die Schüler] das mit der ionisierenden Wirkung irgendwann behalten.

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark und viel diskutierter Unterrichtsinhalt. Was verbindest du mit dem Begriff?

Naturphilosophie. Ich verbinde damit, dass man ganz viele Gesetzmäßigkeiten an ganz vielen Stellen wiederfindet. Das ist jetzt eine ganz eigene Interpretation.

Naturphilosophie Regelhaftigkeit von Naturgesetzen.

Was die Physikdidaktik damit meint ist eher die "Wesensart der Naturwissenschaft".

Das liegt den Schülern oder dem Probanden nicht. Die Zeit dafür wird für SchüEx besser genutzt.

Im Rahmen von HIPST habe ich das mal versucht. Also das liegt den Schüler nicht oder mir nicht. Das ist sehr schwierig. Ich mache in der Zeit lieber Schülerversuche und dann haben sie ihre eigenen Erfahrungen. Dann wissen sie auch, wo da die Problematiken sind. In der Oberstufe kommen dann auch Messfehler dazu. Da ist natürlich klar: Für jede Theorie muss man ein Experiment haben, dass es belegt. Und wenn das Experiment etwas widerlegt, muss man überlegen warum. Ich mache Modellbildung. Das ist ganz spannend. In der Radioaktivität ist das auch ein Teilthema, was dann vorweg kommt. Da greif ich dann allerdings sehr stark auf das Chemie Wissen zurück. Wir machen zuerst Halbleiter und dann Radioaktivität. Das ist so eng verknüpft mit den Chemiesachen. Die haben immer Probleme mit Elektronenpaarbindung. Wenn man Radioaktivität an dieser Stelle macht, hatten die in der Chemie bei uns schon den Rutherford Versuch, sollten ein bisschen was wissen über Atome, also Kern und Hülle, die wissen Oktettregel, aber können die Elektronen nicht richtig in die Schalen einsortieren... aber braucht man ja auch nicht. Aber ich brauche ja nur die Ordnung der Elemente im Periodensystem.

Modellbildung

Also Modellbildung ist ein wichtiger Punkt und auch, wenn man was neues findet, dass man dann darüber nachdenkt, wo das Problem ist. Diese Evidenzbasierung wird nicht explizit thematisiert. Man muss einfach überlegen. Solche Aspekte findet man eigentlich in jeder Jahrgangsstufe wieder, obwohl... in 5/6 wird dann ja eher rein phänomenologisch gearbeitet.

Machst du diese speziellen Inhalte dann eher stundenweise oder immer mal wieder implizit?

Ne, das kommt immer wieder. Experimente, Rechnen... Das wechselt sich so ab. In der Oberstufe halt mehr Rechnen. Das ist klar. Man muss auch einfach mal Aufgaben lösen, um das dann auch zu können. Das muss man auch üben. In der Oberstufe im Leistungskurs mache ich erst viel Experimente und hinterher erst die Auswertung zusammen für alle Experimente. Das hat sich bewährt. Nach Aufgaben wird dann aber auch schnell gefragt. Ich muss dann ja auch 'learning to the test' machen. Wenn ich einen Leistungskurs habe, ist es ja auch im Sinne der Schüler, dass sie am Ende diese Arbeit schreiben können. Dann muss man entsprechende Experimente gemacht haben.

Implizite Vermittlung, nicht Blockweise.

Gibt es neben diesem "learning to the test"-Unterrichtsziel noch andere persönliche Ziele, die du verfolgst?

A - 25

180

170

190

200

230

240

Ja, aber das Problem ist, von welcher Jahrgangsstufe man redet. 11/12 Leistungskurs als Beispiel. Da ist klar, dass die am Ende die Arbeit schreiben wollen. Aber da sind dann auch so ein paar Sachen, die mir fernab davon wichtig sind. Wenn ich Quantenphysik mache, sollten die den Dualismus vernünftig wiedergeben können. Das Problem dabei ist ja auch, dass man den hinnehmen muss. Das man das nicht richtig verstehen kann, sprengt dann auch die Köpfe der Schüler. Mir ist da wichtig, dass sie erkennen, dass da eine grundsätzliche Problematik besteht, dass beides möglich ist und zwei Theorien nebeneinander herlaufen. In der Mittelstufe ist das dann so, da kann man schon einige Sachen auch vertiefen, wo man das möchte. In diesem Schuljahr hatte man wenig Platz für so etwas - ist zwei Monate kürzer. Nächstes Jahr kann man das wieder ein bisschen mehr machen. Das Schuljahr ist zwei Monate länger. Ja das spielt ne Rolle. Wir haben in unserem Curriculum die Möglichkeit einige Dinge etwas kürzer und dafür andere Dinge etwas länger zu gestalten. Da gehe ich aber auch auf Wünsche der Schüler ein. Wenn ich merke, dass die da Interesse dran haben, dann vertiefe ich das da an der Stelle. Ich mache also nicht nur Sachen, die mir wichtig sind, gerade beim Thema Radioaktivität. Da kommen dann ganz viele Fragen. So Auswirkungen von Radioaktivität. Das wollten neulich die Schüler unbedingt wissen, obwohl ich etwas anderes geplant habe. Dann macht man halt stochastische Wirkung. Die Schüler haben dann auch ganz eifrig diskutiert. Das lief dann auf deterministische Wirkung von Radioaktivität raus, also wo die herkommt. Da ist dann aber das Problem, welche Versuche man machen kann. Da kann man nur schreckliche Videos zeigen, wo dann klar wird, was ein stochastischer oder deterministischer Strahlenschaden ist.

Wichtig fernab von Klausuren sind Dualismus in der Quantenphysik.

250 6. Wie würdest du dein persönliches 'Fortbildungsverhalten' beschreiben?

Ich bin regelmäßig bei Fortbildungen. Also regelmäßig heißt es jetzt alle halbe Jahre, sondern ein bis drei pro Jahr. Ganz unterschiedlicher Art auch.

Eine bis drei Fortbildungen pro Jahr.

Gibt es denn genug Angebot hier im Raum Oldenburg/Brake oder zu viel bzw. zu wenig Auswahl?

Ne die Auswahl ist gut. Das würde ich ungern aufzeichnen lassen ietzt.

Dann machen wir das nachher ohne Aufnahme. Spiegelt sich dieses reichhaltige Angebot auch im wissenschaftsgeschichtlichen Bereich wieder? Ein Bisschen. Ich fühl mich immer noch nach 5 Jahre Dienst jung im Geschäft. Was mir da einfach hilft ist, wenn ich zu Fortbildungen gehe, die themenspezifisch sind. Wo dann einfach auch ne große Auswahl an Versuchen und aktuellen Materialien gezeigt wird. Eine Schulsammlung ist ja eigentlich nie vollständig. Man hat ja nie das, was man gerne haben möchte. Dann haben sich ja auch ein paar Inhalte verschoben, z.B. experimentelles Abitur. Da braucht man dann auch entsprechende Kästen und muss aber auch eine Idee haben, was man damit alles machen kann. Einfach um die Schüler auch vorzubereiten. Wenn ich nicht weiß, was man damit alles machen kann, dann kann ich den Unterricht nicht vernünftig gestalten. Da hilft es einfach, wenn man so eine Fortbildung mal gesehen hat. Also das hat mir viel geholfen.

280 Historisch wird manchmal ein bisschen was angesprochen. Also wo

Themenspezifische
Fortbildungen wären
wichtiger als
wissenschaftsgeschichtlic
he "Momentaufnahmen"

Historisch wird manchmal ein bisschen was angesprochen. Also wo sich historische Zugänge besonders eignen. Das wird aber sehr am Rande behandelt. Da werden mal so ein paar Tipps gegeben, wo man was finden kann, aber das wird sehr oberflächlich behandelt. Die meisten Sachen waren eher inhaltlich.

historische Zugänge eher randständig.

Besteht denn von deiner Seite aus Interesse an einem reichhaltiger geprägtem historischen Angebot?

Ja, das hab ich ja schon gesagt. Das "Wunsch-Buch". Das man sich also mal ein Lehrbuch her nimmt und guckt, welche historischen Themen passen da rein.

Interesse an hist. Fortbildungen besteht jedoch.

4.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Nein.

Planst du denn, die Inhalte der Fortbildung einzusetzen?

10

Ja, teilweise. Ich fand die Geschichte und die technischen Aspekte relativ gut. Genauer habe ich mir da noch keine Gedanken gemacht, weil ich zur Zeit nur meinem Leistungskurs habe, wo ich das einsetzen könnte. Im Moment hat man so viele Änderungen der Lehrpläne, dass es sich nicht lohnt etwas längerfristig zu planen. Das ist meistens vertane Lebensmüh. Ich mache mir erst Gedanken, wenn ich es auch tatsächlich unterrichten muss.

Teilweise, Funktionsweise und technische Aspekte.

Also kommt das Thema Radioaktivität in der Mittelstufe bei euch gar nicht vor?

20

Doch, in Klasse 9, aber zur Zeit habe ich keine. Frühestens in einem Jahr.

Würdest du denn etwas aus der Fortbildung da einsetzen wollen?

Ja, wenn es sich anbietet.

Ja, wenn es sich anbietet.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science ?

30

(Überlegt) Wie Forscher forschen. So würde ich das für mich übersetzen. Das ist aber schwierig aus dem Stehgreif zu beantworten.

"wie Forscher forschen"
Abarbeiten von Fragen,
Generierung von Fragen
durch den
Forschungsprozess selbst.

Was würdest du denn jemandem antworten, der dir genau die Frage 'Wie forscht ein Forscher?' stellt?

Schwierig. Das man sich von Fragestellung zu Fragestellung durch hangelt und das man halt viele Fragen erst durch das Forschen selbst aufgreift und findet.

40

Hast du so etwas in der Vergangenheit denn schon einmal bei Radioaktivität und Atomphysik unterrichtet oder thematisiert?

Also bei Radioaktivität noch nicht, nein. Aber zum Teil in der E-Lehre und der Mechanik.

R nein, aber E-Lehre und Mechanik auf Grund von Schüler-Nachfragen.

Warum gerade da?

50

Im Grunde habe ich mich da an das Curriculum gehalten, aber es kamen halt Nachfragen von Schülern in dieser Richtung. Deswegen habe ich so etwas mit reingenommen. Ich habe auch teilweise dann Sachen gemacht, die nicht im Curriculum standen. Da hat man ja in Physik mehr Zeit für als in Mathe zum Beispiel.

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

60

Das sind die doch recht einfachen und anschaulichen Zählrohre, also die Nachbauten. Die habe ich noch in Erinnerung. Aber das ist ja auch schon ein bisschen her und leider auch nicht angewendetes Wissen. Da vergisst man ja recht schnell.

Zählrohr Nachbauten

Hast du nach der Fortbildung versucht dich erneut bei einer wissenschaftshistorischen oder Nature-of-Science Fortbildung anzumelden?

70

Nein, aber ich war seit dem auf einer anderen Fortbildung. Da ging es um den Bau von 3D-Druckern. Das interessierte mich dann so, dass ich da nicht drum herum kam. Nein.

Wenn du die Wahl zwischen Wissenschaftsgeschichte und Nature of Science als Thema für eine Fortbildung hättest, für was würdest du dich entscheiden?

Das hängt ja manchmal sehr eng zusammen. Ich würde beides gleich präferieren.

Beides gleich.

5. Herr Geitel aus Gruppe B

5.1. Prä-Interview

0. Wurden sie schon mal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Nein, nicht interviewt. Ich habe aber nach dem Studium öfter mal an diesen Hochschulumfragen teilgenommen – auch schon während des Studiums. Ich weiß aber gar nicht mehr, was für Umfragen das jetzt genau waren. Das waren aber eher so Evaluationsfragebögen.

Was haben sie studiert?

Ich habe mal Maschinenbau mit Fachrichtung Verfahrenstechnik studiert. Dann habe ich gearbeitet und danach nochmal Lehramt an beruflichen Schulen studiert mit Fachrichtung Metalltechnik und Physik hier in Flensburg.

Maschinenbau, dann Physik/Metalltechnik BBS in Flensburg.

Ist Ihnen die Rolle klar, die sie jetzt einnehmen sollen?

20

30

40

10

Ja, als Lehrkraft.

1. Haben sie generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischen Unterrichtsverfahren oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

Ich habe hier mal als studentische Hilfskraft während meines Studiums beim Projekt Versuch macht klug gearbeitet. Das ist aber ja nicht historisch. Ich habe mal versucht einen historischgenetischen Ansatz in der Schule zu unterrichten. Das ging aber in die Hose. Das Problem ist einfach, dass die Rahmenbedingungen von Schule das schwer zulassen. Man muss eigentlich versuchen Epochenunterricht oder so etwas zu machen, aber mit einmal in der Woche 90min Unterricht klappt so etwas nicht.

Eigener Unterricht, bisher ein Versuch.

Was haben sie da ausprobiert?

Ich habe mit perpetuum mobile angefangen. Da habe ich mehrere historische Zeichnungen verteilt mit Originalquellen. Die Schüler sollten ergründen, wie die Funktionsweise ist und sollten dann rausbekommen, warum das ganze nicht funktioniert. Ich habe das ganze dann abgebrochen und habe einen anderen Weg eingeschlagen.

Woher kam der Input dafür?

Der kam von der Uni aus dem Studium mit Herrn Fiesser. Das ganze Wagenschein-Prinzip hat mich immer fasziniert. Deswegen wollte ich das mal ausprobieren. Ich werde solche Ansätze jetzt aber auch nicht komplett fallen lassen, sondern wenn sich die Gelegenheit ergibt das auch mal umzusetzen.

Studium mit Lutz Fiesser

Gab es sonst noch andere Anregungen aus dem Studium, dem Referendariat, oder anderen Fortbildungen?

Speziell jetzt historisch? Nein. Ich finde es aber persönlich interessant aus der Geschichte zu lernen. Ich bin so ein bisschen astronomisch gebildet. Daher interessieren mich Galilei und Kepler zum Beispiel.

Nur eigenes Interesse.

60

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel, indem dargestellt wurde, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten. Woher bekommen sie ihre Ideen und Anregungen?

Ich versuche generelle den beruflichen Ansatz im Lernfeldunterricht und auch in der Physik zu verfolgen. Daher versuche ich immer berufliche Anwendungen in den Physikunterricht zu integrieren. In Kinematik habe ich mal Roboter-Bewegungen thematisiert. Das ist so mein Ansatz.

Beruflicher Ansatz

70

Also bereiten sie sich quasi anhand ihrer eigenen beruflichen Erfahrung vor?

Ne, das kommt alles eher aus dem Metallbereich. Beruflich komme ich eher aus dem Bereich der Biotechnik.

Aber woher kam dann z.B. die Idee das mit der Robotik zu thematisieren?

Im Studienseminar war es dann schon so, dass wir versucht haben uns gegenüber der allgemeinbildenden Schule abzugrenzen. Was mich da immer interessiert hat, waren so problemorientierte Sachen. Ich bin auch mal mit Schülern zu Bosch gefahren und habe mir das da mit denen angeguckt. Ich versuche da den Schülern berufliche Problemstellungen zu geben.

Grundsätzliche Einstellung kommt aus dem Studienseminar

Welche Rolle spielen Zeitschriften oder Schulbücher?

Wir haben natürlich ein paar Bücher. Da hole ich mir manchmal auch Anregungen oder gucke da mal rein. In Zeitschriften eher weniger. Ich kaufe mir manchmal Geo Wissenschaft oder so, aber fachdidaktische Zeitschriften eher weniger.

Zeitschriften eher weniger, Bücher ja.

90

3. Welche Rolle spielen dann historische Inhalte bei der Unterrichtsvorbereitung?

Ich habe ja diesen einen Unterrichtsversuch mit dem perpetuum mobile mal gemacht. Im astronomischen Bereich mache ich manchmal was, aber das lässt sich mit dem Lehrplan recht schwer vereinbaren. Bei Kreisbewegungen habe ich das jetzt mal gemacht. Da habe ich dann auch was zu Galileo und seinem Teleskop gemacht. Aber ich versuche eigentlich eher aktuelle Beispiele zu nehmen.

Nur eine kleine. Fokus liegt eher auf aktuellen Beispielen.

100

Wie sieht das im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik aus?

Ich bin ja gerade erst mit dem Referendariat fertig. Daher hatte ich auch erst eine 13. Klasse. Radioaktivität war jetzt im zweiten

Bisher keine Gelegenheit gehabt.

Halbjahr der 13. Klasse angedacht, aber wir sind nicht ganz dazu gekommen. Was ich mit den Schülern vor hatte war der Bau einer Ionisationskammer. Das hätte aber zu viel Zeit in Anspruch genommen und die Schüler hätten das Projekt nicht mehr fertig stellen können vor den Ferien. Daher habe ich das dann nicht mehr gemacht.

Also haben speziell historische Zugänge da keine Rolle gespielt?

Nein, obwohl laut Lehrplan auch Atommodelle dran gewesen wären. Da hätte man dann ja auch Rutherford und Dalton und so gemacht. Aber das haben wir nicht gemacht.

120

4. Bindest du das Geiger-Müller Zählrohr in deinen Unterricht ein?

Ich hatte zwei Schüler, die eine schlechte Klausur geschrieben haben. Die durften dann zum Geiger-Müller Zählrohr etwas machen. Einer hat dann ein Referat über das Zählrohr gehalten, aber das war jetzt keine besonders gute Ausarbeitung. Wenn er das nicht gemacht hätte, hätte ich das vielleicht selber übernommen.

Nur als Schülerreferat.

Ist dir das Instrument wichtig?

130

Ich habe es noch nicht selber eingesetzt, aber würde es gerne mal machen. Radioaktivität ist für die Schüler ja irgendwie nicht greifbar. Die wissen nur, dass das irgendwie gefährlich ist, aber man kann es nicht sehen, riechen oder schmecken. Der Geigerzähler ist dann so ein Gerät, wo man das mit sichtbar machen kann.

Wie würdest du so etwas im Unterricht vermitteln?

140

Ich würde zuerst die Schüler fragen, was ihre Erfahrungen sind. Meistens sammle ich vor jedem Thema erst einmal die Schülererfahrungen ein. Dabei reicht es mir dann schon, wenn die Schüler sich das untereinander erzählen. Dann haben die danach gar nicht mehr das Bedürfnis dem Lehrer das zu sagen. Ich würde aber bei Radioaktivität irgendetwas Praktisches machen. Glühstrumpf oder so etwas. Die alten Rauchmelder haben teilweise ja auch noch ein radioaktives Element eingebaut. Da kann man dann mal gucken, wo Radioaktivität überall vorkommt. Technische Anwendungen als beruflicher Bezug würden mich interessieren. Medizinische Anwendung. Vielleicht auch, wenn es ein Projekt wäre, das mit gesellschaftspolitischen Fragen kombinieren, wie Endlager oder so etwas. Aber ich würde die Schüler halt auch gerne so eine Ionisationskammer aus einer Erdnussdose bauen lassen wollen.

150

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht oder ein alternativer Inhalt für den Physikunterricht. Was verbindest du mit diesem Begriff?

Keine Ahnung. Die Natur der Wissenschaft. Sagt mir aber jetzt so nichts. Was soll das sein? So die Vorgehensweise der Wissenschaft? Hypothesenbildung, Überprüfung? Diese klassischen Wege? Ja das mache ich gleich immer am Anfang: Was ist Physik? Wie entwickelt sich Physik? Mir ist wichtig, dass die Schüler wissen, dass auch Physik nicht alles erklären kann. Das zeige ich dann immer an aktuellen Beispielen, wo sich verschiedene Wissenschaftler uneins über die Gründe sind. Viele Schüler glauben ja, dass die Welt schon zu Ende erklärt ist und die Physik am Ende ist. Es gibt nichts mehr zu entdecken. Den Unterricht baut man ja auch dementsprechend auf: Man zeigt ein Phänomen und lässt die Schüler Hypothesen aufstellen und anschließend verifiziert oder falsifiziert man dann die Hypothese mit einem Versuch. Ich weiß aber nicht, ob das jetzt die Natur der Wissenschaft ist.

Hypothesebildung und Überprüfung durch Verifik./Falsifik.

Physik nicht allwissend.

170

Also bindest du so etwas immer implizit in den Unterricht mit ein?

Ich versuche eigentlich immer viele Versuche zu machen. Dann ist sowas natürlich ein wichtiger Aspekt, dass die Schüler mit eigenen Vermutungen kommen. Das zieht sich eigentlich durch die drei Jahre durch.

Implizit.

180

6. Wie würdest du dein persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Also ich bin rastlos. Ich muss Thematiken bis ins Detail verstehen, sonst habe ich ein schlechtes Gefühl, wenn ich vor den Schülern stehe. Ich betreibe zur Zeit noch einen Riesen Aufwand für eine Unterrichtsstunde. Das kann aber so nicht mehr weitergehen, wenn ich voll unterrichte ab August.

privat

190

Und extern angebotene Fortbildungen?

Jetzt habe ich ja gerade mein Referendariat gemacht. Da braucht man nicht noch viele zusätzlich Sachen. Ich habe vor dem Referendariat einen Kurs in der Eiffel zu Radioastronomie in der Schule gemacht. Da hatte ich mich mal drum bemüht. Aber ich guck schon links und rechts nach Dingen, die mich interessieren und was für den Unterricht brauchbar ist.

200

Hast du den Eindruck, dass es genug Angebot gibt oder zu viel, zu wenig oder zu themen-unspezifisch?

Wegen dem Referendariat habe ich mich um die anderen Fortbildungen des IQSH eher wenig gekümmert. Es gibt aber so ein paar. Unser Physikstudienleiter ist da recht aktiv. Diese regionalisierten Fortbildungsgruppen hat er ja initiiert.

Keine Angabe.

Wie ist das in Bezug auf wissenschaftshistorische oder geschichtliche Themen? Gibt es da Angebote?

Nein, ein spezielles Angebot in der Richtung nicht. Ich habe ein paar Bücher darüber, aber spezielle Angebote in der Richtung eher nicht. Keine ext. Angebote

5.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Nein, leider nicht. Ich habe zur Zeit keine 13. Klasse.

Nein. Keine Klasse.

Hattest du trotzdem Gelegenheit Inhalte aus der Fortbildung in anderen Kontexten einzubinden.

10

Nein. Ich habe mit einem Kollegen in einer Pause nochmal kurz darüber geredet, aber inhaltlich konnte ich da nichts verwenden.

keine Verwendung.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

Das ist eine gute Frage (lacht). Da hast du mich kalt erwischt. Ich denke, dass das die Wege sind, wie sich Naturwissenschaften entwickeln. Typische Elemente, wie das Aufstellen einer These, Verifizierung, Falsifizierung. Das würde ich als Nature of Science empfinden.

Die Entwicklung von Naturwissenschaften. Hypothesenbildung Verifikation/Falsifikation

Hast du solche Themen schon einmal im Unterricht verwendet seit der Fortbildung?

Natürlich erkläre ich den Schülern, wie prinzipiell die Vorgehensweise funktioniert. Man stellt auf Grund eines Phänomens eine These auf und das man dann versucht mit Experimenten diese These zu verifizieren oder zu falsifizieren. Das stelle ich schon relativ früh in der 11. Klasse dar. Ich habe auch gerade wieder fünf 11. Klassen bekommen.

in Ansätzen....

30

20

Hast du irgendetwas aus der Fortbildung, was wir das zum Thema Nature of Science gesagt haben, genutzt?

Nein.

... aber nichts aus der Fortbildung.

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

40

Also die Spannung nachzuvollziehen, welche Schwierigkeiten es gegeben hat, so ein Zählrohr zu bauen. Ich muss da besonders an die Abdichtung der Zählrohre denken. Heute ist so etwas ja gar kein Problem mehr. Vor knapp 100 Jahren war das aber anders.

Handwerkliche Aspekte des Originalzählrohrs.

Hast du nach der Fortbildung versucht, die zu einer anderen wissenschaftshistorischen oder Nature of Science Fortbildung anzumelden?

50

Nein, habe ich nicht. Ich habe auch allgemein nicht danach oder nach anderen Fortbildungen gesucht.

Nein.

Wenn du danach suchen würdest, läge da der Fokus mehr auf Wissenschaftsgeschichte oder Nature of Science?

Ich fände Wissenschaftsgeschichte interessanter. Ich bin ja auch ein kleiner Hobbyastronom und da interessieren mich die ganzen Entwicklungen über Aristoteles, Galilei, Kepler, Kopernikus bis heute.

Wissenschaftsgeschichte wegen des eigenen Interesses.

6. Frau Noether aus Gruppe B

6.1. Prä-Interview

0. Wurden sie schon mal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Nein.

Was stellen sie sich darunter vor?

10

Ich habe da keine Vorstellungen.

Ist Ihnen denn die Rolle klar, die sie jetzt einnehmen sollen?

Ich bin da ganz gespannt. Ich weiß aber nicht genau, was sie da vor haben.

Also sie sollen jetzt aus ihrer Rolle als Lehrerin sprechen und aus dieser Perspektive die Fragen beantworten.

20

1. Haben sie generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischen Unterricht oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

Ich habe mir letztens einen Vortrag von Prof. Dr. Heering dazu angehört. Da ging es hauptsächlich um so einen Unterricht in der Sekundarstufe I. Ich habe das aber selbst noch nicht durchgeführt.

Nur ein Vortrag gehört, keine eigenen Erfahrungen.

Wieso nicht?

30

Ich habe meine Fakultas im letzten Jahr angefangen zu machen und habe das ganze jetzt versucht im Nachgang zu machen. Damit bin ich jetzt im Februar fertig geworden. Von dem was ich so im Vortrag gehört habe, denke ich mal, dass sich so etwas nur im Wahlpflichtbereich anbietet. Aber ich habe vor das eine oder andere Experiment aus dem Vortrag mal im Unterricht mit einzubeziehen.

Gab es sonst im Studium oder Referendariat Anregungen, Ideen, o.ä. in der Richtung?

40

(Überlegt) Eher nicht.

Keine Anregungen

Was für einen Studiengang haben sie gemacht?

Mathematik auf Lehramt mit Fachrichtung Verwaltung und Wirtschaft und Physik dann im Nachgang. Also nicht klassisch Diplomingenieur.

Mathematik

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel darüber, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten. Woher bekommen sie ihre Ideen und Anregungen?

Unterschiedlich. Fachbücher, Schulbücher, Internet. Breit gestreut.

Was für Inhalte holen sie aus was für Quellen? Wie müsste ich mir das vorstellen, wenn sie eine Unterrichtsstunde vorbereiten?

60

Ich könnte da mal was zu meiner letzten Unterrichtseinheit mit dem beruflichen Gymnasium zu Radioaktivität was anmerken. Das habe ich letztes Halbjahr gemacht. Da haben die Schüler sehr viel machen müssen. Da ging es um den Rückbau eines Kernkraftwerks und was ist überhaupt Radioaktivität. Ich habe denen da gar nicht so viel zu gezeigt, aber es gibt ja diese ferngesteuerten Labore, diese RCL Versuche. Da sollten sich die Schüler dann selbstständig mit befassen. Wenn es dann darum geht was so ein Rückbau kostet, kann man halt schwer auf das Schulbuch zurückgreifen. Da sind die Infos nicht drin. Das haben die Schüler dann über das Internet versucht rauszufinden. Ansonsten Animation. Die sind manchmal auch ganz hilfreich, wenn man die Versuche selber nicht vor Ort hat. Leifi zum Beispiel.

Remote control labs, Leifi, Internet, Schulbuch

70

Wie sieht das aus mit fachdidaktischen Zeitschriften?

Im Augenblick noch nicht so sehr. Ich bin ja erst seit einem Jahr dabei.

3. Spielen historische Inhalte bei der Unterrichtsvorbereitung eine Rolle oder besteht da Interesse, so etwas mehr einzubinden?

80

Das gängige Beispiel wäre ja Newton. Da ist das ja klar, dass man aus der Historie heraus kommt. Oder Messung der Lichtgeschwindigkeit und Galilei. Da habe ich mich auch schonmal an der Historie orientiert, aber die Versuche habe ich jetzt nicht aufgebaut, z.B. das mit der Lampe von Galilei. Sowas nicht, aber theoretisch natürlich. Im Vergleich zu dem Vortrag ist der Unterschied ja ganz klar das Selber-Bauen.

Vereinzelt, z.B. Newton oder Galilei

Woher bekommen sie da Material, wenn sie etwas historisch nachzeichnen?

Auch Schulbücher und Internet. Leifi oder die Universitäten bieten ja zum Teil ganz gute Seiten an.

dafür Schulbuch, Internet.

Haben sie so etwas schon einmal im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik ausprobiert?

Historisch ...mhh. Ja Tschernobyl. Die etwas jüngere Historie. Vom zeitlichen Umfang hat aber zum Beispiel Marie Curie nicht mehr reingepasst.

Bei R nicht, nur Tschernobyl.

100

4. Wie binden sie allgemein das Geiger-Müller Zählrohr in den Unterricht ein?

Das war eine Aufgabe einer Projektgruppe. Die sollten sich mit Messgeräten beschäftigen. Theoretisch mit mehreren und praktisch mit dem Geiger-Müller Zählrohr, was wir hier an der Schule haben.

Nur als Schülerreferat. (Nullrate, Funktion)

Die sollten da zum Beispiel Nullrate messen und das Funktionsprinzip darstellen und den anderen im Vortrag erklären.

110

Was ist ihnen persönlich bei diesem Instrument wichtig?

Wüsste ich jetzt nicht genau. Ich mache es im Unterricht, weil es ein gängiges Messinstrument ist und wir es an der Schule zur Verfügung haben. Da kann man das ja ganz gut machen. Ich habe aber ja auch bisher erst einen Durchgang mit Radioaktivität gehabt.

Gängiges Messinstrument, an der Schule verfügbar

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht oder ein alternativer Inhalt für den Physikunterricht. Was verbinden sie mit diesem Begriff?

Müssten sie mir mal erläutern.

Keine Vorstellung.

Wenn man es platt übersetzt wäre das sowas wie die Wesensart der Naturwissenschaften.

Ja... (überlegt)

130 Also haben sie keine Vorstellungen darüber?

Ja.

6. Wie würden sie ihr persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Ich versuche so viele Fortbildungen wie möglich abzugreifen.

Gibt es dafür hier in der Region genug Angebot oder zu wenig, oder zu viel Auswahl?

Also von Seiten des IQSH gibt es da einiges. An der Uni besuche ich manchmal auch noch die eine oder andere Vorlesung. Da setze ich mich dann einfach nochmal mit rein. Ich habe aber eigentlich eher zu wenig Zeit für die Fortbildungen.

So viel, wie möglich. IQSH Fortbildungen und Uni Vorlesungen, aber generell zu wenig Zeit für Fortbildungen.

Gibt es auch etwas aus dem wissenschaftsgeschichtlichen Bereich an Fortbildungen?

Wissenschaftshistorische n Fortbildungen.

Nicht das ich wüsste, bis auf den Vortrag letzte Woche.

6.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Nein, hatte ich nicht. Das lag am Lehrplan. Zur Zeit habe ich nur einen 11. Jahrgang. Da ist erst einmal Mechanik angesagt.

Nein.

Hatten sie trotzdem Gelegenheit die Inhalte aus der Fortbildung in anderen unterrichtlichen Kontexten einzusetzen?

Nein, gar nicht.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

(lacht) Das ist ja schon ein bisschen her. (Überlegt) Das ist mir abhanden gekommen.

Gar nichts.

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

Die umfangreichen historischen Materialien. Das ist einerseits sehr spannend, aber andererseits ist das für Schüler viel zu umfangreich ist. Ich finde das wichtig, die Geschichte in der Physik mit einzubinden. Zum Beispiel in der Mechanik mit Kepler, Newton, Galileo, aber auch die griechischen Philosophen. Aber das halte ich immer relativ kurz. Das aus der Fortbildung ist ja schon sehr ausführlich.

Quellenmaterial

30

Haben sie denn nach meiner Fortbildung nochmal versucht sich zu einer wissenschaftshistorischen oder Nature of Science Fortbildung anzumelden?

Nein, habe ich nicht. Das liegt aber am Zeitmangel.

Nein.

Wenn sie Zeit dafür hätten, läge da der Fokus mehr auf Wissenschaftsgeschichte oder anderen Themen?

Wenn historisch, dann eingebettet in andere Themen. Rein historisch eher nicht.

Wissenschaftsgeschichte, aber themenspezifisch.

7. Herr Dalton aus Gruppe A

7.1. Prä-Interview

0. Wurdest du schon mal im Rahmen so einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Ia.

Wie sah das da aus?

10

Also Physik war das. Diese historische Geschichte. Das war so ein ähnliches Settings wie hier jetzt auch.

War das das HIPST Projekt?

Ja, das war HIPST. Andreas Henke hat mich da interviewt.

Also ist dir deine Rolle klar, die du jetzt einnehmen sollst?

Sag' ruhig nochmal, was jetzt genau dein Begehr ist.

Mein Begehr ist, dass du aus der Lehrerrolle heraus die Frage möglichst reichhaltig beantwortest.

1. Hast du generell Vorerfahrung mit historisch-genetischem Unterricht oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

Ja. Einmal diese Unterrichtseinheit zu HIPST. Das haben wir hier einmal so durchgezogen. Das war das letzte. Natürlich ist es nicht möglich in einer bestimmten Zeit in Oldenburg Physik auf Lehramt studiert zu haben und dann damit nicht konfrontiert worden zu sein. Das heißt, die Ideen sind mir präsent, aber ich setz' das nicht ganz gezielt tag-täglich um. Es ist aber im Hinterkopf immer da. Ich erkläre nie die warum die Energieeinheit Joule heißt ohne darauf hinzuweisen, dass es was mit den ausgeweiteten Biertrink-Zeiten in England zu tun gehabt hat. Aber das ist natürlich nur, weil es eine nette Anekdote ist.

HIPST, Studium in OL

30

Wie muss man sich das vorstellen in anderen Bereichen, wenn es jetzt nicht um HIPST oder Joule geht?

40

Wenn ich jetzt Elektrostatik mache... Dass ich da schon versuche... nicht einfach sagen: "heute sehen wir das so und so" sondern mindestens: "Der Franklin taucht auf mit seinem Schwamm-Modell" und ich sag: ok, die beziehung.... Auch die Experimente nochmal, soweit wir hier die Möglichkeiten haben... Magnetismus und Elektrizität, Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Auch mal so einen Irrweg. Also versuchen dafür so ein Bewusstsein zu schaffen und eben auch deutlich machen: Es war nicht alles von Anfang an so, wie wir es vermitteln. Auch so Sachen, wie: wo kommt plus/minus her... das man auch sieht, dass was wir jetzt auch alles eine Geschichte hat. Es ist nicht einfach so wie es ist, sondern es ist geworden. Also in dem Rahmen.

Elektrostatik, auch Irrwege um den generischen Prozess zu illustrieren.

Gab es in deinem Referendariat auch Input in der Richtung?

Also nicht von der Fachleiterin, nein.

Kein Input im Ref.

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel darüber, wie Lehrer sich mit welchen Materialen auf Unterricht vorbereiten. Woher bekommst du dein Material, deine Ideen und Anregungen?

Meine Sachen stehen nach 15 Jahren Lehrerdasein da unten im Schrank. Da hab ich die Ordner mit Anleitungen für Experimente, ein zweiter Ordner mit Checklisten, also "das musst du in diesem Thema alles machen". Ich bin hier in der Sek. I. Ich hab relativ wenig Stunden zur Verfügung. Im Laufe der Jahre hat sich so ein Minimalprogramm heraus kristallisiert. Ich freue mich, wenn ich das dann geschafft habe. Natürlich versuche ich hier im Einzugsgebiet von Enercon Lokalthemen aufzugreifen. Ich habe einen Kurs wo jetzt Kernenergie gerade Thema ist. Da gibt es so einen Newsticker. Zwei SchülerInnen müssen am Anfang jeder Stunde sagen, was es Neues zum Thema Endlagersuche gibt. Also da versuch ich schon aktuelle Sachen einzubeziehen.

Festes, eingespieltes und auf Erfahrung basiertes nur selten variiertes Unterrichtsprogramm.

aktuelle Bezüge, z.B. Energiepolitik im Kontext Radioaktivität.

Ist das alles quasi von dir oder wo kamen die Ideen her?

80

90

60

70

Nein, also das ist aus'm Studium, klar. Da sind definitiv noch Sachen, die ich so mache, wie Falk gesagt hat. Die Frage: "Hast du das verstanden?" ist ne blöde Frage und solche Sachen. Dann mittlerweile auch mal in ein Physikbuch gucken, aber auch eigentlich mehr so in der Richtung "ist da jetzt das drin was ich brauche?". Wir haben 'Physik im Unterricht' abonniert. Die guck' ich durch. Aber eigentlich mehr so die Sachen, wo ich sage "ok, ja nett". Ich bin da momentan nicht so in der innovativen Phase. Zeitungsartikel aus Tageszeitungen mit so einer Wissensseite. Da stehen dann manchmal Berichte zum aktuellen Stand der Technik drin. Ab und zu auch "Schüler experimentieren". Da bin ich Juror im Landesentscheid. Da krieg ich natürlich auch mit, wenn da mal so witzige neue Geschichte sind. Das nehme ich auch gerne mit auf. [Austauschen] mit Kollegen eher weniger. Ich hab sehr viel Kontakt mit den Kollegen hier an der Schule, aber ich bin der einzige ausgebildete Gymnasial-Physiklehrer und die andere ausgebildete Physiklehrerin ist gerade im Erziehungsurlaub. Die anderen kommen aus der Technikecke. Ist eher umgekehrt. Ich sag denen, was man so machen könnte. Fortbildungen eher wenig. Diese HIPST Geschichte hatte ich ja mitgemacht. War auch gut, fand ich nett. Ein paar neue Sachen mitgekriegt. MNU Tagungen fahr ich alle 2 Jahre hin. Da guck' ich mir auch Physiksachen an.

Sachen aus dem Studium, Wissenschaftsteil der Tageszeitung, Fachdid. Zeitschriften, Ideen von SchüEx, Fortbildungen eher wenig, MNU Tagung.

Welche Rolle spielen historische Anteile bei der Vorbereitung auf Radioaktivität und Atomphysik Lehreinheiten?

Keine. Ich versuche in relativ wenig Zeit, ein Halbjahr... Also erst mal mache ich Atomkern und Aufbau. Also das was ich brauche, um die grundlegenden Dinge zu verstehen, wie "Was ist Radioaktivität". Diese ganzen Minimalgeschichten. Dann noch ein bisschen Richtung aktuelle Bezüge: Energieversorgung, Problematik und so weiter. Und das wars dann. Ich weise dann noch darauf hin, dass die gute

Hist. Anteile spielen keine Rolle bei der Vorbereitung.

A - 41

Frau Curie als erste.... und so weiter. Also eine von den Sachen, die sie wissen müssen ist: wie lang wird an Radioaktivität geforscht, damit auch klar ist, dass es ein relativ neuer Bereich ist und viel neuer als andere Sachen. Elektrizität erforschen die seit 2000 Jahren, aber Radioaktivität erst seit 100 Jahren. Also solche Geschichten, aber das ist das einzige, was überhaupt in die Richtung geht. Ansonsten bin ich froh, wenn ich das so einigermaßen zeitlich hinbekomme und selbst da muss ich Abstriche machen je nach Lerngruppe.

Wieso gerade Marie Curie? Nur, weil sie eine der ersten war?

120

Ja, also die Ausweitung und welche Rolle im einzelnen… Ich meine, wieso eine der ersten? War sie nicht überhaupt die erste Professorin?

Nunja, eine der ersten Personen, die sich mit Radioaktivität beschäftigt haben.

130

Achso, nein als erste Frau im Wissenschaftsbetrieb. Klar, nä?: "Wer waren die Pioniere der Radioaktivitätsforschung?" Becquerel und Curie. Die müssen als Namen genannt werden und das müssen die Schüler drauf haben. Aber das ist dann eben mehr eine Nebenbemerkung, also "das war die erste Frau als Professorin. Davor war halt nix" also so in die Richtung.

Marie Curie als erste Frau im Wissenschaftsbetrieb.

4. Kommt denn das Geiger-Müller Zählrohr in deinem Unterricht vor?

140

Es wird eigentlich nur einmal als Messinstrument eingesetzt und ich nehme mir noch nicht mal die Zeit und guck' mit denen an, wie das Ding genau funktioniert. Ich bin froh, dass wir eins haben, was funktioniert. Wir haben ein paar Präparate. Damit mache ich ein zwei Demoversuche, aber auch das sehr rudimentär. Qualitativ und Quantitativ gar nichts, außer mal Nullrate, aber sonst nix. So mache ich das zur Zeit.

Reines Blackbox-Messgerät, rudimentäre Demo-Versuche mit dem Zählrohr, z.B: Nullrate.

Wenn du mehr Zeit hättest dafür, was wär dir besonders wichtig im Kontext dieses Instruments?

150

Also wenn ich mehr Zeit hätte würde ich noch eher in den Bereich gehen: andere Anwendungen. Ich bin ja bisher ganz stark bei Energiegewinnung. Da müssen wir ja wissen, wie das funktioniert, weil wir ja noch Jahrhunderte mit dem Dreck umgehen können müssen und deswegen müssen wir Kenntnisse besitzen. Wenn ich mehr Zeit hätte würde ich mir noch medizinische Anwendung angucken oder Altersbestimmung. Diese Geschichten. Das Geiger-Müller Zählrohr würde da nicht mehr Raum bekommen.

Auch bei mehr Zeit bekäme das ZR nicht mehr

5. Nature of Science ist ja zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht. Was verbindest du mit diesem Begriff?

Für mich ist das "Wie funktioniert Naturwissenschaft". Was ich versuche zu vermitteln ist, dass "es ist richtig, weil ich es sage" eben Stand Aristoteles ist. Dieses Autoritätsding: "Du hast es gesagt also wird es schon stimmen"... dass das nicht mehr aktuell ist und das es auch nicht immer über Mehrheitsentscheid geht, aber manchmal auch schon. Ich versuche auch Einblick zu geben in "du hast das was gemessen. Ist das ein Messfehler oder der nächste Nobelpreis?". In der Richtung, aber das ist punktuell und eher selten. Es ist nichts wo ich sage, da muss ich extra Zeit für vorsehen oder eine extra Einheit zu machen. Das ist eigentlich immer präsent. Ich versuche ihnen ganz viele Basics zu vermitteln, also Fachwissen. Aber wo es geht eben auch deutlich zu machen, wie es dazu gekommen ist. Wie geht damit um? Beispielsweise Radioaktivitätsgeschichte... das ist jetzt nicht ganz Nature of Science, sondern eher ein politisches Thema. Bei Strahlung kann man sagen, was das ist, aber die Festsetzung der Grenzwerte ist schon fast Politik. Das ist halt wie Sachen bewertet werden. Es ist eben nicht der Elfenbeinturm, sondern es ist definitiv eingebunden in das politische Geschehen.

Wie funktioniert Naturwissenschaft

Experimente und Messen im Kontext von Erkenntnisgewinnung

Naturwissenschaft, Politik und Verantwortung

Aber ist Nature of Science nicht aus diesem Blickwinkel gerade in diesem

Bereich stark, weil es so eine Art Metainhalt für den Physikunterricht ist?

Ja, natürlich.

170

180

190

200

210

Findest du es dann eher schade, dass es nicht eingebunden werden kann im Unterricht?

Also es ist ja die Frage, wie ich es einbinden kann und wenn diese Frage nicht wär, wäre ich morgen [bei der Fortbildung] auch nicht da

6. Wie würdest du generell dein persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Es ist so eine Mischung zwischen Arroganz und Neugier. Arroganz weil: Ich brauche eigentlich keine Sachen mehr, ich habe ganz gut was, eigentlich könnte ich ne Fortbildung geben. Das ist jetzt extrem. Und Neugier aber auch, weil es ja noch eine Menge Sachen gibt, die ich nicht weiß. Die MNU Tagung ist eigentlich so mein Ding, weil man da so ein ganzes Potpourri hat, wo ich mir die netten Sachen aussuchen kann. Das ist auch immer was von Chemie dabei. Das ist immer nett zum Gucken. Oder auch andere Sachen, wo ich denken, dass die einfach interessant sind. Generell habe ich bisher an Langzeitfortbildungen teilgenommen in Informatik. Der Intech-Schulversuch. Es geht darum mehr technische Inhalte im Informatikunterricht der Sek.I zu vermitteln. Das lief drei Jahre jetzt und alle zwei Monate war dann so ein Tag. Das war eher so ein langfristiges Zeug. Aber generell bin ich da nicht überehrgeizig. Dass ich dir geschrieben habe, dass mein Fortbildungsetat erschöpft ist, liegt natürlich an dieser Intech Geschichte.

Eine Mischung aus Arroganz und Neugier: eingefahrenes Unterrichtsprogramm steht, aber trotzdem neugierig auf neue Dinge.

Gibt es denn genug Angebot für dich oder eher zu wenig bzw. zu viel?

A - 43

Nein, ich denke es gibt genug. Für mich ist maßgeblich: Ich fahre nicht gerne weit. Oldenburg ist für mich schon ne Hausnummer da hin zu fahren. Hier in der Gegend ist aber natürlich wenig. Leer bietet ab und zu an, dass man teilnehmen kann an den Sitzungen des Studienseminars Physik, aber das bringt mir nichts denk ich. In Sport achte ich darauf, dass halt mein Übungsleiterschein nicht verfällt. Da guck ich, dass ich einmal im Jahr eine Fortbildung mache, aber da suche ich mir auch Sachen aus, auf die ich am meisten Bock habe. Also jetzt nicht Fortbildungen, bei denen es um die Umsetzung der neuen Curricula geht.

Wie sieht das mit wissenschaftshistorischen Themen aus?

Also da war jetzt die Teilnahme an diesem HIPST Projekt. Sonst nichts. Nur jetzt dieses hier.

230

220

Hast du denn wahrgenommen, dass es so ein Angebot in der Richtung gibt?

Nein, ich suche auch nicht aktiv in irgendwelchen Datenbanken und angesprochen hat mich sonst auch keiner.

Würdest du dir denn so was wünschen?

Nö.

240 Würdest du dir so was für andere Lehrer wünschen?

Weiß ich nicht. Meine Kollegen hier: nein. Die sind alle Fachfremd. Da würde ich schon sagen, da sind andere Sachen dringender... definitiv.

A - 44

7.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Ja, ich habe gerade eine 10. Klasse und mach da meinen üblichen Lehrgang.

Ja, 10. Klasse

Wie ist da der grobe Ablauf der Unterrichtseinheit?

10

Die Schüler bekommen nach und nach vier Checklisten, in denen sie dann nach und nach die Grundlagen lernen. Das geht los mit dem Aufbau von Atomen und der Modellvorstellung, über "Warum fliegen die Atomkerne nicht auseinander?" und dann Radioaktivität, Eigenschaften dieser Strahlung, usw. Den Anteil mit den Kernkraftwerken habe ich aber im Gegensatz zum letzten Jahr rausgenommen und mehr über die Grundlagen des Atommodells gemacht und den Nachweis von Strahlung, zugehörige Messgrößen und so etwas. Ganz am Ende mache ich dann ein bisschen zu Kernkraftwerken mit Schüler-Eigenrecherche. Das Geiger-Müller Zählrohr habe ich auch neu reingenommen. Da gab es ein Referat zur Funktionsweise. Das hatte ich vorher auch schon kurz drin, aber das hat nie jemand verstanden. Experimente kann ich nicht viel zeigen, weil wir dafür kein Material haben. Das ist dann eher so eine Art Methoden-Lehrgang für die Schüler und das Wiederholen der Kontrollfragen der Checklisten. Dazu haben die Schüler dann ihre Notizen nicht in die Mappe gemacht, sondern auf verschiedene Faltfiguren in verschiedenen Farben, so á la "Halbwertzeit Uran? Das steht auf dem blauen Schiff!". Einige Schüler sind da sehr kreativ mit umgegangen. Die Figuren habe ich dann auch mal eingesammelt und den Schülern Rückmeldungen gegeben. Da haben sich auch eigentlich alle dann drauf eingelassen.

Lehrgang System, Atomkern, Radioaktivität, KKWs, GMZ neu drin, methoden-lastig.

20

30

Hattest du denn auch Gelegenheit Inhalte aus der Fortbildung einzusetzen?

40

Ich achte jetzt konsequent darauf vom Geiger-Müller Zählrohr zu reden und nicht vom Geigerzähler. Aber das ist eher so mein Ding. Ich hatte dann überlegt, das historische Material aus der Fortbildung dem Referenten zum Zählrohr zu geben. Da habe ich mich dann aber dagegen entschieden, weil ich ihn nicht überstrapazieren wollte. Er hatte schon genug Material. Aber prinzipiell halte ich die Briefe und den Lebenslauf für geeignet. Für mich als Hintergrundwissen ist das aber ganz nett.

Geänderte Wortwahl hin zu Geiger-Müller Zählrohr, statt Geigerzähler.

Briefwechsel, Lebenslauf geeignet.

Planst du denn auch andere Inhalte der Fortbildung zukünftig einzusetzen?

50

Das war ja jetzt für mich quasi ein zukünftiger Durchgang. Da habe ich ja den Modellteil zu den Atomen erweitert. In den letzten Jahren habe ich das Zählrohr auch nicht so intensiv thematisiert und das eher so beiläufig gemacht. Aber dieses Mal habe ich gesagt, dass das nicht reicht und dann halt das Schülerreferat verteilt. Dieser Aspekt ist stärker betont worden als sonst auf Grund der Fortbildung. Zwar

Modellcharakter bei Atomen stärker betont.

fachlich fokussierter, weniger NoS Aspekte.

nicht der menschliche Teil oder der Wissenschafts-Betrieb Teil, sondern eher der fachliche Teil.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

60

(Überlegt) Eigentlich nichts anderes als vorher. Wissenschaft funktioniert nach bestimmten Regeln. Nature of Science beschreibt das. Es ist nicht nur die wissenschaftliche Erkenntnis, die alleine im Raum steht, sondern immer auch personenbezogen, Netzwerke spielen eine Rolle und Anerkennung von anderen.

NoS beschreibt Regeln, nach denen Wissenschaft funktioniert. Erkenntnis ist personenbezogen, Netzwerke und wechselseitige Anerkennung spielen eine Rolle.

Hast du das denn im Radioaktivitäts-Unterricht thematisiert?

Nein, das war kein Thema. Dafür war das zu klein als Punkt.

Hast du denn solche Aspekte in anderen unterrichtlichen Kontexten seit der Fortbildung thematisiert?

Nein, aktuell ist das nicht drin. Sonst mache ich nur noch E-Lehre. Aber vielleicht mache ich das noch. Ich habe da zur Zeit zwei Klassen mit einem riesigen Leistungsunterschied. Auf Grund der rückwirkenden Umstellung von G8 auf G9 habe ich dann da ein bisschen Luft. Ich mache jetzt noch ein paar Grundlagen und danach habe ich Zeit in der guten Klasse solche Dinge einzubinden. So eine komplett andere Herangehensweise als sonst. Das läuft aber dann bestimmt nicht auf so einem hohen Niveau ab, wie Didaktiker das gerne hätten.

Nein, sonst nur noch in E-Lehre, aber Angst vor zu geringem Niveau.

80

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

Diese Ungerechtigkeit gegenüber von Herrn Müller. Der wurde ja runtergebuttert. Das ist jetzt meine Lesart, dass er um die Früchte seiner Arbeit gebracht wurde. Ein anderer Punkt wäre noch die Funktionsweise des Zählrohrs. Das habe ich sonst immer nur so hingenommen.

Ungerechtigkeit gegenüber Müller, Funktionsweise des Zählrohrs.

90

Hast du dich sei dem erneut versucht, dich zu einer wissenschaftshistorischen oder NOS-Fortbildung anzumelden?

Nein, habe ich nicht versucht.

Wenn du das machen würdest, wo läge da der Fokus?

100

Ich denke ich würde das themenabhängig machen, also was ich zur Zeit unterrichte. Dann ist mir das auch egal ob wissenschaftshistorisch oder Nature of Science. Da finde ich beides interessant.

Themenabhängig.

8. Frau Herschel aus Gruppe A

8.1. Prä-Interview

0. Wurdest du schon mal im Rahmen so einer Studie interviewt?

Also, ich hab schon viele Lehrerinterviews geführt, aber zu diesem Thema noch nicht.

Wie war das bisher bei den anderen Interviews?

10

20

Was meinst du damit: wie das bisher war?

Wie du dich dabei gefühlt hast, wie deine Rolle da war, die du einnehmen musstest...

Ich bin schon interviewt worden, vor allen Dingen zu diesen Studien historischer Unterricht, also historisch kontextualisierter Unterricht. Da ging das einfach darum, wie man Unterricht gestaltet, welche Elemente ich da einfließen lasse in meinen normalen Unterricht... dieses Nature of Science Prinzip. In dem Rahmen bin ich schon interviewt worden und ansonsten von der Uni immer nur im Rahmen dieser Forschungspraktika, also da regelmäßig, dass die [Studierenden] irgendwelche Fragen haben, wie man sich in der Lehrerrolle sieht, und und und...

Also ist deine Rolle, die du jetzt einnehmen sollst, klar?

Joa...

30 Die unbefangene Lehrerposition. Gut.

1. Also gehe ich davon aus dass du Vorerfahrungen mit historischgenetischem oder historisch orientierten Unterrichtsverfahren hast?

Ja.

Welche?

40

Jetzt eigene praktische Erfahrungen? Ich hab zur zeit meines Studiums in den Praktika viel diesen historisch orientierten Unterricht gemacht und meine Masterarbeit und auch meine Bachelorarbeit über solche Themen geschrieben. Dann hab ich im Referendariat an diesen HIPST-Treffen teilgenommen und auch ersucht das im Unterricht einzusetzen. Hier unterrichte ich jetzt Wahlpflichtkurse viel im Physikunterricht und habe da dann halt die Möglichkeit auch mal ein bisschen historisch orientierten Unterricht zu machen an Experimenten. Also dass wir vor allen Experimente haben, die historisch aufbereitet werden oder nochmal geguckt wird: wo kommt das denn überhaupt her? was haben die Forscher sich damals dazu überlegt? Und ich hab ein Seminarfach geleitet im naturwissenschaftlichen Bereich hier und auch da hatten wir so etwas. Mein kommendes Seminarfach ist tatsächlich Natur der Naturwissenschaften. Das heißt dann schon SO.

Studium, hauptsächlich durch Praktika und Abschlussarbeiten. HIPST Projekt.

eigener Unterricht, Wahlpflichtbereich, historischer Kontext

Seminarfach über NoS

Kannst du noch ein paar weitere Beispiele geben... aus der Praxis?

60

70

80

90

Konkret:

Mechanik Bewegungslehre nach HIPST.

Elektrostatik

Druck, Akustik im Wahlpflichtbereich.

in der Oberstufe keine Zeit dafür

Jetzt was ich konkret gemacht habe? Gut, also ganz viel machen wir natürlich in der Bewegungslehre zu diesem historisch orientierten Unterricht. Also wenn wir jetzt zum Beispiel Bewegungsgesetze haben... das klassische, was von Dietmar Höttecke entwickelt worden ist.... Galilei und Aristoteles'sche Bewegungslehre gegenüberstellen. Das mach ich viel. Gerade auch, wenn wir ... also ich finde Mechanik eignet sich besonders dafür oder aber auch die Elektrizitätslehre. In der Elektrizitätslehre mach ich viel historisch kontextualisierten Unterricht. sprich Elektrisiermaschine, Elektrisierer und so weiter oder wenn's dann um die Volta'sche Säule geht oder sowas... dass wir das dann daran aufziehen.... dass wir viel Elektrostatik nochmal machen, obwohl das eigentlich schon raus ist. Aber da fang ich eigentlich immer mit an. Also das wir im normalen Fachunterricht .. also gerade Bewegung machen wir in Klasse 8... in Klasse 8 mach ich viel... so historische...ja. Ich find immer ,nicht so ganz historisch' geleiteten Unterricht, aber wir lassen diese Aspekte einfließen. So ganze Unterrichtseinheiten das schafft man einfach nicht. Dann ... jetzt im Wahlpflichtkurs hab ich versucht... da ist Akustik und Druck... zu Druck kann man ja auch ganz viel machen, so dass man überhaupt mal guckt, dass man diese ganzen Gasgesetze auch historisch aufzieht: wo kommt das überhaupt her? Was sind die Ursprungsexperimente? Zur Akustik.. da bin ich gerade noch ein bisschen am schwimmen. Das muss ich mir noch genauer überlegen. Da würde ich aber auch ganz gerne noch was einfließen lassen. Klasse 5/6 ist ganz schwierig finde ich. Da haben wir jeweils nur eine Stunde jedes Halbjahr. Da habe ich noch nichts gemacht, obwohl sich die Optik - das machen wir in 6 gut eignen würde. Da find ich sind die Schüler aber noch nicht so weit. Jetzt in der Oberstufe im Seminarfach... im Fachunterricht: keine Chance. Wir müssen ganz klar aufs Abitur vorbereiten. Die Zeit ist so knapp, da mach ich gar nichts diesbezüglich. Da fällt das ganz hinter über, aber dafür dann im Seminarfach. Die Schüler wählen dann denk ich - ich hab's ja noch nicht gemacht, dieses Natur der Naturwissenschaften Seminarfach - Elektrizität wieder, weil sie das einfach spannend finden und man auch tolle Experimente dazu machen kann. Dann möchte ich da auch die Optik auf jeden Fall reinnehmen. Überhaupt, was ich schön finde ist auch Fernrohr und sowas. Das möchte ich da historisch aufziehen. Ich weiß nicht genau... ich denke nicht so die Bewegungslehre, wie ich das in Klasse 8 mache, aber wahrscheinlich Fallbewegungen nochmal... diese Galilei'sche Versuche möchte ich wohl machen. Da ist dann auch gerade dieser Wurf... Ja das sind so die Dinge.

100 2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel darüber, wie Lehrer sich vorbereiten auf ihren Unterricht. Woher bekommst du dein Material oder Anregungen, Ideen für deinen Unterricht?

Also, ich würde sagen, es gibt drei große Säulen. Erstmal gibt es Lehrwerke und Lehrerhandreichungen. Da gucke ich natürlich rein, auch um zu gucken, was wird so gefordert überhaupt im eben Fachunterricht. Kerncurriculum. Das im Wahlpflichtunterricht ist es anders. Im Wahlpflichtunterricht habe ich natürlich als ganz große Säule das Internet. Das ist wirklich total wichtig. Wir nutzen hier total viel diese Leifi-Seiten. Das ist total klasse. Wir nutzen auch Simulationen aus dem Internet. Es gibt ja auch sogar diese Lab-Simulationen.. diese Laboratories, die man dann starten kann.... online... super. Die dritte große Säule sind natürlich die Fachkollegen. Gerade für mich als Junglehrer total wichtig. Die kommen hier rein und dann fragt man einfach: "Sag mal, kennst du da einen guten Versuch zu?" oder manchmal kommen die auch von sich aus. Das ist hier ganz toll. "Du machst grad stehende Wellen... Also ich mach das immer so" und dann hört man sich das an und fragt: "was nutzt du denn dafür?" sonst ist man ja total aufgeschmissen. Diese Fachkollegen braucht man ganz dringend, weil man einfach... ich war noch nie so der große Experimentator. Ich habe mehr kaputt gemacht, als alles andere. Wenn ich hier dann so die ganzen Aufbauten und die Bestandteile sehe... man braucht die Kollegen einfach. Dann frag ich so: "wie setzt du das denn um?" Das ist das schnellste, das einfachste, das beste und dann macht man das so.... ist ganz toll.

Schulbücher und Handreichungen als Ersatz für das Kerncurriculum. Im Wahlpflichtunterricht ist Internet die primäre Quelle: Leifi, Lab Simulationen

Fachkollegen

Also vorwiegend Schulbücher, Fachkollegen und Internet. Wie sieht es mit Zeitschriften aus?

130

140

110

120

Ganz wenig. Wir haben hier noch nicht mal eine Zeitschrift bestellt oder abonniert. Ich habe eine Zeit lang "Unterricht Physik" gehabt und da ab und zu mal reingeguckt, dann hab ich die irgendwann abbestellt. Wenn mich wirklich was interessiert kann ich das auch in der Uni nachgucken. Ich wohn relativ nah an der Uni, bin viel an der Uni und dann kann ich auch da gucken und mir das kopieren gegebenenfalls. In der Chemie oben sieht es anders aus. Da haben wir drei verschiedene Zeitungen abonniert, die da immer stehen. Aber ich nutz das einfach wenig, weil ich immer denke: "Google ist da" und ich geb' den Suchbegriff ein und dann kommt das… und manchmal kommt da ja auch irgendwas aus einer Zeitschrift. Wenn ich dann sehe: aha, da gibt's irgendeinen Artikel in einer Zeitschrift zu, dann guck ich da halt. Wenn dann konkret irgendwas kommt zu historisch orientiertem Physikunterricht, dann hol ich mir die Zeitschrift auch und guck da rein. Manchmal kriegt man auch einen Tipp von Kollegen: Da gibt's in einer Zeitschrift einen Artikel. Ich kenn das aus dem Referendariat anders. Also am Neuen Gymnasium war dann schon viel, dass Kollegen da in Zeitschriften geguckt haben, aber das ist hier ganz anders. Das ist wohl auch schultechnisch anders. Ich selbst brauche das wenig. Was ich mal so ganz gerne hab - das ist ja nicht wirklich Zeitschrift - aber wenn Themenhefte irgendwie rausgebracht werden, im Friedrich Verlag oder so. Da guck ich schon rein.

Zeitschriften ganz wenig.

,Google' erlaubt einen schnelleren Zugriff auf Unterrichtsmaterial.

themenhefte mit historischen Inhalten aber dann doch.

150

3. Gab es auch schon mal was in Richtung Radioaktivität oder Atomphysik, wo du das historisch angegangen bist oder historische Materialien gesucht hast?

Ne und da muss ich ganz ehrlich sagen: Ich habe noch nicht Klasse 9 unterrichtet. Deshalb hab ich mich auch zu dieser Fortbildung angemeldet, weil ich unbedingt... – es gibt so Kollegen die unterrichten immer Klasse 10 oder immer Klasse 9 und ich unterrichte halt immer Klasse 8. Jetzt hab ich gedacht, dass ich jetzt auch mal 9 machen muss. Deshalb hab ich mich auch angemeldet, weil zu Radioaktivität müsste ich mich mal ein bisschen fortbilden. Ich hab dann eben auch mit einem Kollegen aus Wilhelmshaven gesprochen und der hat Klasse 9 schon unterrichtet und hat gesagt: es müsste doch eigentlich Möglichkeiten geben, dass man auch Schülerexperimente zu Radioaktivität machen kann. Da haben wir uns lange drüber unterhalten und da hab ich gesagt, dass ich das noch nicht unterrichtet habe und dass ich mich da unbedingt mal umhören muss. Deshalb wollte ich zu deiner Fortbildung kommen, um mich da inspirieren zu lassen.

Klasse 9 bzw. Radioaktivität bisher nicht unterrichtet.

170

4. Also die nächste Frage wäre , wie du das Geiger-Müller Zählrohr in den Unterricht einbindest, aber das wäre ja in deinem Fall obsolet. Gibt es denn trotzdem etwas, was dir an diesem Instrument besonders wichtig ist?

180

190

200

(überlegt) Wir benutzen das ja. Es ist ja nicht so, dass wir das nur in der Physik benutzen, sondern auch in der Chemie oder auch eben in der Oberstufe [in Physik]. Da kommt das ja auch auf mich zu jetzt, dass ich das im nächsten Jahr machen muss. Die Schüler kennen eigentlich alle ein Geiger-Müller Zählrohr oder haben es schon mal gehört. Das ist irgendwie verknüpft mit dem klassischen Knacken. Das ist mein Eindruck. Aber es ist mehr so eine Blackbox für sie. Die wissen eigentlich nur oder haben im Kopf: Viel Knacken bedeutet da ist irgendwas und wenig Knacken ist nicht so schlimm. Das stört mich immer so ein bisschen. Dann sag ich immer: Was ist denn dieses Knacken überhaupt? Deshalb fand ich den Titel dieser Fortbildung auch so interessant: "Wie das Knacken in den Geigerzähler kam" (lacht) Die Schüler behandeln das wie ne Blackbox und das ist momentan so der Trend, der leider im Physikunterricht momentan so um sich greift: Wir haben eine große Blackbox und die macht irgendwas. Wir gucken was reingeht und was raus kommt, aber wir gucken nicht was da drin passiert. Das ist mir wichtig. Erst mal das Prinzip überhaupt verstehen. Es könnte ja auch ne Batterie und ein Lautsprecher drin sein. Das ist so meine Idee. Das würde ich auch in Klasse 9 erst mal so anfangen, bevor wir überhaupt irgendwelche Messwerte aufnehmen oder uns damit weiter auseinandersetzen oder auswerten. Man muss erst mal gucken, wie das Messgerät überhaupt funktioniert: Was registriert es eigentlich?

Bisher nur in Chemie oder Physik Oberstufe benutzt.

Schüler kennen das GMZ wegen dem Knacken, aber als Blackbox.

Das entspricht leider dem Trend.

Messprinzip verstehen ist wichtig.

5. Nature of Science ist ja ein zumindest in der Fachdidaktik sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht. Du hattest jetzt eben schon über dein geplantes Seminarfach erzählt. Was verbindest du mit dem Begriff Nature of Science?

A - 50

220

230

240

250

Das hat ganz viel damit zu tun "wo kommt eigentlich Naturwissenschaft her". Für mich bedeutet das erst mal: wir haben heute bestimmte Verfahren... ne, die Grundfrage ist: Gibt es eine naturwissenschaftliche Methode?. Das möchte ich auch im Seminarfach dann diskutieren. Gibt es ein Verfahren, wie Naturwissenschaften funktionieren. nach denen Naturwissenschaften ablaufen müssen - naturwissenschaftliche Forschung vor allen Dingen und ändert sich dieses Verfahren? Das sind so die Fragen. War das früher genauso wie heute? Viele Schüler denken: Früher war das mehr so stümperhaft. Aber wir wollen ja gucken, ob das nicht heute im Vergleich zu unserer Zukunft nicht auch stümperhaft ist. Hat sich das vielleicht auch geändert? Was hat sich verändert. Ist die Wissenschaft wirklich genauer geworden oder was macht jetzt das Messgerät aus. Wie waren früher die Messgeräte, wie sind heute die Messgeräte. Zu Nature of Science gehört ja auch ganz viel - nicht nur jetzt Physik, Chemie und Bio, was damals sowieso noch nicht getrennt war - sondern auch die ganze Gesellschaft drum herum. Ich finde auch die Frage interessant: Was fördert die Naturwissenschaftliche Forschung. Welche Einflussfaktoren wirken sich darauf aus. Das diskutier ich ganz oft mit meinen Schülern. Gesellschaft wirkt sich ja auch auf Forschung aus. Wir sehen das ja bei der Industrialisierung also ganz stark. Das weiß man ja alles. Das denke ich gehört auch dazu, also wie ist das verknüpft und gibt es heute auch noch solche treibenden Faktoren. Dann gehört auch ganz viel dazu Wissenschaft und Verantwortung und ob das ein hemmender oder fördernder Faktor ist. Gültigkeit von Gesetzen. Das gehört auch dazu. Haben die Gesetze, die damals dann aufgestellt worden sind - und Theorien auch heute noch Gültigkeit oder Modelle... oder befinden die sich im Wandel. Das gehört für mich alles dazu. Ganz viel auch Bewertung, Fragestellung,...

Wo kommt NaWi her? Gibt es ein Grundmuster in den Naturwissenschaften?

historische Einfüsse

Gesellschaftliche Einflüsse

Wissenschaft und Verantwortung

Wissen im Wandel

Also bindest du das eher stundenweise ein oder kommt das immer mal wieder implizit?

schultechnisch Zeit habe, also so lange Halbjahre oder eben ein Seminarfach, wo es kein Kerncurriculum gibt oder ein Wahlpflichtkurs. Dann kann das auch schon mal kommen, dass wir erst mal ein bisschen experimentieren und dann gucken, wie man das denn früher gemacht hat oder gucken wo das überhaupt herkommt. Es ist nie so, dass ich eine ganze Unterrichtseinheit dann wirklich historisch orientiert gebe, sondern immer eher so stundenweise. Wir haben ja das Doppelstunden-Modell. Eins Stunde so, eine Stunde so. Aber auch ganz viel diese Bewertungsfragen einbinden. Oder: Was war das eigentlich für einer, der das

erfunden hat? Wo kommt der her? Wir nutzen auch diese "Meilensteine der Naturwissenschaft und Technik", also diese

Das kommt immer mal wieder. Also gerade so wenn ich

Implizite Vermittlung oder ganzes Seminarfach.

Warum gerade implizit und nicht stundenweise? Das ginge ja auch.

15min Filme. Dann gucken wir uns das dann an.

Ich habe so den Eindruck, dass das mehr für Abwechslung sorgt auch bei den Schülern. Wenn man sie damit zu sehr zu dröhnt und zu viel ... gerade denk ich in Klasse 8. Da sind die immer so ein Implizite Vermittlung von NoS Inhalten sorgt für Abwechslung. bisschen skeptisch, wenn es darum geht: "Jetzt müssen wir uns da die verstaubten Wissenschaftler angucken" Aber wenn man mit ihnen darüber redet und das ein bisschen verdeckt und immer mal wieder einfließen lässt sorgt das für Abwechslung und macht das dann auch normal.

270

280

290

6. Wie würdest du dein persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Ich habe keine volle Stelle, soviel vor weg - also bewusst nicht, damit ich Zeit für andere Dinge habe. Ich versuche immer bewusst an vielen Fortbildungen teilzunehmen. Gerade so etwas, was mich interessiert. Also das hier interessiert mich total, weil es mich glaub ich voran bringt. Ich geh nicht gerne zu Fortbildungen, wo es dann um Binnendifferenzierung geht und so was. So allgemeine Didaktik-Fortbildungen brauch ich nicht. Aber gerade Fachfortbildungen finde ganz spannend. Fortbildungen, Unterrichtsmaterialien oder -ansätze diskutieren kann. Wo man bisschen Input bekommt, wie man Unterricht gestalten kann. Fortbildungen, wo ich den Eindruck habe, dass ich dort einen konkreten Vorschlag oder Anhaltspunkt bekommen könnte. Deswegen finde ich diese Zeitschriften auch gar nicht so schlecht, weil die eben auch konkrete Vorschläge haben. Das hilft immer ganz viel, genau wie das Gespräch mit Kollegen. Ich finde auch immer ganz spannend, dass man dann einen Austausch mit anderen Schulen und anderen Kollegen bekommt. Also ein bisschen raus kommen aus dem eigenen Pool. Das ist so ganz wichtig für mich, dass ich andere Kollegen auch treffe und da diesen Austausch hab und gleichzeitig diesen Input von einer Fachkraft, die dann da eben viel Bescheid weiß und sich viele Gedanken über das Thema gemacht hat. Das nutze ich sehr viel, also gerade diese Fachfortbildungen und gegenseitiger Austausch. Danach suche ich mir Fortbildungen aus.

Möglichst viele Fortbildungen, Auswahl interessensgesteuert und eher fachspezifisch und nicht pädagogisch oder fachdidaktisch.

Austausch mit Fachleuten und Kollegen von anderen Schulen.

Gibt es denn genug Angebot oder zu viel oder zu wenig?

300

Was ich super finde zum Beispiel... da habe ich mich auch für angemeldet... Gesprächskreis zum Zentralabitur. So etwas fehlt mir noch mehr. Ich hätte ganz gerne noch mehr so geleitete Gesprächskreise zu unterschiedlichen Themen, z.B. dass man so Doppel-Jahrgangsgesprächskreise hat für Lehrkräfte, was dann auch nicht so ewig lange ist immer - also nicht von morgens um 8 bis um 17 Uhr, so dass der ganze Tag frei sein muss. Jetzt habe ich zum Beispiel eine Fortbildung unter der Woche. Dann weiß ich, dass ich nächste Woche nicht zur gleichen Zeit zu einer Fortbildung kann, weil dann zweimal mein Unterricht ausfällt. Das kann ich nicht machen in diesem kurzen Halbjahr. Ich fände total super, wenn so einmal im Monat dann so Gesprächskreise wären. Nachmittags von 15 bis 18 Uhr und Doppeljahrgang 7/8 oder Doppeljahrgang 9/10 oder so was. Dann immer so thematisch nach Kerncurriculum. Geleitet von jemanden von der Uni oder erfahrenen Kollegen, die sich eingearbeitet haben. Das man so kontinuierlich einen Austausch hat. So was würde ich total gern nutzen. Das fehlt mir. Gerade für junge Kollegen. Aber es sollte

Es fehlen mehr geleitete Gesprächskreise unter Kollegen von versch. Schulen zu verschiedenen jahrgangs-spezifischen Themen.

jemand von der Uni dabei sein. Nur Lehrer artet dann immer so aus. Die schimpfen immer ganz viel.

... und Fortbildungen zu wissenschaftshistorischen Themen? Wie sieht das da mit dem Angebot aus oder mit deiner Nachfrage?

Ich mache ja jetzt sogar mit Falk zusammen im Oktober diese Juniorakademie. Da leite ich mit ihm zusammen den Physikteil. Da geht es dann ja auch viel um historische Experimente und um Wissenschaftstheorie. Klar, wenn man mit Falk zusammenarbeitet geht es da immer drum (lacht).

Ich frage da eigentlich relativ viel nach, aber ich krieg da nicht so richtig Rückmeldung. Zum Beispiel hätte ich wahnsinnig gern für mein Seminarfach nen Vortrag gehabt – auch für meine Schüler – von der Uni. Da kam dann aber nix. Da hat sich kein Termin gefunden. Dieses HistoLab was es da gibt und wo man hingehen könnte ist auch immer nur so sporadisch zu erreichen. Das ist echt rar. So ne richtige Fortbildung zum Beispiel auch zu dem HIPST Projekt mit Bewegungslehre... die gab es nicht. Das ist schade.

Nachfrage besteht, Angebot gibt es keines.

auch bestehende Angebote für Schüler, wie HistEx oder Vorträge von externen Personen eher zäh und schleppend.

eine Fortbildung zu HIPST gab es ja auch leider nicht.

Was meintest du mit HistoLab?

340

330

Dieses HistoLab wird ja von der Uni angeboten. Ich weiß gar nicht, ob die das inzwischen eingestampft haben. Da gab's dann immer so ne Reihe von Versuchen, die hat dann Wolfgang Engels mit Falk (Rieß) zusammen aufgebaut. Das gab's zum Beispiel am Tag der Oldenburger Schülerlabore. Da hatten die das HistoLab aufgebaut und dann so ein kleines Skript dabei. Leydener Flasche, Elektrisiermaschine,... all das, was wir hier nicht haben. Ich habe mal versucht, dieses HistoLab zu buchen für meine Schulklasse, dass wir da mal hingehen können in die Uni oder dass es da mal eine Fortbildung zu gibt... wie man das mit einfachen Mittel machen kann, wenn man jetzt gerade keine Elektrisiermaschine hat. Das fehlt mir. Das kam irgendwie immer nicht zustande. Da hätte ich gern was gehabt. Das ist ja nun nicht direkt eine Fortbildung, aber so ne Anlaufstelle.

350

Ok, Vielen Dank.

8.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Atomphysik habe ich in der Oberstufe jetzt angefangen, allerdings sind wir noch nicht beim Kern, sondern erst bei der Atomhülle. Radioaktivität haben wir noch nicht gemacht.

Ja, AP in der Oberstufe, aber noch nicht beim Kern angekommen.

10 Hattest du trotzdem Gelegenheit Inhalte aus der Fortbildung zu verwenden?

> Deshalb gar nicht. Da bin ich dann auf die Inhalte der Fortbildung angewiesen.

Inwiefern planst du denn die Inhalte einzusetzen?

Auf jeden Fall werde ich mit einem Kollegen aus dem Parallelkurs das Geiger-Müller Zählrohr einsetzen und dann auch etwas zur Entstehung und dem Aufbau machen. Ich habe einen grundlegenden Kurs. Die sind auch immer ein bisschen an der Geschichte interessiert. In abgespeckter Version bekomme ich dann vielleicht auch den Streit dann da rein. Viel Zeit kann ich da aber nicht drauf verwenden, weil die Schüler bald ihr Abitur schreiben.

Ja, mit einem Kollegen zusammen.

Aufbau und Entstehungsgeschichte.

Hattest du denn Gelegenheit die Fortbildungsinhalte in anderen Kontexten einzubinden?

Nein, gar nicht.

20

30

40

50

Nein.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

Ich denke nicht, dass sich das seit der Fortbildung verändert hat, sondern dass sich meine bisherigen Assoziationen eher verstärkt haben. Nature of Science bedeutet für mich danach zu gucken, wie es zu bestimmten Gesetzmäßigkeiten, Begriffen oder Erfindungen in der Naturwissenschaft kommt - also wie das begründet ist und wie der Weg dort hin ist. Dann kann man dabei ja auch feststellen, dass es nicht nur ein Person gegeben hat, die sich mit einem Gegenstand beschäftigt hat und noch viele andere Aspekte damit reingespielt haben – wie man das auch beim Geiger-Müller Zählrohr gesehen hat. Oder wie es zu Parallelentwicklungen kommen kann. Schüler denken ja oft, dass sich da einer hinsetzt und eine gute Idee hat, die dann erfolgreich wird. Die wundern sich dann immer, warum sie selbst solche glorreichen Einfälle nicht haben. Bei Nature of Science guckt man dann quasi nochmal genauer hin - auch auf Rückschläge und dann auch schaut, ob das wirklich Rückschläge waren oder ob man das nicht auch anders sehen kann. Man setzt sich dann mit der Geschichte und der Wissensgenerierung auseinander. Das ist für mich Nature of Science.

Nach eigener Einschätzung keine Veränderung. Entstehungsprozess von Gesetzen, Begriffen und Erfindungen. Parallelentwicklungen, Rückschläge, Geschichte der Wissensgenerierung.

Hast du solche Aspekte in deinem Oberstufenkurs bisher schon thematisiert?

Ja, das hab ich bei den Atommodellen gemacht. Im Gegensatz zu meinen Kollegen steige ich nicht mit dem Orbitalmodell gleich ein, sondern fange ganz am Anfang an und schaue dann, was für Fragestellungen die Wissenschaft geleitet haben, um ein neues Modell zu entwickeln und: Was heißt überhaupt Theoriefindung in diesem Kontext? Man kann Atome ja schließlich nicht sehen. Wir haben ganz viel über die Notwendigkeit von neuen Modellen oder dem Wechsel von Modellen gesprochen, also "Warum braucht man gerade jetzt ein neues Modell, warum kann man mit dem alten nicht mehr weiterarbeiten, warum steckt das alte Modell in dem neuen irgendwie noch drin, warum bauen die Modelle aufeinander auf und ersetzen sich nicht?". So etwas habe ich ganz viel gemacht. Das fanden die Schüler auch sehr interessant. Gerade auch im Bereich der Ouantenphysik und dem Welle-Teilchen Dualismus. In dem Kontext war dann interessant wie zwei gegensätzliche Theorie gleichzeitig Bestand haben können und nicht eine von beiden falsch ist. Mir ist auch wichtig, dass die Schüler erkennen, dass ein Modell nicht die Realität beschreiben muss, sondern nur eine Theorie stützen soll. Die Schüler benutzen da ganz viel das Wort "brauchbar". Das finde ich ganz passend dafür.

60

70

80

90

Explizite Diskussion der Funktion und dem Nutzen von Atommodellen und deren Entwicklung. Theoriebildung.

Inhalt von historischen Quellen wird in Form von Anekdoten verarbeitet.

Ich nutze solche Fortbildungen wie deine dann oft eher für mich. Ich lasse die Schüler dann nicht die ganzen historischen Quellen aufarbeiten. Aber es bringt mir den Vorteil, dass ich wieder etwas dazu gelernt habe. In deinem Fall jetzt über diesen Streit und das Hin-und-Her, die Briefe an seine Eltern,... Das kann ich dann immer in Form von Anekdoten einbringen. Dann müssen die Schüler nicht den ganzen Text lesen, aber wissen trotzdem danach, was Wissenschaft eigentlich bedeutet aus einer bestimmten Perspektive.

Hast du solche Aspekte auch in anderen unterrichtlichen Kontexten verwendet und nicht nur Atomphysik?

Im Bereich von Farben. Da habe ich im Wahlpflichtkurs Goethes Farbenlehre thematisiert. Also: Was heißt eigentlich Farbe?. Aber nur auf einem low level. Ein bisschen Bewegungslehre habe ich in der 8. Klasse nach dem Ansatz von Höttecke gemacht. Aber das mache ich da eigentlich immer. Der Ansatz ist ja auch Schulgeeignet. Da habe ich Material an der Hand, was man mal gerade in einer Schulstunde mal einfließen lassen kann.

Du hattest bei dem Vorinterview von einem Seminarfach "Nature of Science" erzählt. Ist es zur Durchführung gekommen?

100

110

120

130

140

Ja richtig. Das heißt tatsächlich auch so. Das habe ich pro Woche Ich habe da mit Naturwissenschaftlers angefangen, also: wie sehen einzelne Schüler einen Naturwissenschaftler. Das Seminarfach ist ja dazu da um Präsentationstechniken zu lernen, weil sie dann ja auch einen Facharbeit schreiben müssen. Daher wurden dann Referate vergeben, in denen die Schüler sich einzelne Naturwissenschaftler oder eine bedeutende Erfindung heraussuchen sollten. Die Schüler sollten dann gezielt Aspekte recherchieren, die die Person oder den Gegenstand interessant machen. Das hat eher semi-gut geklappt. Die Schüler sind meistens über eine Kurzbiografie nicht drüber hinaus gekommen. Daraufhin habe ich dann immer noch etwas nachgebohrt. Einige Schüler haben das ganz gut geschafft. Die haben dann auch etwas über den gesellschaftlicher Kontext eingebettet und was über die leitenden Umstände des Forschers erzählt. Galilei und Newton waren natürlich dabei. Faraday wurde auch ganz schön dargestellt, weil er ja so eine besondere Lebensgeschichte hat. Die Schülerin, die über ihn referiert hat, hat ganz schön dargestellt, wie er überhaupt zum Forschen gekommen ist. Das fand ich ganz gut. Danach haben die Schüler dann Literaturarbeiten zu einem speziellen Schwerpunkt geschrieben. Wo sie auch ein bisschen auf die Problematiken eingehen sollten, aber da stand eigentlich Bibliotheksrecherche im Vordergrund. Da war ich aber beim Lesen der Arbeiten ein bisschen enttäuscht, weil dann vorrangig wieder biografische Aspekte kamen oder nur eine Übersicht über Forschungsschwerpunkte, aber halt nicht ein Detail mal beleuchtet. Für die Facharbeit ist angedacht, dass sie dann von mir einen Forschungsschwerpunkt bekommen und einen Rahmen von mir bekommen. Da kann ich mir vorstellen, dass sie dann über eine Kontroverse oder so schreiben oder Parallelentwicklungen, wie z.B. beim Fernrohr. Ich habe auch Material für das Zählrohr zusammengestellt, aber irgendwie wollen die Schüler das nicht so gerne und die sollen das ja schließlich selbst finden.

Arbeit mit den Schülern zu NoS ist schwierig. Viele SuS begreifen das eher als Biografiearbeit á la wikipedia.

Methoden stehen im Vordergrund.

Das GMZ wurde von den Schülern nicht gewählt.

Wieviele Schüler sind in deinem Seminarfach?

Leider 24, aber in den anderen Seminarfächern sind auch so viele, also ab 20. Im Seminarfach "China" sind nur 20 Schüler, weil das wegen den Einreisebedingungen ja auch passen muss. Ich bin ein bisschen enttäuscht, weil alle, die nicht in das China-Seminarfach gekommen sind, jetzt bei mir sind. Philosophische Sachen, die ich eigentlich vorgehabt hätte, kann ich jetzt nicht machen, weil die meisten in dem Kurs das jetzt nicht interessiert. Denen reicht meistens ein Name, ein Geburts- und Todesdatum und wichtige Errungenschaften, wie bei wikipedia. Mehr wollen die nicht wissen. Das sind so typische 'Abdecker'. Schüler wählen das Seminarfach ja auch in der Regel nach der Seminarfahrt aus. Ich fahre mit denen nach München ins Deutsche Museum, aber natürlich wollten die meisten lieber nach China.

Viele SuS sind Abdecker.

150

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist dir noch am deutlichsten im Gedächtnis?

Nachbau und er YouTube Film dazu. Ouellenmaterial.

160

170

180

Ganz besonders im Gedächtnis ist mir noch die Bauweise, über die du erzählt hast und zu dem du den Film gezeigt hast. Dann aber auch noch das Material, was du uns gegeben hast. Ich habe das bei uns in der Schule auf der Fachkonferenz dann nochmal vorgestellt und das Material für die anderen verteilt. Diese Originalquellen finde ich da besonders toll, also die Briefe. Meine Schüler finden das leider irgendwie nicht so gut und ich weiß auch nicht, wie ich die dazu bringen kann. Ich persönlich finde das immer spannend, wenn man mal so einen Originaltext lesen kann und dann feststellt, dass die Personen ganz ,normal' waren. Der hatte auch einen Vater und eine Mutter und hat sich mit denen ausgetauscht, genauso wie ich meine Mutter am Wochenende mal anrufe. Müller hat dann Briefe geschrieben. Obwohl das ja jetzt schon nicht mehr unsere Generation ist, hat sich in dem Punkt ja nicht viel verändert. Das bringt dann so Normalität in eine Geschichte über die ganzen klugen Köpfe und Genies. Wenn man sieht, dass hinter diesen Geschichte auch noch ein normaler Mensch steckt, der nicht nur im Labor war, sondern auch ein Privatleben hatte, finde ich das immer spannend.

Aber das mit Geiger und Müller wollte ich in dem Physikkurs in der Oberstufe mal machen dann. Die haben eine große Phobie gegen Rechnen und Theorie und sind dann immer froh, wenn es mal um etwas anderes geht. Die finden auch immer gut, wenn ich mit denen diese Kurzfilme "Meilensteine der Naturwissenschaft und Technik" gucke. Die finde ich auch klasse. Aber wenn ich die Schüler danach frage, was in dem Film passiert ist, erzählen die alles drum herum, aber nicht das fachliche. Da haben die so einen Tunnelblick.

Hast du denn versucht dich nach meiner Fortbildung erneut für eine wissenschaftshistorische oder Nature of Science Fortbildung anzumelden?

Nein, hab ich nicht, aber ich hatte auch keine Zeit. Aktuell habe ich aber auch nichts im Fortbildungsangebot hier in der Gegend dazu gesehen. Meistens macht uns unser Fachobmann auch auf Fortbildungen aufmerksam.

Nein, aber auch kein entsprechendes Angebot wahrgenommen.

Läge denn der Fokus mehr auf Wissenschaftsgeschichte oder mehr auf Nature of Science?

(Überlegt) Das ist themenabhängig. Für deine Fortbildung habe ich mich angemeldet, weil ich wusste, dass ich noch nie Radioaktivität unterrichtet habe und ich mich dazu fortbilden wollte. Zweitrangig war dann, ob ich das in der Fortbildung Gelernte auch meinen Schülern vermitteln kann.

Themenabhängig, beruht auf eigenen Interessen, Anwendung in der Schule ist zweitrangig.

9. Herr Maxwell aus Gruppe B

9.1. Prä-Interview

0. Wurden sie schon mal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Nein.

Ist Ihnen die Rolle klar, die sie jetzt einnehmen sollen?

10

Nicht wirklich (lacht).

Einfach aus der Rolle des Lehrers heraus antworten. Also gezielt diese Rolle einnehmen.

1. Haben sie generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischen Unterricht oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

Nein.

20

Wieso nicht?

(lacht) Was ist denn jetzt genau damit gemeint? Historische Inhalte? Doch, das mache ich gerne. Aristoteles, Galilei und so. Ich erzähle da viel über die, also wie die damals auf ihre Dinge gekommen sind. "Heureka" in der Badewanne oder so.

In welchen Themenbereichen kommt das so vor?

30

Elektrizitätslehre. Da hole ich mir dann auch immer Oersted und Faraday. Ich versuche immer die Leute mit einzubinden, die es entdeckt haben und auch wie sie es entdeckt haben.

, Name dropping'

Woher kam der Input dafür?

Kann sein, dass das mal im Studium war. Aber ich finde das eigentlich normal, dass man sowas einbaut.

Studium, Eigenantrieb

Was haben sie studiert?

40

Ich habe technische Informatik an der Fachhochschule studiert und dann bin ich lange Ingenieur gewesen und habe dann hier in Flensburg ein Aufbaustudium gemacht. Elektrotechnik und Physik.

Kamen solche Inhalte denn auch im Referendariat vor oder anderen Fortbildungen?

Nicht, dass ich wüsste.

Also kam das Interesse eher aus eigenem Antrieb?

Ja, ich denke.

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel, indem dargestellt wurde, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten. Woher bekommen sie ihre Ideen und Anregungen?

(Überlegt) Natürlich Internet. Das ist die erste Quelle. Schul- und Lehrbücher hab ich auch viele. Aber die benutze ich weniger.

60

Wie muss ich mir das vorstellen mit dem Internet? Einfach googeln?

Ja genau, Google.

Benutzen sie auch fachdidaktische Zeitschriften?

MNU habe ich, aber da komm ich auch kaum zum Lesen.

Wie sieht das mit Fortbildungen aus?

Internet, Schul- und Lehrbücher, selten Zeitschriften, viel Fortbildungen.

70

Fortbildungen besuche ich sehr gerne. Deswegen bin ich ganz gespannt, was bei dieser hier passiert. Aber man kann ja auch nicht unendlich viele Fortbildungen machen. Man muss dann immer seinen Unterricht umlegen. Das ist dann schonmal Stress. In den Ferien wird ja nichts angeboten (lacht).

Setzen sie die Anregungen, die sie in Fortbildungen bekommen, gleich um oder müssen die erst noch ein bisschen gären?

80

Wenn man das selber gut findet, baut man das gleich in den Unterricht ein. Wenn man das nicht gut findet, dann nicht.

3. Spielen historische Inhalte bei der Unterrichtsvorbereitung gezielt eine Rolle?

Gezielt eher weniger. Manchmal schon. Ich denke mir dann ein paar kleine Geschichten aus. Da hat Oersted z.B. mal seinen Schreibtisch nicht aufgeräumt und eine Magnetnadel ist zufällig in der Nähe eines stromdurchflossenen Drahtes. Das erzählt man dann mal so. Aber das würde ich auch nicht in eine Unterrichtsvorbereitung mit reinschreiben oder so. Gezielt danach suchen tue ich aber nicht. Nur wenn ich es parat habe.

Nein, nur kleine Anekdoten ohne gezielte Vorbereitung.

90

Wie sieht das im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik aus?

Da haben ich fast noch gar nichts gemacht. Als Fukushima war, habe ich mal zwei Stunden gemacht, aber keine komplette Einheit.

Keine Gelegenheit, nur kurz bei Fukushima.

4. Kam denn das Geiger-Müller Zählrohr schon in dem Unterricht vor?

100

Nein. (lacht)

Kam nicht vor.

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht oder ein alternativer Inhalt für den Physikunterricht. Was verbindest du mit diesem Begriff?

110

(überlegt) Das soll ich mir jetzt was zu einfallen lassen? Die Wesensart der Naturwissenschaften... Der Begriff ist mir gar nicht geläufig. Spielt ja vermutlich auf die Phänomene der Physik an... aber da fällt mir nichts zu ein.

Keine konkreten Vorstellungen.

6. Wie würden sie ihr persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Die Fortbildung muss für mich passend sein. Also ich würde schon sagen, dass ich alle Fortbildungen mitnehme, die ich kriegen kann. Pro Schuljahr sind das etwa 8.

Viel.

Gibt es denn genug Angebot oder zu wenig oder zu viel Auswahl an Themen?

Das Angebot ist nicht genug würde ich sagen. Mir fehlt der Erfahrungsaustausch zwischen den Kollegen. Man ist ja eher ein Einzelkämpfer in der Schule, was ich so aus meiner beruflichen Erfahrung heraus gar nicht verstehen kann, weil ich immer ein Team-Arbeiter gewesen bin. In der Beziehung passiert gar nichts. Müsste ja auch nicht eine Fortbildung sein, sondern eher so ein Workshop. Vom IQSH wird so etwas ja auch gar nicht aufgenommen. Sonst ist da wenig. Aber in der IT ist das ja sogar noch schlechter bestellt, als jetzt in Physik oder Elektrotechnik.

es fehlt Erfahrungsaustausch mit Kollegen und Teamarbeit.

130

Gibt es denn auch Angebote hier in der Region zu wissenschaftsgeschichtlichen Themen?

Ist mir nicht bekannt. Aber ich würde mich bei so etwas anmelden.

9.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Nein. Die passenden Klassen hatte ich gar nicht. Physik habe ich bisher nur in der Berufsfachschule unterrichtet und die haben ja nur eine 11. Klasse. Da macht man dann ja Mechanik.

Nein, keine passende Klasse.

Planen sie denn, die Inhalte der Fortbildung einzusetzen, wenn es dazu kommt Radioaktivität oder Atomphysik zu unterrichten?

Also wir haben ja nach der Fortbildung noch die Erdnussdosen-Zähler gebaut. Das ging ja mehr oder weniger. Wenn ich irgendwann mal was radioaktives finde, könnte ich mir vorstellen, dass man mit den Schülern so etwas bastelt. Mehr kann ich mir nicht vorstellen. Nein, jedenfalls nicht GMZ-NoS Inhalte.

Und wie sieht das mit den geschichtlichen Inhalten aus?

20

30

50

Auch nicht. Das wäre vom Umfang her zu viel. Höchstens mal etwas messen – und fertig, wenn das gelingen sollte.

Zu viel vom Umfang.

Hatten sie denn trotzdem Gelegenheit in anderen unterrichtlichen Kontexten etwas aus der Fortbildung einzubringen?

Bisher nicht. Nein.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

Nature of Science (lacht). Das hatte auch etwas mit dem Historischen zu tun, oder? Das habe ich auf jeden Fall noch in Erinnerung... dass also auch die historischen Aspekte eine Rolle spielen. Mehr kann ich dazu nicht sagen.

Historische Aspekte

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

Das was man tut – also das mit dem Dosen basteln. Dann noch diese alten Geiger-Müller Zählrohre. Also dass man sie auch mal in der Hand gehabt hat.

Nichts aus der GMZ-NoS Fortbildung.

Hatten sie denn seit der Fortbildung mal versucht sich erneut für eine geschichtliche oder Nature of Science Fortbildung anzumelden?

Nein.

Wenn sie es denn vorhätten, wo läge da der Fokus?

Eher gleichverteilt.

beides gleich.

10. Herr Millikan aus Gruppe B

10.1. Prä-Interview

0. Wurden sie schon mal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?

Nein, noch nicht.

Ist Ihnen die Rolle klar, die sie jetzt einnehmen sollen?

10

30

40

Nein.

Sie sollen einfach spontan antworten aus der Rolle des Lehrers heraus.

1. Haben sie generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischen Unterricht oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

Nein.

20 Wieso nicht?

Ich bin noch nicht so lange dabei und ich bin Seiteneinsteiger. Eine intensive pädagogische Ausbildung habe ich daher nicht bekommen.

Gab es also auch von Seiten des Referendariats keinen Input aus der Richtung?

Nicht in dem Maß, dass man davon sprechen könnte.

Keine Vorerfahrungen, kein Input

Was haben sie studiert?

Physik auf Diplom.

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel darüber, wie Lehrer sich auf Unterricht vorbereiten. Woher bekommen sie ihre Ideen, Anregungen, Materialien, Arbeitsblätter für ihren Unterricht?

Ganz klassisch aus Lehrbüchern. Dann noch Alltagswelt, also was einem da so unter kommt. Auch Kollegen.

Könnten sie das mit der Alltagswelt ein bisschen genauer ausführen?

Im Bereich der Mechanik hat man da ja viele Möglichkeiten. Sei es Fahrräder, Dynamo, Tacho. Solche Sachen.

Also quasi eigene Kreativität angewendet auf Alltagsgegenstände?

Ja genau.

50

Welche methodischen Ansätze wurden im Referendariat propagiert?

Lehrbücher, Kollegen, eigene Ideen.

Da wurde gesagt, dass die Alltagswelt mit in den Unterricht genommen werden soll. Auch dass man da immer die Augen offen hält.

Wie sieht das generell mit fachdidaktischen Zeitschriften aus?

keine FD Zeitschriften

Nein, keine.

Und andere Fortbildungen? Werden dort erlernte Inhalte in den Unterricht mit eingebaut?

Da habe ich bisher noch an keiner teilgenommen, deren Inhalte ich jetzt direkt einbauen konnte. Wohl Ideen und Anregungen, aber ein direktes Umsetzen hat es noch nicht gegeben. Da ich noch nicht so lange dabei bin, habe ich auch noch nicht so viele Fortbildungen mitgemacht.

wenig praxistaugliche Fortbildungen

70

100

3. Spielen historische Inhalte bei der Unterrichtsvorbereitung eine Rolle?

Eher ne kleine Rolle. Zur Einleitung in neue Themen mache ich so etwas schon gerne. So einen Rückblick, wie man dazu kommt. Zwischendrin mache ich auch mal so Einwürfe, aber die Zeit ist auch immer sehr knapp bemessen. Ich kann ja keinen Geschichtsunterricht machen.

Nur Blitzlichter

Wie sieht das im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik aus?

Das habe ich bisher noch nicht unterrichtet.

Keine Gelegenheit.

4. Also haben sie das Geiger-Müller Zählrohr noch nicht in den Unterricht eingebaut?

Nein, konnte ich nicht. Thematisch passt das ja sonst nicht.

Kam nicht vor.

Aber als Physiker kennen sie das Instrument ja wahrscheinlich. Was ist ihnen bei dem Instrument wichtig – ohne es jetzt unterrichtet zu haben?

Es ist relativ einfach und macht es dann für die Schüler auch recht schnell nachvollziehbar. Es gibt die Möglichkeit des Eigenbaus. Das habe ich aber noch nicht gemacht. Daran kann man die Schüler dann motivieren, sich mal mit der Materie zu beschäftigen.

einfaches Prinzip, leicht verständlich, Eigenbau möglich und motivierend.

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik ein aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht oder ein alternativer Inhalt für den Physikunterricht. Was verbindest du mit diesem Begriff?

Ich kenne das Konzept jetzt nicht muss ich gestehen. Von daher kann ich da keine Stellung zu nehmen.

Keine konkreten Vorstellungen. Haben sie denn Assoziationen oder Vorstellungen, wenn es um die Wesensart der Naturwissenschaften geht?

(Überlegt) Für mich ist Naturwissenschaft die Beschreibung der Umwelt in mathematischer Sprache.

110

Bringen sie solche Aspekte auch in ihren Unterricht ein? Oder auch philosophische Inhalte?

Ein Schwerpunkt ist das jetzt nicht.

6. Wie würden sie ihr persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

120

Ich kann nicht sagen, dass ich intensiv dabei bin. Ich bin ja auch noch nicht so lange dabei. Etwa 2 pro Halbjahr bis jetzt. Hängt ja auch immer ein bisschen von dem Angebot ab, ob das jetzt in Zukunft mehr oder weniger wird.

2 pro Halbjahr bisher. interessensgesteuerte Auswahl an Fortbildungen.

Gibt es denn genug Angebot oder zu wenig oder zu viel Auswahl?

Es ist schwierig. Man beschäftigt sich ja auch selber mal mit irgendwelchen Themen und wenn dann dazu ne Fortbildung da ist, passt das natürlich ganz gut. Ist so eine Fortbildung jetzt zu einem anderen Thema, geht man dann da nicht hin, auch wenn es eine gute Fortbildung ist. Zeitlich muss das ja auch passen.

130

Gibt es denn auch Angebote hier in der Region zu wissenschaftsgeschichtlichen Themen?

Das weiß ich nicht. Habe ich auch noch nicht nach gesucht. Wäre schon ein großer Zufall gewesen, wenn mir so etwas über den Weg gelaufen wäre.

Besteht denn generell Interesse an solchen Themen?

140

Jein, für mich selbst ja, aber ich weiß nicht, ob ich das dann auch in den Unterricht einbauen würde, bzw. noch mehr als bisher schon.

10.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Nein.

Planen sie denn die Inhalte von der Fortbildung im Unterricht einzusetzen?

Die Inhalte so direkt nicht, aber den historischen Bezug werde ich intensiver einbauen. Konkrete Planungen habe ich da nicht, aber das hat mich selbst so ein bisschen an geschuppst mich da mehr einzulesen. Ich find es sehr interessant auch mal solche neuen Aspekte kennenzulernen.

Nein, nur vereinzelte hist. Bezüge einbauen.

Haben sie sich denn irgendwo anders eingelesen diesbezüglich?

Ja, ich habe so ein paar alte Sachen über Hahn und Weizäcker angeschaut, aber nicht intensiv.

20

30

Hatten sie trotzdem Gelegenheit die Fortbildungsinhalte in anderen unterrichtlichen Kontexten einzubauen?

Nein, in anderen Unterricht passt das ja nicht rein.

Nein.

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

(überlegt) Das wäre ja die Natur der Wissenschaft. Es geht nicht nur um Wissen selbst, sondern auch wie man mit dem Wissen umgeht in der Gesellschaft. Das ganze Thema ist ja sehr weitläufig. Das kann man mit wenig Worten gar nicht fassen. "Umgang mit Wissen in der Gesellschaft."

Haben sie solche Aspekte denn in anderen unterrichtlichen Kontexten thematisiert?

Nein, wegen Zeitdruck.

Wieso nicht?

40

Stress (lacht). Da fehlt die Zeit zur Vorbereitung. Man kann da ja nicht irgendwas hinklatschen.

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

Die historischen Dokumente und die Herstellung des Zählrohrs, also den Nachbau und die Geschichte darüber. Nature of Science liegt mir da nicht ganz so am Herzen muss ich gestehen.

Quellenmaterial, Nachbauprozess.

50

Haben sie denn seit dem nochmal versucht sich für eine wissenschaftshistorische Fortbildung anzumelden?

Nein, aber das liegt auch wieder am Zeitfaktor.

Nein.

Wenn zeit dafür wäre, läge da der Fokus mehr auf Wissenschaftsgeschichte oder Nature of Science?

Eher Wissenschaftsgeschichte.

Wissenschaftsgeschichte.

11. Herr Elster aus Gruppe A

11.1. Prä-Interview

0. Wurdest du im Rahmen einer fachdidaktischer Studie interviewt.

Bisher noch nicht, nein.

Was stellst du dir darunter vor?

Dass du ne Frage stellst und ich sie beantworte (lacht).

... aus deiner Rolle des Lehrers. Das wäre deine Aufgabe.

1. Hast du generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischem Unterrichtsverfahren oder historisch orientierten Vermittlungsansätzen?

Nein, meine Bachelorarbeit war eher reine Recherche. Da ging es nicht um die Umsetzung dieser historischen Analyse.

20 Und sonst?

30

40

Ja, ich bring das ein in meinem Unterricht, z.B. in Thermodynamik. Da haben wir jetzt gerade den Sterling Motor. Da erzähle ich den Schülern, dass die Entwicklung etwas mit der industriellen Revolution zu tun hat.... dass es die Dampfmaschine gab... dass Sterling seinen Motor erfunden hat, weil denen damals bei der Dampfmaschine der Kessel explodiert ist. Ich versuche da immer ein paar Daten reinzubringen. Damit die dafür eine Perspektive kriegen.

Ja, Historischer Kontext

Ist das der einzige Aspekt?

Ja, das mache ich meistens immer am Anfang des Unterrichts.

Also nur im Bereich Thermodynamik bisher. Wir war das im Studium?

Ja da haben ich auch schon Erfahrungen gesammelt, z.B. im historischen Praktikum. Im Gedächtnis geblieben ist mir das die Coulomb Waage. Man kennt die Theorie und wenn man das Ding vor sich stehen hat, sieht das auf einmal alles ganz anders aus. Vorerfahrung im Studium Unterschied zw. Experiment in Theorie und Praxis

Würdest du so was auch mal im Unterricht machen?

Da habe ich so noch nicht drüber nachgedacht. Bisher denk ich da noch nicht so weitläufig. Ich finde es nur wichtig ab und zu geschichtliche Zusammenhänge einzubringen. Ich habe genug zu tun, mit dem was ich jetzt mache. Bisher nicht darüber nachgedacht

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel über eine Studie zum Vorbereitungsverhalten von Lehrern. Woher bekommst du dein Material oder deine Ideen, Anregungen für den Unterricht?

Ich versuche halt meistens mit irgendeiner Idee zu starten. Da fällt mir meistens etwas ein. Ich versuche so viel wie möglich Freihandversuche zu machen.

Aber woher kommt der Input dafür?

Das ist im Moment die Erwartungshaltung der Fachleiter im Referendariat. Die wollen ja etwas Spezielles sehen. Ansonsten speisen sich diese Ideen aus dem was ich an der Uni gelernt habe und aus meiner Allgemeinbildung. Ich besitze ja schon Wissen über geschichtliche Vorgänge, sonst könnte ich das ja gar nicht in den Unterricht einbauen. Ich weiß etwas über die industrielle Revolution, weil ich das im Englisch-Studium mitbekommen habe. Das kommt ja aus England. Das ist wichtig in diesem Zusammenhang. Deswegen bringe ich das im Unterricht ein.

Studienseminar, Studium, eigene Interessen.

Welche Rolle spielen Schulbücher und Fachzeitschriften in dem Kontext der Unterrichtsvorbereitung?

Schulbücher sind ja der geheime Lehrplan. Die sind ja schon so gemacht, dass man in jeder Doppelstunde eine Doppelseite, z.B. aus dem Dorn Bader machen kann. Das interne Schulcurriculum hat da die gleiche Progression, wie das Buch.

Schulbücher als Lehrplannahe Quelle

Nutzt du es gerade deswegen für die Vorbereitung?

80

60

Ich lasse mich davon inspirieren würde ich sagen. Ich übernehme manche Versuche, aber versuche dann auch viele Freihand- oder Schülerexperimente einzubauen. Ich finde den Dorn-Bader auch nicht gut. Ich finde es gekünstelt und teilweise unglücklich formuliert. Das Buch ist anscheinend so gemacht, als dass man im Unterricht gar nichts anderes machen könnte, als dieses Buch zu nutzen. Es ist ja auch so aufgebaut, dass man es vorlesen könnte und dann eine gute vorgelesene Stunde gemacht hat. Dann stehen da so Sätze drin, wie: "Dort erkennen die Schüler, dass…" und sowas.

Schulbuch eher als Inspiration

- 90 Du hattest ja eben schon die industrielle Revolution erwähnt.
 - 3. Welche Rolle spielen historische Anteile sonst in Bezug auf Unterrichtsvorbereitung? Findet man im Dorn Bader Material dafür oder bekommt man im Studienseminar Anregungen?

Studienseminar eher nicht. Unser Fachleiter konzentriert sich eher auf einfache, aber effektive Versuche zu entwerfen. Sonst hat er kein Interesse an geschichtlichen Zusammenhängen. Im Dorn Bader steht schon drin, wer sich wann mit etwas beschäftigt hat, z.B. beim Sterlingmotor.

Studienseminar nicht Schulbuch wenig

100

Reichen denn Daten und Personennamen aus deiner Perspektive aus?

Nein, eigentlich nicht. Es wird zwar gesagt, warum Sterling den Motor erfunden hat, aber es wird nicht in den größeren Zusammenhang der industriellen Revolution eingeordnet. Das steht da isoliert. Das macht nicht viel Sinn. Damit können die Schüler nichts anfangen. Wenn man dann aber sagt, dass es was mit der industriellen Revolution zu tun hat und dann den Schülern klar machen kann, dass die Gasgesetze halt mehr sind als die Beschreibung des Verhaltens eines Gases, sondern tatsächlich die Grundlage unseres Wohlstandes, ist das eine ganz andere Dimension, denke ich.

Schulbuch reicht nicht aus für größeren hist. Kontext, da zu isoliert.

Viel Potential für die Schüler

Wie sieht das im Kontext von Radioaktivität und Atomphysik aus?

Da kann ich leider nicht so viel zu sagen, weil ich das noch nicht gemacht habe. Im Moment bin ich ein bisschen mit Scheuklappen unterwegs und arbeite von Woche zu Woche und konzentrier mich nur auf das, was vor mir liegt. Da habe ich mich noch nicht freigeschwommen.

Noch nicht unterrichtet.

4. Also hast du das Geiger-Müller Zählrohr bisher auch noch nicht im Unterricht eingebunden.

Nein, aber ich kenne es.

Noch nicht eingesetzt.

Was wäre dir besonders wichtig beim Zählrohr, wenn du es im Unterricht machen würdest?

130

110

120

Was ich ganz interessant finde, ist die Tatsache, dass wir ständig einer natürlichen Radioaktivität ausgesetzt sind. Ich habe mal gelesen, dass man durch das Rauchen von einer Packung Zigaretten, so viel Radioaktivität aufnimmt, wie man unter normalen Umständen nur in einem Monat aufnehmen würde. Das sind Sachen, die ich im Unterricht mal einbringen würde. Diese Sache mit Umwelt und Gesundheit, unsere Lebensumwelt. Ich denke man müsste sich aber auch um den Aufbau und die Funktion des Zählrohrs kümmern, aber das ist dann ja nur eine starke Vereinfachung. Das ist glaube ich auch eine ganz andere Sache, wenn man mit deinem Ansatz dran geht. Aber den lerne ich ja morgen kennen.

Weniger das Instrument im Vordergrund, sondern Messungen damit.

Funktion und Aufbau, aber vereinfacht.

140

5. Nature of Science ist zumindest in der Physikdidaktik aktuell sehr stark diskutierter Inhalt für den Physikunterricht. Was verbindest du als Lehrer mit diesem Begriff?

150

Ich kenne jetzt den Diskurs nicht, aber ich vermute mal, dass es da um die Natur der Naturwissenschaften geht. Also um wissenschaftshistorische Aspekte und wahrscheinlich auch um erkenntnistheoretische Aspekte, aber auch um diskursive Elemente, also: wie verständigen sich Wissenschaftler darüber und wie einigen sie sich auf bestimmte Dinge, denen sie Bedeutung zuschreiben. So was ist ja auch Verhandlungssache.

Wissenschaftshistorische, erkenntnistheoretische Aspekte. Kommunikation unter Wissenschaftlern, tentativer Charakter von Wissen

Versuchst du so was in deinem Unterricht einzubauen?

160

Nein, noch nicht. Ich finde aber auch, dass die aktuellen Themen das noch nicht hergeben. In den meisten Fällen liegen ja die kontroversen Diskussionen ja schon hinter uns. So etwas würde ich bei Atomphysik oder Quantenmechanik machen. Da kann man wirklich noch drüber nachdenken, wie man das verstehen soll. Ich versuche meinen Schüler auch nahe zu bringen, dass die Thermodynamik die sehr interessante Eigenschaft hat, dass makroskopische Größen durch die statistische Verhaltensweise mikroskopischer Teilchen kohärent erklärt werden kann. Ich freu mich schon darauf, mit denen Entropie zu machen. Durch die Vorgänge der Entropie bekommt die Zeit für uns ja eine Richtung. Das ist etwas, wo die Physik uns sehr grundlegend helfend kann, zu einem tieferen Verständnis unserer Lebensumwelt kommen kann. Das sind Dinge, über die man sonst nicht nachdenkt. Ich hoffe, dass meine Schüler dann irgendwann ein Aha-Erlebnis haben. Das wird aber nicht einfach. Die sind schon von einfachen Volumen-Druck Diagrammen überfordert.

Ja, bei ausgewählten Themen, wie Atomphysik, QM und TD, dann eher wissenschaftsphilosophische Ansätze.

170

Dein Zielsetzung ist also eher eine wissenschafts-philosophische?

Ja.

6. Die letzte Frage würde jetzt nach deinem Fortbildungsverhalten fragen...

Im Moment steht die Aufarbeitung des Unterrichtsstoffs im Vordergrund. Allerdings komme ich auch viel zum Lesen, weil ich viel Bahn fahre. Ich lese auch gerne populärwissenschaftliche Bücher und nicht nur physikalische. Mein Fortbildungsverhalten ist in dem Sinne nicht zielgerichtet. Ich setze mich verschiedenen äußeren Einflüssen aus und nehme mit, was ich gebrauchen kann. Ich lese auch den Spiegel und die Zeit. Die haben auch einen Wissenschaftsteil. Man stößt halt ständig auf Dinge. Um extern angebotene Fortbildungen habe ich mich aber noch nicht gekümmert bisher.

kein zielgerichtetes Fortbildungsverhalten.

keine externen Fortbildungen, nur private eigenständige Fortbildung.

190

11.2. FollowUp-Interview

1. Hattest du im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten? Leider nein.

Planst du denn die Inhalte der Fortbildung in deinem zukünftigen Unterricht über Radioaktivität einzusetzen?

Planungen zur Entstehungsgeschichte.

Nein.

10

Ja, wahrscheinlich werde ich die Entstehungsgeschichte des Zählrohrs ansprechen und den historischen Aspekt reinbringen.

Hattest du trotzdem Gelegenheit Inhalte der Fortbildung in anderen unterrichtlichen Kontexten einzusetzen?

Nein, da sind die Physiklehrer an der Schule und im Studienseminar nicht so von begeistert im Moment – also von historischen Aspekten im Unterricht.

keine weiteren Implementationen anderer Art

20

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

Nicht so viel. Den Begriff kann ich nicht gut einordnen. Das kam in der Fortbildung nicht so gut rüber, was damit gemeint ist. Ich denke aber mal, dass es dabei um den gesamtgesellschaftlichen Zusammenhang in dem Wissenschaft passiert.

Nicht so viel, Unsicherheit, Vermutung: gesamtgesellschaftlicher Kontext von Wissenschaft.

Kannst du das etwas ausführen?

30

Naja, das Wissenschaft nicht das ist, was man in Lehrbüchern sieht – also die zusammengefasste und gekürzte Version von Wissenschaft – sondern das echte Leben mit all dem Drama was dazu gehört, also Irrwege, Umwege, Fehler, langwierigen dynamischen Entstehungsprozessen.

contra Lehrbuch-Science, dynamische und keine linearen Entstehungsprozesse.

Hattest du denn Gelegenheit solche Nature of Science Aspekte in anderen Kontexten zu thematisieren?

leider nein.

40

Leider auch nicht. Ich muss ja immer erst das schulinterne Curriculum schaffen. Dann kann man erst etwas Zusätzliches machen.

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

(überlegt) Die Entstehungsgeschichte und deine Versuche das Zählrohr nachzubauen und was du uns darüber berichtet hast. Das finde ich auch am interessantesten. Eine Röhre, die durch verschiedene Inkarnationen gegangen ist und keineswegs eine knackende Blackbox ist, wie man sie aus dem Unterricht kennt.

Entstehungsgeschichte und Nachbauprozess

50

Hast du seit der Fortbildung versucht dich nochmal für eine wissenschaftshistorische oder Nature of Science Fortbildung anzumelden?

Nein.

Wenn du die Wahl hättest, wo läge da eher der Fokus?

Da müsste ich den Unterschied genauer kennen, aber wenn meine Erklärung vorhin richtig war, dann eher Nature of Science.

Sie war richtig.

Okay (lacht).

12. Herr Kepler aus Gruppe A

12.1. Prä-Interview

0. Wurdest du schon einmal im Rahmen einer fachdidaktischer Studie interviewt ?

Nein.

10 Ist dir klar, was deine Rolle ist, die du jetzt einnehmen sollst oder soll ich das ein bisschen erläutern?

Also ich denke mal, dass das was ich sage in eine statistische Auswertung von ein paar Lehrern ausgewertet wird und dass daraus halt irgendwie analysiert wird, inwiefern man das nutzen kann.

Genau und die Rolle die du einnehmen sollst, ist deine Lehrerrolle.

1. Hast du generell Vorerfahrung mit historisch-genetischem 20 Unterrichtsverfahren oder einem historisch orientierten Vermittlungsansatz im Physikunterricht?

Ich erzähle gern etwas zu den Personen und zu dem historischen Kontext. Ich habe auch mal ein Gemälde analysieren lassen, wo man den geschichtlichen Zusammenhang eines Experiments in diesem Gemälde rausarbeiten sollte. Grundsätzlich habe ich halt mit Herrn Heering schon mal Kontakt gehabt und weiß, was Natur der Naturwissenschaften ist.

Historischer Kontext, eher personenbezogen.

Gemälde, Vakuum Vogel.

30 Welches Gemälde war das?

40

Joseph Wright of Derby. An Experiment on a Bird. Kann man auch in der MNU Zeitschrift nachlesen.

Woher kam so das Interesse oder der Input in diesem historischen Bereich etwas zu machen? Referendariat, Studium,...?

Erst mal bin ich allgemein sehr Kunst-interessiert und auch an anderen Fächern. Die einzigen Fächer, die mich nicht interessieren sind Werte und Normen und Biologie. Deshalb finde ich immer den Ansatz wichtig aus einem Fach mit offenen Blick in andere Fächer zu gehen und nicht umgekehrt herum. Das haben wir an unserer Schule schon, was ich aber prinzipiell nicht so gut finde, besonders in niedrigen Jahrgangsstufen. Ich denke gerade die jüngeren Schüler sind damit überfordert. Das find ich grundsätzlich erst mal. Im Referendariat habe ich eine Teilausbildung Darstellendes Spiel gemacht, was ich auch ganz gerne umsetze. Da suche ich auch immer nach Möglichkeiten.

Starkes interdisziplinäres Interesse

2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es eine Studie darüber, wie Lehrer sich für ihren Unterricht vorbereiten. Deswegen wollte ich in diesem Kontext fragen, woher du deine Materialien und Ideen, Anregungen für den Unterricht bekommst.

Ein paar Sachen sind natürlich solche aus dem Referendariat. Aus Lehrbüchern... zur zeit haben wir Fokus. Davon bin ich nicht sonderlich begeistert, weil man da Schülern auch nichts zum Nachlesen geben kann. Da sind immer viele Experimentieranleitungen drin, wo man aber immer Sachen kaufen muss und das kann man auf die Schnelle nicht. Bei der hohen Stundenzahl muss man halt Kompromisse machen. Ideen nehme ich auch aus solchen Büchern, aber ich bin auch selbst relativ kreativ. Ich bin immer wenig davon begeistert ganz vorgefertigte Sachen zu nehmen, weil ich dafür dann doch zu kreativ bin.

Referendariat, Lehrbücher, eigene Kreativität. vorgefertigte Sachen eher weniger.

Welche Rolle spielen historische Anteile bei Vorbereitung für den Unterricht, die auf Büchern o.ä. basiert und nicht aus deinem persönlichen Interesse heraus entstanden sind? Also suchst du explizit historische Materialien für den Unterricht?

70

80

60

Habe ich bislang eher wenig. Ich habe zum Beispiel diese CD der Uni Oldenburg mit den historischen Experimenten. Die verwende ich auch im Unterricht. Aber wenn ich historisch arbeite, sind das eher Sondersituationen im Unterricht. Das ist nicht so der reguläre Unterricht. Wir haben das mal in der Projektwoche gemacht... den freien Fall in einer szenischen Interpretation und das mit so einem Lesespiel. Es gibt in Büchern manchmal auch Sonderseiten, auch in dem Fokus Buch und zum Thema Radioaktivität. Da habe ich auch mal ein Buch über Marie Curie referieren lassen. Das sind aber weniger diese Natur der Naturwissenschaften Aspekte. Diesen generischen Prozess habe ich noch nicht explizit selbst gemacht. Ich habe zwar auch CDs und so, aber dann ist immer die Frage vom Umfang her, also: was muss ich lesen, damit ich das in einer Stunde umsetzen kann. Sehr häufig sind die Materialien sehr umfangreich und bedürfen eben nicht nur einer Doppelstunde und sind von der Vorbereitung her deutlich zeitintensiver.

CD der Uni OL mit historischen Experimenten. eher Sondersituationen Unterricht, Projektwoche. Sonderseiten im Buch. vom zeitlichen und materiellen Umfang ist die Vermittlung von histor.-generischen Prozessen zu intensiv.

Du hast eben schon Marie Curie erwähnt. Ist der Anteil von historischen Unterrichtsgegenständen im Kontext von Radioaktivität oder Atomphysik gefühlt größer als bei anderen Unterrichtsinhalten, wie z.B. Mechanik oder E-Lehre?

Ja.

Hast du eine Idee, woran das liegen könnte oder ist das auch persönliches Interesse von dir, dass du das stärker einbindest?

100

110

Ich bin ja von Haus aus kein Physiker. Ich habe ja Chemie studiert und bin über das Referendariat in die Physik gekommen. In der Physik fühle ich mich daher experimentell nicht immer so sicher. Ich habe zwar auch mal eine Strahlenschutzausbildung gehabt, die aber jetzt schon mittlerweile abgelaufen ist. In England gibt es ja auch die Tendenzen, dass man immer mehr von den Experimenten weggeht und bei Radioaktivität ist es halt so ... Bei mir ist das wohl eher aus der Not geboren. Ich habe vorher in Emden unterrichtet. Da war das teilweise hanebüchend, wie wenig Material wir hatten. Das hat sich mittlerweile geändert. Bei mir war es aber so, dass ich mir selber Sachen ausdenken musste. Deswegen mache ich da viel historische Bezüge. Man hat ja auch sonst oft gar nicht die ganzen Präparate oder Experimente, die dann ja auch oft ganz lange dauern. Ich denke auch, dass man gerade zu Marie Curie und Radioaktivität im Vergleich zu anderen Bereichen relativ viel Materialien in Filmform oder in Buchform gibt. Über Marie Curie gibt es auch so einen schönen Schülerband, wo man dann natürlich auch noch die Frau in der Wissenschaft mit drin hat. Ich finde immer gut, wenn man damit auch Mädchen anspricht. Deshalb kommt sowas auch da häufiger.

Als Fach-Chemiker fällt es leichter Radioaktivität/ Atomphysik zu unterrichten, als z.B. E-Lehre oder Mechanik.

auf Grund von wenig Experimentiermaterial ist dieser Ansatz entstanden.

viel Film- oder Buchmaterial

Frauen in der Wissenschaft (Curie)

Warum gerade Marie Curie? Nur wegen den vielen Unterrichtsmaterialien oder gibt's auch sonst noch Gründe?

Für mich persönlich ist es wichtig, dass man Mädchen für Naturwissenschaft begeistert. Hier in Oldenburg ist das deutlich schwerer als in Emden. Dafür ist es notwendig, dass man bestimmte Dinge auch mal in der weiblichen Form im Unterricht formuliert, manchmal auch dann eben nur die weibliche Form – zur Überraschung der Jungs dann mal. Das finde ich immer ganz witzig.

4. Wie bindest du generell das Geiger-Müller Zählrohr in den 130 Unterricht ein?

Für die natürliche Radioaktivität. Die messe ich grundsätzlich. Ich habe dann selbst auch ein bisschen versucht, das im darstellendem Spiel zu machen. Das ist noch nicht dokumentiert, weil es noch nicht ganz ausgereift ist. Aber das man so ein Gerät im darstellendem Spiel mal nachstellt.

Nullratenbestimmung

Funktionsweise über darstellendes Spiel.

Wie sieht das aus?

140

Joa, da sind manche [Schüler] halt Atome und haben Kugeln, die sie fallenlassen, wenn sie berührt werden von jemanden. Der Stab, der innen rein reicht ... da stehen auch Leute in Reihe und dann gibt's draußen welche, die Detektoren sind. Die [Schüler] kriegen vorher Regieanweisung, was zu tun ist, wenn was passiert. Dadurch kann man das dann darstellen. Das lässt sich aber leider nicht in unseren Fachräumen durchführen. Das geht am besten in einem Raum, wo man alle Tische zur Seite stellen kann. Die meisten naturwissenschaftlichen Räume haben halt entweder Stufen oder feststehende Tische. Deshalb habe ich das hier noch nicht gemacht. Dafür braucht man Erfahrung im darstellenden Spiel und eine Doppelstunde Zeit und ich hab es bisher in den Klassen hier in

150

Oldenburg eigentlich nicht mehr gemacht, weil es vom Zeitbedarf her zu viel ist.

Was ist die bei dem Instrument vom Vermittlungsaspekt her besonders wichtig?

160

Mir selbst wäre eigentlich schon wichtig, dass Schüler verstehen, wie es funktioniert. Wenn ich dann aber in unser aktuelles G8 Buch reingucken, ist das Geiger-Müller Zählrohr auf ein reines Detektionsgerät reduziert worden, wo eigentlich völlig egal ist, wie das funktioniert. Ich fände es schon schön, wenn man zumindest ansatzweise versteht, was in dem Gerät passiert. Alternativ dazu könnte man natürlich die Nebelkammer nehmen, die auch vom Prinzip her leicht zu erarbeiten wäre. Spielt aber auch keine Rolle mehr, weil man dafür auch keine Zeit mehr hat.

Funktionsweise ist wichtig, aber nicht mehr im Lehrplan aus Zeitgründen.

Also wird quasi das Geiger-Müller Zählrohr als Black-Box betrachtet?

170

Ja. Ich denke, wenn man die Vorgänge behandeln wollte, braucht man mindestens eine Doppelstunde, weil die Multiplikation der Elektronen und so etwas ist natürlich in dem Jahrgang noch nicht vorhanden. Deshalb braucht man halt eine gewisse Zeit dazu.

5. Nature of Science ist ja ein zumindest in der Fachdidaktik stark diskutierter und aktueller Unterrichtsinhalt für die Physik. Was verbindest du persönlich mit dem Begriff.

180

Das man aus historischen Prozessen – wie auch immer sie dokumentiert sind, also historische Material oder auch schon aufgearbeitet durch Didaktiker – den Prozess der Entstehung mit Schülern zusammen erarbeitet. Das sie diesen Prozess für sich selber als Methode lernen und das dann übertragen auf andere neue Prozesse, wo man dann wieder aus Fehlern oder was auch immer zu einem Erkenntnisprozess geführt haben.

Den hist. Prozess der Entstehung von physik. Zusammenhängen erarbeiten ist NoS.

... aus Fehler lernen.

Haben bisher solche Aspekte in deinem Unterricht eine Rolle gespielt?

190

Nur im Bereich von Mechanik. Ich kenne eine Reihe von Elektrizitätssachen, die ich jetzt auch in der aktuellen MNU Zeitschrift gefunden habe. Fand' ich total interessant., allerdings auch sehr zeitaufwendig. Elektrizitätslehre ist nun so ein Bereich, wo ich als ehemaliger Quereinsteiger mich nicht so ran traue. Da fällt mir die Mechanik deutlich leichter und Radioaktivität als Chemiker sowieso. Da sind so die Bereiche, denen ich mich selbst mehr zugewandt fühle. Ich könnte mir durchaus vorstellen, dass man im Optik Bereich sowas auch machen könnte, aber die Optik ist mittlerweile in Jahrgang 5/6. Da weiß ich nicht, inwieweit man schon mit Schülern dieser Jahrgangsstufe das machen kann.

200

Diese Einbindung der Nature of Science Aspekte passiert stundenweise bei dir, wenn ich das jetzt richtig verstanden habe. Warum gerade so und nicht implizit, z.B. in jeder Stunde ein bisschen einstreuen?

Nur im Bereich Mechanik.

Ich kenne es eigentlich nur so, dass es eine kompakte Einheit ist. Man könnte vielleicht sagen, dass an der und der Stelle das entstanden ist, aber alles was ich so an dokumentierten Sachen gesehen habe, sind nur so kontinuierliche Sachen, die in einem Strang für eine Doppelstunde oder vier Stunden konzipiert sind. Das kann man immer so schlecht zerstückeln, zumindest kenne ich es nicht so.

Als kompakte Einheit, weil das Material keine implizite Erarbeitung erlaubt.

210

Was versprichst du dir von diesem Vorgehen?

Vernetztes Denken, Ausblick in andere Fächer, Methodisches Lernen mit ungewohnten Fragestellungen. Wenn ich jetzt die Abiturvorschläge aus Niedersachsen angucke, sind die Physik Abiturklausuren recht traditionell ohne das in einen Kontext zu packen. Kontexte, die ich sehr stark vernachlässigt sehe sind Medizin und Umweltanalytik. Das sind Bereiche wo gerade auch die Oberstufenphysik eine große Rolle spielt. Meines Wissens wird das aber überhaupt nicht genutzt, oder fast nicht. In Chemie sind die Aufgaben mir aber schon viel zu kontextualisiert. Da muss man in Chemie auch mehr Methodik üben. In Physik ist das in der Oberstufe von offizieller Seite nicht gefordert. Medizin fänd' ich auch für Mädchen oder musisch interessierte besonders interessant.

Vernetztes Denken, Interdisziplinarität, Methodisches Lernen mit ungewohnten Fragestellungen.

220

230

6. Wie würdest du dein persönliches Fortbildungsverhalten beschreiben?

Monat habe ich 5 Fortbildungen. Das ist aber außergewöhnlich, weil ich dieses Jahr keinen Oberstufenkurs habe. Da habe ich dann das gemacht, was ich gehört habe oder was mich interessiert. Man muss ja auch nicht immer zu einer Fortbildung gehen um sich fortzubilden. Ich mache relativ viele AGs mit Schülern, wo man dann automatisch sich neue Sachen auch mal angucken muss. Außerdem lese ich drei Fachzeitschriften, mittlerweile auch relativ intensiv. Am Anfang lagen die immer nur da, nachdem ich sie bekommen habe. Die Artikel in der MNU Zeitschrift, Unterricht Chemie und Unterricht Physik, wobei ich die letzten beiden mittlerweile nicht mehr so gut finde. Die MNU ist da schon recht gut. Weil sie auch deutlich aktueller ist und flexibler und sich nicht einem Oberthema unterordnet. Die dritte Zeitschrift ist dann Science in School. Die lese ich halt sehr gerne. Die kennt aber fast keiner, weil auch viele nicht realisieren, dass eine Wissenschaftssprache Englisch ist. Das wird auch von vielen Physik- und besonders Chemiekollegen gemieden. Woran auch immer das liegt. Ich bin es aber als ehemaliger Chemiker gewohnt Englisch zu lesen.

Viele Fortbildungen und Fachzeitschriften

250

240

Gibt es genug oder zu wenig Auswahl an Fortbildungsmöglichkeiten hier im Raum Oldenburg?

Ich finde die Themen, die mich in Physik ansprechen, also z.B. so eine Fortbildung 'Themen des Abiturs'... dadurch das ich nicht so in Oberstufenkursen bin, finde ich es nicht ausreichend. Aber es interessiert mich in diesem Fall auch nicht ganz so. In Chemie finde ich das wichtiger. In der Mittelstufenphysik finde ich es eher ein bisschen dürftig. Also vor allem auch Dinge, die man konkret umsetzen kann und wo man nicht das Gefühl hat total umfangreich was umsetzen zu müssen. Manche wollen ja dann gleich das ganze Halbjahr neu strukturieren. So kleine Module wären da besser, die man ab und zu mal ohne großen Auswand einsetzen kann. Das fehlt so ein bisschen. Die Welten der Didaktik und die der Schule laufen ja in dem Punkt ein bisschen nebeneinander her.

Zu wenig Angebot im Bereich der Mittelstufenphysik, insbesondere konkret umsetzbare Dinge, die im Lehrplan sind. Kleine Module, keine großen Einheiten.

Wie sieht das in Bezug auf wissenschaftsgeschichtliche Themen aus?

260

Ist mir noch nicht über den Weg gelaufen. Also zumindest nicht bewusst. Kann sein, dass etwas angeboten wurde. Ich weiß, dass es an der Uni hier gemacht wird und mittlerweile auch in Flensburg. Das finde ich auch gut. Ich gehe ja auch zu deiner Fortbildung, weil ich es interessant finde.

A - 78

12.2. FollowUp-Interview

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

Als wir die Fortbildung hatten, war ich ja gerade in dem Thema und hatte auch geplant, das Besprochene umzusetzen. Das ist allerdings dabei geblieben, dass ich anhand deines Nachbaus versucht hab verschiedene Materialien für die Schüler zu besorgen, die nun aber hier schön auf dem Schreibtisch liegen und auf einen nächsten Durchgang warten. Ich hatte es aber vor, aber da ist so ein Wettbewerb dazwischen gekommen.

Ja, schon während der Fortbildung

Konstruktion anhand des Nachbau nachvollziehen.

aber nur Planungsphase

Hattest du trotzdem Gelegenheit Fortbildungsinhalte in anderen Kontexten einzubinden?

Nein, eigentlich nicht. Höchstens so die Ideen des historischen Ansatzes. Die trage ich mit mir. Ganz konkret habe ich das aber nicht eingesetzt.

Nein, höchstens die Grundidee von hist. gen. Unterricht.

20

10

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

Das ist die Methode, dass man auch über Fehler von Naturwissenschaftler in der Vergangenheit redet und versucht den Entstehungsprozess von Erkenntnissen nachzuvollziehen. Bei Geiger wäre es insbesondere die Entwicklung, die sein Gerät durchlaufen hat. Da sind mir besonders die historischen Texte in Erinnerung geblieben, die du recherchiert hast. Die sind jetzt an entsprechender Stelle in meinen Unterlagen abgeheftet. Das ist bei mir alles modular aufgebaut. Im nächsten Schuljahr kann ich dann wieder darauf zurückgreifen und das dann konkret umsetzen.

Nachvollzug des Entstehungsprozesses von Erkenntnis

30

Hast du solche Nature of Science Aspekte auch in anderen unterrichtlichen Kontexten thematisiert?

Das Schuljahr war zu kurz dafür. Ich wollte das eigentlich machen, aber dafür braucht man ja immer ein bisschen mehr Zeit für. Da gingen andere Dinge vor.

Nein, Schuljahr zu kurz.

40

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

Also bildlich wirklich die Quellen, also die Briefe. Das war für mich etwas ganz neues. Und dann natürlich auch dein kleines Gerät und die ganzen Vorstufen davon. Den Film auf YouTube habe ich mir danach auch nochmal angeschaut. Das Handwerkliche fand ich besonders eindrucksvoll, aber das könnte man ja höchstens in einem Wahlpflichtkurs vielleicht mal machen. Bei uns an der Schule wäre das aber auch nicht möglich.

Originalquellen, YouTube Film über Nachbau.

50

Hast du dich seit meiner Fortbildung erneut versucht für eine weitere wissenschaftshistorische oder Nature of Science Fortbildung anzumelden?

Nein.

Wenn du es gemacht hättest, läge da der Fokus mehr auf Wissenschaftsgeschichte oder mehr auf Nature of Science?

Nature of Science. NoS

13. Leitfaden für das Prä-Interview

Jeweils erster Buchstabe	Die letzten zwei Ziffern des	M ännlich /	Ol denburg /	
des Vornamens der Mutter	Eintrittsjahres in den Schuldienst	W eiblich	Fl ensburg	l
und des Vaters	(ab Ref.)			l
				l
				l
				l

Über Aufzeichnung informieren Störungen? (Fernseher, Radio, andere Leute im Raum,...)

- 0. Wurden sie schon einmal im Rahmen einer fachdidaktischen Studie interviewt?
 - a. Wenn nein: Die Rolle des Befragten erläutern (Lehrerposition einnehmen)
 - b. Erwartungen an den Befragten erläutern
- 1. Haben sie generell Vorerfahrungen mit historisch-genetischem Unterrichtsverfahren oder einem historisch orientierten Vermittlungsansatz im Physikunterricht? (**Themenbereich I**)
 - a. Wenn ja: Welche? Nachfragen: Studium (wie sah das aus?), Ref., Fortbildungen, autodidaktisch.
 - b. Wenn nein: Wieso nicht?
- 2. In einer der letzten MNU Ausgaben gab es einen Artikel über eine Studie zum Vorbereitungsverhalten von Lehrern....Woher bekommen sie ihr Material, ihre Ideen, Anregungen,... für ihren Unterricht?
 Nachfragen: Studium, Fortbildungen, Zeitschriften, Schulbücher, Fachbücher,...
- 3. Welche Rolle spielen historische Anteile dabei?
 - a. Wenn ja: Woher bekommen sie dafür Material?
 - b. ... und im Kontext von Radioaktivität bzw. Atomphysik?
- 4. Wie binden sie das Geiger-Müller Zählrohr allgemein in den Unterricht ein? (offene Diskussion mit Nachfragen, dient als Puffer zw. Themenbereich I und II)
 - a. Was ist ihnen bei diesem Instrument wichtig?
 - b. Wie wird das vermittelt?
- 5. ,Nature of Science' ist ein aktuell stark diskutierter und auch praktizierter Unterrichtsinhalt der Physikdidaktik. Was verbinden Sie mit dem Begriff NoS. (**Themenbereich II**)
 - a. Wenn ja: Spielen Aspekte von Nature of Science in ihrem Unterricht eine Rolle?
 - b. Wie binden sie Aspekte ein? Stundenweise oder implizit?
 - c. Warum gerade so und nicht anders herum?
 - d. Was versprechen sie sich davon?
 - i. Wenn ja: Mit welcher Zielsetzung?
- 6. Wie würden sie ihr persönliches "Fortbildungsverhalten" beschreiben?
 - a. Gibt es genug Angebot oder zu viel Auswahl?
 - b. ... und in Bezug auf wissenschaftsgeschichtliche Themen?

14. Leitfaden für das FollowUp-Interview

Jeweils erster Buchstabe	Die letzten zwei Ziffern des	M ännlich /	Ol denburg /
des Vornamens der Mutter	Eintrittsjahres in den Schuldienst	W eiblich	Fl ensburg
und des Vaters	(ab Ref.)		

⁻ Telefon-Interview -

1. Hatten sie im letzten halben Jahr die Gelegenheit das Thema Radioaktivität oder Atomphysik in der Schule zu unterrichten?

- a. wenn ja: welche Klassenstufe? wie war der grobe Ablauf der Unterrichtseinheit?
- b. Wenn ja: hatten sie Gelegenheit Inhalte aus der Fortbildung zu verwenden?
 - a. Wenn ja: welche genau? Wie sah das konkret in der Umsetzung aus?
 - b. Wenn ja: wie war ihre Wahrnehmung bzgl. der Resonanz der Schüler?
- c. Wenn nein: Planen sie, die Inhalte einzusetzen?
 - a. Wenn ja: Was genau?
 - b. Wenn nein: warum nicht?
- d. Wenn nein: Hatten sie trotzdem Gelegenheit Fortbildungsinhalte in einem anderen Kontext einzubinden?

2. Was verbinden sie jetzt nach der Fortbildung mit dem Begriff Nature of Science?

- a. Haben sie solche Aspekte im Kontext Radioaktivität/Atomphysik im Unterricht thematisiert?
- b. Haben sie solche Aspekte im letzten halben Jahr in <u>anderen</u> unterrichtlichen Kontexten, wie E-Lehre, Mechanik oder Optik thematisiert?
 - a. Wenn ja: warum? Was genau?
 - b. wenn nein: Wieso nicht?

3. Welcher Aspekt der Fortbildung ist ihnen am deutlichsten im Gedächtnis geblieben?

- a. Haben sie sich sei dem erneut versucht, sich zu einer wissenschaftshistorischen oder NOS-Fortbildung anzumelden?
- b. Läge der Fokus mehr auf WG oder NOS? oder beides nicht?
 - i. Wenn beides nicht: was wäre dann ein wünschenswertes Fortbildungsthema?

B. Rohdaten und Analyse zum Post-Fragebogen

Evaluationsfragebogen	B - 2
Datenmatrix für den Post-Fragebogen	B - 3
Grafische Darstellung der Datenmatrix	B - 4

Evaluationsfragebogen zur Fortbildung

Jeweils erster Buchstabe	Die letzten zwei Ziffern des	M ännlich /	Fortbildungsort:
des Vornamens der Mutter	Eintrittsjahres in den Schuldienst	W eiblich	Ol denburg /
und des Vaters	(ab Ref.)		Flensburg

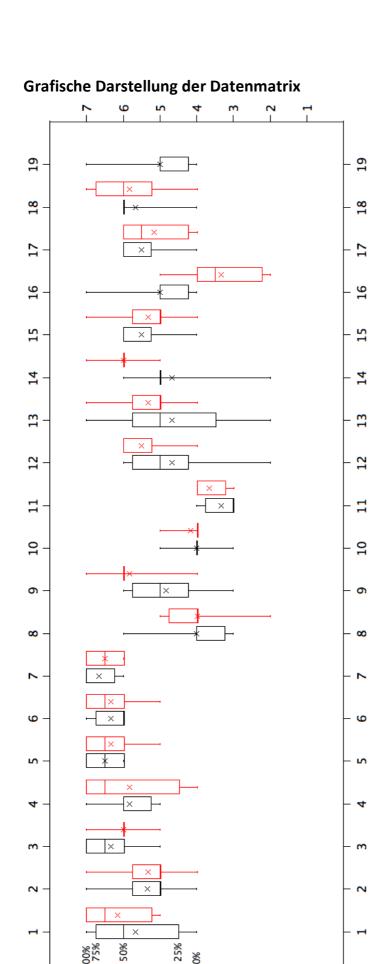
Bitte schatzen sie annand der Fragen die Fortbildung ein.							
	1= tri	fft ni	icht :	zu – 1	trifft	völl	ig zu :
	1	2	3	4	5	6	7
1. Der inhaltliche Aufbau der Fortbildung ist logisch/nachvollziehbar.							
2. Die Bedeutung/Nutzen der behandelten Themen wird vermittelt.							
3. Die behandelten Themen wurden kritisch/von verschiedenen							
Seiten beleuchtet.							
4. Die Fortbildung wurde in interessanter Form gehalten.							
5. Der Referent gab auf Beiträge der Teilnehmer hilfreiches Feedback.							
6. Die Diskussionen werden vom Referenten gut geleitet.							
7. Es gab genügend Zeit für Diskussionen.		Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
8. Der Anteil an Input-Phasen war 1= viel zu niedrig, 4= genau richtig oder 7= viel zu hoch.							
9. Ich habe mich schon vor dem Kurs sehr für wissenschafts-							
historische Themen interessiert.							
10. Mein Vorwissen war 1= zu gering, um der Fortbildung folgen zu können, 4= genau richtig oder 7= deckungsgleich mit den Inhalten,	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
Besuch war überflüssig.							
11. Die Anforderungen waren 1= viel zu niedrig, 4= genau richtig							
oder 7= viel zu hoch.							
12. Ich habe durch die Teilnahme an der Fortbildung sehr viel gelernt.							
13. Ich verfüge über ein grundlegenderes Verständnis über die							
vermittelten Inhalte als vor dem Besuch der Fortbildung.							
14. Ich möchte die in der Fortbildung erarbeiteten Inhalte und Materialien für meinen Unterricht übernehmen.	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш
15. Die Fortbildung hat mein Interesse am Unterrichtsgegenstand	П	П	$\overline{\Box}$	П	П	П	
Nature of Science positiv beeinflusst.							
16. Mein Verständnis darüber, was mit Nature of Science im							
fachdidaktischen Kontext gemeint ist, hat sich gewandelt.	_	_	_	_			_
17. Das Wissen über <i>Nature of Science</i> bereichert meinen Unterricht.							
18. Das Wissen über geschichtliche Hintergründe bereichert meinen							
Unterricht. 19. Im Nachhinein würde ich Aspekte von meinem bisherigen							
Unterricht mit <i>Nature of Science</i> identifizieren.	Ш	Ш	Ш	Ш	ш	ш	Ш
Dinge, die sie bzgl. der Fortbildung noch unbedingt los werden wollen (Lob, Ta	del, V	/erb	esse	rung	gs-		
vorschläge,)							

Datenmatrix für den Post-Fragebogen

		G	rup	ре	A			G	rup	ре	В	
#	1	2	3	4	2	9	7	8	6	10	11	12
Item Pseudonym	Herr Dalton	Herr Elster	Frau Bassi	Herr Franklin	Frau Herschel	Herr Kepler	Frau Noether	Herr Newton	Herr Geitel	Herr Millikan	Herr Maxwell	Herr Ohm
1	5	2	7	7	7	9	7	7	9	4	4	9
7	5	2	7	2	4	9	7	2	2	2	4	9
8	2	9	7	9	9	9	7	7	9	9	2	7
4	4	9	7	7	4	7	9	7	2	9	2	9
2	9	9	7	7	2	7	9	9	9	7	7	7
9	2	7	7	7	9	9	9	7	9	9	9	7
	9	9	7	7	9	7	7	7	9	9	7	7
6 8	4	2	4	2	2	. 4	4	4	3	3	9	4
10	4 4	9	6 4	6 4	6 4	7 4	5 4	3 4	5 3	4 4	9	6 4
11	1 4	. 4	1 4	1 3	1	4	1 4	1 3	4	3	3	1 3
12	9	9	4	9	2	9	9	2	9	2	2	4
13	7	9	4	5	2	2	2	2	7	3	9	2
14	2	9	7	9	9	9	2	2	2	2	2	9
15	2	7	9	2	4	2	9	4	9	2	9	9
16	7	2	7	7	4	8	9	2	2	7	7	4
17	9	4	9	9	7	2	9	4	9	2	9	9
18	9	2	7	9	4	2	9	4	9	9	9	9
19*							2	4	2	4	2	7

Median_1-6	6,5	2	9	6,5	6,5	6,5	6,5	4	9	4	4	9	5	9	2	3,5	2,5	9	
Median_7-12	9	2	6,5	9	6,5	9	7	4	2	4	3	2	5	5	9	2	9	9	2
Median_ges	9	2	9	9	9'2	9	7	4	9	4	3,5	5'5	2	2'2	2'2	7	9	9	

hinzugefügt. Viele der Probanden haben in den Prä-Interviews Aspekte von Nature of Science indirekt beschrieben, diese aber nicht als solche identifiziert. Daher sollte spontan erhoben werden, ob ihnen dieser Umstand nach der Fortbildung bewusst * Frage 19 wurde akut auf Grund der Ergebnisse der Inhaltsanalyse der Prä-Interviews der Befragten der Gruppe B geworden ist.



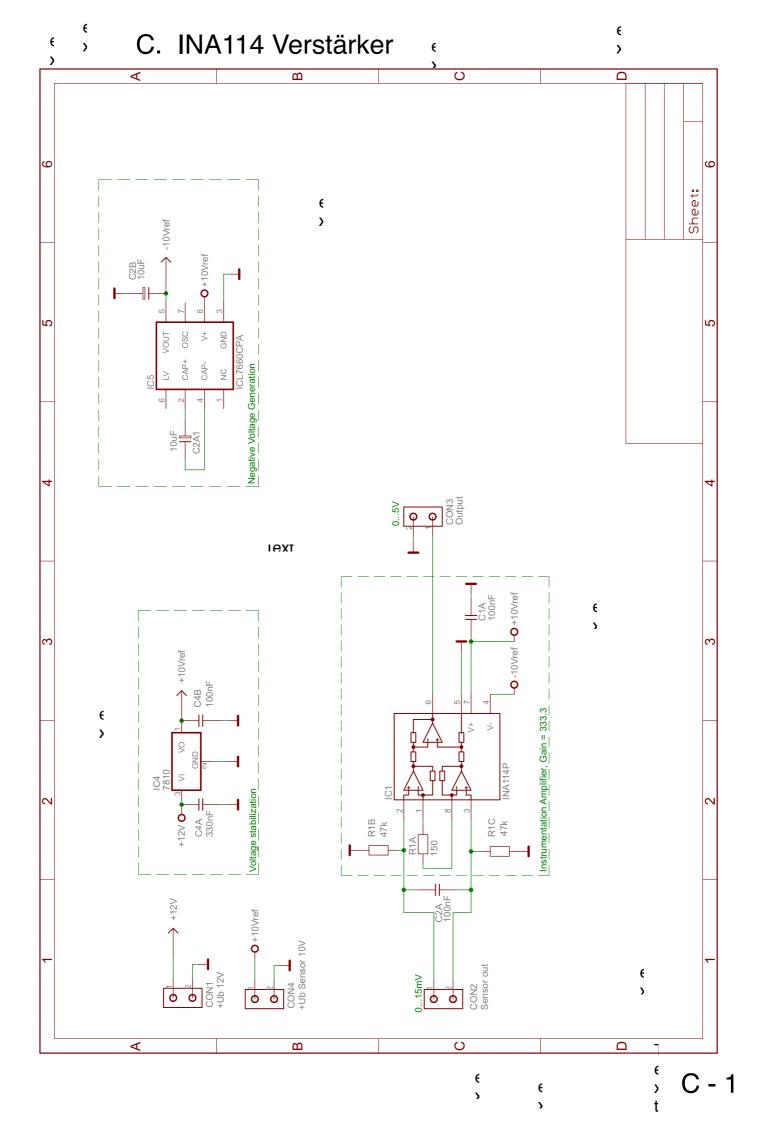
%

Skalenpunkte ~ 4 w

2



n = je 6



D. Redigiertes Quellenmaterial für den Unterricht

- Briefwechsel Vincke-Jorpes
- Meine Geschichte, Lebenslauf von Walter Müller
- Auszüge aus Müllers Briefen an seine Eltern
- Die erste Publikation zum Zählrohr: Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten.

Abschrift

Freie und Hansestadt Hamburg 1962 Hamburg 20, 25. Aug.

Universitäts-Krankenhaus Eppendorf

Martinistraße 52

Kolloidbiologisches Forschungslaboratorium der Universität. Leiter: Prof. Dr. E. Vincke

Herrn
Professor Dr. J. E. Jorpes
Keminska Institution II
Karolinska Institutet
Stockholm

Lieber Herr Kollege Jorpes,

[...]

Nun möchte ich Ihnen noch eine Angelegenheit vortragen, die Sie bezw. Ihre Herren Kollegen von der Physik als Mitglieder des Nobelpreis-Komitées vielleicht interessieren dürfte: Ich füge Ihnen hier in Abschrift einen Briefwechsel bei, den ein alter Freund von mir, Herr Dr. Eduard Wildhagen, Hamburg, mit Herrn Dr. Walter Müller führte, welcher 1928 als Doktorand bei Professor Geiger in Kiel die Apparatur erfand, die wir heute als Geiger-Müller-Zählrohr (oder auch nur als Geigerzähler) kennen. Eine Photokopie der 1. Veröffentlichung der beiden Gelehrten in den Naturwissenschaften füge ich bei. Herr Dr. Wildhagen war zur damaligen Zeit in der Weimarer Republik Vizepräsident der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft und ist heute in Hamburg Verleger. Nach Beratung mit ihm möchte ich hiermit die Frage angeschnitten haben, ob die Entdeckung des Zählrohres, ohne die ja unstreitig ganze Arbeitsgebiete - von der Isotopenforschung bis zur Raumfahrt - kaum möglich wären, nicht der Hälfte eines Nobelpreises für Physik würdig wäre. Damit würde ja die geniale Entdeckung von Dr. Müller in ähnlicher Weise belohnt werden, wie 1927 die Entdeckung der Nebelkammer, für die Wilson den halben Preis für Physik des genannten Jahres erhielt.

> Mit allen guten Wünschen und vielen herzlichen Grüßen bin ich

> > stets Ihr

(Prof. Vincke)

- Archiv des Deutschen Museums München, NL24 -

Kemiska Institutionen II Karolinska Institutet Stockholm 60 Stockholm, den 31. August 1962.

Herrn
Prof. Dr. Erich Vincke
Kolloidbiologisches Forschungslaboratorium
Der Universität Hamburg
Hamburg-Lokstedt
Behrkampsweg 24

Lieber Herr Kollege,

Besten Dank für den Brief vom 24. des Monats. Die Angelegenheit von Dr. Müller ist ja sehr interessant und ich werde gern das Material meinen Kollegen in der Akademie zeigen. Solche Sachen wie diese kommen nicht so selten zur Diskussion. Wenn man die gegenwärtige Konkurrenz berücksichtigt, versteht man, dass nicht alle berechtigten Kandidaten in Frage kommen können. Das Prinzip ist, nur in dringenden Fällen so weit in der Zeit zurückzugehen. Wir haben in dem Komitee jedes Jahr wenigstens 5 sehr kompetente Kandidaten.

Leider kann nur einen von diesen ausgewählt werden. Volle Gerechtigkeit ist ganz einfach unmöglich. Ich werde Ihnen später erzählen, wie die Kollegen in diesem Falle reagieren. Dr. Müller hat jedoch die Freude, seinen Namen im Zusammenhang mit dem Geiger-Müller Zähler zu sehen. Nicht alle Wissenschaftler sind später im Leben in dieser glücklichen Lage.

Mit den besten Grüßen an Ihre Gemahlin und an Sie selbst

Ihr Erik Jorpes

- Archiv des Deutschen Museums München, NL24 -

Meine Geschichte von Walther Maria Max Müller.

Ich kam am 6.9.1905 in Hannover zur Welt.

Das Abitur bestand ich im März 1923 in Koblenz, wo mein Vater Direktor der höheren Mädchenschule war. Mein Hauptinteresse in den Primanerjahren waren Musik und Mathematik. [...]

Mein Studium begann 1923 an der Universität Kiel. Ich fand das Interesse von Otto Toeplitz, der mich sehr förderte und in das Bergmann Haus – später Christian Albrecht Haus – brachte, wo ich für den Rest meines Studiums bis 1928 frei Unterkunft und Verpflegung hatte. Hier waren ausgewählte Studenten aus allen Kreisen, Oberschicht und Unterschicht, Spießbürger, Wissenschaftler und alte Soldaten, und ich habe den vielen Diskussionen bei dem engen Zusammenleben unvergessliche Eindrücke und weiten sozialen Horizont gewonnen, sowie tiefe Einblicke in alle Zweige der akademischen Arbeit bekommen, z.B. in Ökologie durch einen Schüler des Zoologen August Thienemann und in Proben der Juristen, Volkswirtschaftler und Theologen.

In den ersten Jahren meines Studiums begann die gewaltige Entwicklung der Atomphysik, die hauptsächlich von Göttingen ausging und zum Teil auf den Arbeiten des Mathematikers David Hilbert basierte. Toeplitz stammte aus der Göttinger Schule, und ihm verdanke ich sehr viel für seine Hilfe bei diesem Studium. Ich kaufte mir das 1924 erschienene Buch von Hilbert und Courant² (ohne es mir eigentlich leisten zu können) und habe es, völlig fasziniert von dem Inhalt, in vielen Monaten, Tag und Nacht, studiert. [...] 1925 bekam Geiger den Ruf nach Kiel als Institutsleiter, als der bisherige Leiter Geheimrat Dieterici, in den Ruhestand trat. Dieser, ein berühmter Thermodynamiker, glaubte nicht recht an Atome; nach Überlieferung soll er gesagt haben: "Die da oben im 2. Stock (Abteilung für theoretische Physik) faseln immer von Atomen; soll mir doch einer mal eins vorzeigen." [...] Als Geiger dann seine Stellung antrat, war ich so beeindruckt von dem Glanz der neuen Welt, dass ich mich bei ihm um eine Doktorarbeit bewarb und sein erster Doktorand wurde. Ein Semester lang musste ich mich erst im Praktikumssaal bewähren und Widerstände, Selbstinduktionen und Kapazitäten messen. [...]

Zu Beginn des Sommersemesters 1926 gab mir Geiger einen Messingzylinder mit Gummiendstopfen und einen Draht in der Achse und sagte, ich solle Versuche mit elektrischen Entladungen bei geringem Luftdruck machen. Er habe mit diesem Rohr in Berlin zusammen mit Kolhörster Versuche gemacht, die aber dann abgebrochen werden mussten. [...]

Ein festes Ziel bestand zu Beginn der Versuche nicht, sondern es ging um die allgemeine Untersuchung der Erscheinungen, die bei koaxialen Zylindern in ionisiertem Gas bei Spannungen auftreten, die Stoßionisation im Gase hervorrufen können. [...]

Meine Ergebnisse reichten für eine Doktordissertation aus, und die Prüfung wurde im Februar 1928 bestanden mit den Fächern Physik, Mathematik und Chemie. Etwas später machte ich das Examen für das Höhere Lehramt in den Fächern Physik, Angewandte Mathematik, Mathematik und Philosophie, obwohl ich keine Absicht hatte, in den Schuldienst zu gehen. In Philosophie hatte ich Glück, obwohl meine Kenntnisse gleich null waren, und in Kreisen der jungen Naturwissenschaftler Philosophie als Quatsch gewertet wurde. Zum Glück war der Prüfer der Philosoph Heinrich Scholz, der die mathematischen Seminare oft besucht hatte, und mit dem ich früher oft diskutiert hatte. So wurden mir Fragen über Grundlagen der Mathematik vorgelegt, die ich beantworten konnte, während ich bei Plato oder Sokrates völlig verloren gewesen wäre. Deren Bedeutung habe ich erst viel später erkannt.

_

¹ Die damalige 12. und 13. Klasse, die auf das Abitur vorbereiteten.

² "Methoden der mathematischen Physik"

Zum 1. April 1928 wurde ich dann am Physikalischen Institut von Geiger als Assistent mit einem Monatsgehalt von 150 Mark. Außer Vorlesungsdemonstrationen war es meine Aufgabe, eine wissenschaftliche Untersuchung auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen über den Compton Effekt auszuführen. Ich studierte die Spezialliteratur und gab Aufträge an die Mechanikerwerkstatt, hatte dann aber nicht viel zu tun, weil die Werkstatt Zeit gebrauchte und das Semester erst nach dem 1. Mai anfing. Da kam mir der Gedanke, meine alte Apparatur noch einmal aufzubauen, um festzustellen, was eigentlich passiert, wenn man die angelegte Spannung weiter als bisher erhöht, aber kein Radium das Gas im Innern ionisieren kann. [...] Bei völliger Entfernung des Radiums waren Entladungen nur noch selten durch die Spannungsstöße erzeugt. Es zeigte sich, dass tatsächlich Entladungen von Zeit zu Zeit in unregelmäßigen Abständen auftraten und am Elektrometer sichtbar wurden. Merkwürdigerweise war durchschnittliche Zahl der Entladungen pro Minute ziemlich konstant. Diese Zahl ging aber herunter, wenn ich selbst in östlicher Richtung von der Röhre stand und beobachtete. Östlich von mir macht Otto Klemperer Versuche mit Radium. Ich bat ihn, dieses zu entfernen, und dann war die Ausschlagszahl wieder konstant.

Einige Tage später kam Geiger herein und ich demonstrierte diesen Effekt. Nach einigen Sekunden strahlte er und sagte: "Dies ist die Höhenstrahlung, wir haben ein neues Gerät zur Messung der kosmischen Strahlen hier im Zimmer." Um diese Zeit war es noch stark umstritten, ob die kosmische Strahlung bis zum Meeresniveau vordringen konnte, aber Geiger hatte mit dem Pionier dieser Strahlung, Kolhörster, in Berlin kurz vor seiner Berufung nach Kiel zusammen gearbeitet und glaubte daher an Höhenstrahlung auf Meeresniveau. Es wurden nun Versuche gemacht, die Höhenstrahlen durch dicke Eisenplatten abzuschirmen und auch schwache Radioaktivitäten nachzuweisen. Es war seit 1905 bekannt, dass Kalium Elektronen als β -Strahlung emittiert. Da β -Strahler meist auch γ -Strahlung emittieren, war auch bei Kalium eine schwache γ -Strahlung zu erwarten. Die β -Strahlen wurden durch eine dünne Bleischicht absorbiert, und nun zeigte sich die isolierte γ -Strahlung durch vermehrte Ausschläge, wenn auch nur wenige Gramm Kalium verwendet wurden. Es zeigte sich später, dass ganz kurz vorher die γ -Strahlung von Kolhörster entdeckt worden war, allerdings bei Verwendung vieler Tonnen Substanz im Kalibergwerk.

- Archiv des Deutschen Museums München, NL24 - (redigiert und gekürzt)

Auszüge aus Müllers Briefen an seine Eltern von 1928-29 aus Kiel.

8. Februar 1928:

Lieber Vater und liebe Mutter!

Nun bin ich also glücklich mit dem ganzen Examen fertig. Schön war es eigentlich nicht, aber ich habe es mir zuerst doch schlimmer vorgestellt. [...] Was nun in Mathematik von mir verlangt wurde, lässt mich noch jetzt erschaudern. Es ging aber ganz gut. Bei Geiger war die Prüfung in experimenteller Physik sehr angenehm, bei Kossel in theoretischer Physik sehr schwierig. Ich habe aber bei beiden etwas über das Existenzminimum hinaus gewusst. Die Chemieprüfung war dann sehr leicht. [...] Mein Termin für das Staatsexamen wird wahrscheinlich am 15.3. sein. Die zweite Arbeit ist geradezu lächerlich. Ich brauche nur eine Rezension und Inhaltsangabe eines neuen Buches zu schreiben. Damit bin ich etwa halb fertig.

Bis ich nun eine gute Stelle gefunden habe, kann ich bei Geiger Privatassistent spielen. Gehalt 150 Mark, 3 Stunden täglich Dienstzeit, in der übrigen Zeit eigene wissenschaftliche Arbeiten mit allen Mitteln des Instituts. Dieses Angebot scheint mit in Hinblick auf eine schnelle Habilitation derartig günstig, dass ich es ab Ostern gerne annehmen möchte, natürlich nicht ohne eure Ansicht zu hören.

Als Privatassistent eines der bedeutendsten Experimentalphysiker habe ich einmal in der Industrie ungleich bessere Chancen, und, wenn ich länger wie 9 bis 12 Monate bleiben sollte, werde ich, nach Geigers Versprechung, auch ein anderes Gehalt bekommen. Offizieller Arbeitgeber ist die Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft". Urlaub 6 bis 8 Wochen jährlich. Die Ausnutzung von mir als eine Art Sekretär kommt in Anbetracht meiner Aufgabe, die in selbstständigen wissenschaftlichen Arbeiten besteht, nicht in Frage, wenn ich auch z.B. Briefe gelegentlich beantworten muss und überhaupt ähnliche Sachen öfters werde erledigen müssen. [...]

Herzliche Grüße sendet euch euer Walther

6. April 1928:

[...] Das neue Leben hat nun doch gleich ziemlich scharf eingesetzt. Am Montag beim Dienstantritt bekam ich ein paar Kleinigkeiten zu erledigen und dann vor allen Dingen die genaue Begrenzung meiner wissenschaftlichen Arbeit. Ich hatte dazu so fürchterlich viel Literatur durchzuarbeiten, dass mir dadurch bald ganz wirr im Kopf ist. Dann musst ich für die Arbeit Werkstattzeichnungen machen und anfangen, die Apparatur aufzubauen. Zu allem Überfluss warteten auch die Korrekturen meiner Doktorarbeit für die Veröffentlichung und wollten erledigt sein. [...]

25. Mai 1928:

Aus dem physikalischen Institut sende ich der ganzen Familie die herzlichsten Pfingstgrüße. Das Pfingstpaket ist angekommen, ebenso mehrere Briefe. Vielen, vielen Dank.

Mir geht es zur Zeit sehr gut. Meine wissenschaftlichen Arbeiten solle noch etwa ein Jahr nicht veröffentlicht werden, aber euch kann ich es ja immerhin schreiben, wenn ihr nicht darüber sprecht. Es ist mir gelungen ein elektrischen Strommessinstrument auszuarbeiten, dass die 1500 fache Empfindlichkeit der bisherigen hat. Natürlich kann man mit diesem Ding ungeheuer viel anfangen und wir möchten hier in Kiel erst mal ein Jahr lang arbeiten, ehe wir das Ding bekannt geben und alle anderen Institute als Konkurrenz haben. Es ist mir schon jetzt gelungen, eine bisher zwar vermutete, aber nicht nachweisbar gewesene Strahlung des Kaliums zu entdecken und genau zu messen. Es handelt sich um die γ -Strahlung des Kaliums. Eine β -Strahlung von Kalium ist übrigens seit 25 Jahren bekannt. Vielleicht wird euch die Stärke der von mir entdeckten Strahlung interessieren. Die γ -

Strahlung von 1 Milligramm Radium ist so stark wie die entsprechende Strahlung von 8 Millionen Kilogramm Kalium! Und dabei habe ich sie mit 1 Kilogramm Kalium gemessen! Immerhin hoffe ich, im Laufe des Jahres noch eine ganze Reihe von Ergebnissen zu bekommen.

Geiger ist natürlich begeistert und infolgedessen habe ich von ihm jede Hilfe. Aber bitte das Ganze geheim halten! [...]

3. Juni 1928

[...] Ich stecke natürlich sehr stark in der Arbeit.

Die Strahlung, die ich zuerst an 3 kg Kalium zeigen konnte, kann ich heute schon an 10g zeigen und ich hoffe, dass in 8 Tagen bereits 0,1g ausreichen wird. Das ist natürlich keine Spielerei oder Rekordwahnsinn, sondern wir wollen einfach die Methode soweit verfeinern, dass uns dann andere Ergebnisse mühelos zufallen. Kalium ist zur Zeit das am schwächsten radioaktive bekannte Element. [...]

Leider hat sich nachträglich herausgestellt, dass die γ -Strahlung des Kaliums doch nicht von mir entdeckt ist, sondern etwa 3 Monate früher in den Kalibergwerken von Stassfurt entdeckt worden ist. Das ist zwar peinlich, aber es beweist doch nur die Güte unserer Methode, die spielend mit einigen Gramm Substanz die Ergebnisse liefert, zu denen die anderen die vielen Tonnen in den Kalilagerstätten nötig hatten. [...]

8. Juli 1928

[...] Die Tagung in Kiel ist ganz zu unserer Zufriedenheit verlaufen. Ich habe von mehreren Seiten gehört, dass der Vortrag von Geiger und mir der Schlager des Tages gewesen wäre. Die Vorträge, die sonst gehalten wurden, waren zum Teil so theoretisch, dass der normale Zuhörer wohl nichts verstehen konnte. Viel netter waren hinterher die 'zwanglosen' Veranstaltungen. Man lernte da sehr viele Leute kennen und hörte auch eine ganze Menge von Anekdoten. [...]

Seit der Tagung finden nun bei mir dauernd Besichtigungen durch eingeladene Gäste, hauptsächlich Professoren usw. statt. Wir haben uns aus naheliegenden Gründen auch sehr erheblich mit dem Kurator abgegeben, denn dieser ist ja bekanntlich der Mann mit dem großen Staats-Portemonnaie und als solcher natürlich warm zu halten. [...]

Leider muss ich euch auch noch einmal in diesem Monat bitten, mir helfend unter die Arme zu greifen. Wenn nämlich besondere Ausgaben kommen, wie in diesem Monat die Physikertagung, sowie zwei zu besohlende Paar Stiefel, dann reicht mein Gehalt nicht ganz bis zum Monatsletzten. Ich wäre euch sehr dankbar, wenn ihr mir noch einmal 10 Mark schicken könntet. [...]

15. Dezember 1928

[...] Die letzte Woche hat wieder einmal die Wissenschaft einen Schritt weiter gemacht. Wir arbeiten seit etwa 3 Monaten gemeinsam mit den englischen Physikern Ernest Rutherford und James Chadwick. Wir haben im August 2 Zählrohre dorthin geschickt und gebeten, damit Versuche zu machen, die wir aus Radiummangel nicht machen können. Der Erfolg ist jetzt eingetreten. Wir hörten gestern von Cambridge, dass dort eine neue Strahlung entdeckt worden ist, die bei der Atomzertrümmerung entsteht. Der Erfolg ist zumindest halb auf unser Konto zu buchen. [...]

In der vorigen Woche kam ein Keilangebot von Siemens & Halske. Ich habe es ablehnen müssen, obwohl ich in eine sehr schöne Stellung gekommen wäre. Ich muss doch unbedingt meine Kieler Versuche zum Abschluss bringen, trotz des nicht gerade allzu festen finanziellen Hintergrundes. In einem Jahr denke ich aber so weit zu sein, dass meine Zukunft gesichert ist. Geiger hat an den Siemens-Konzern geschrieben, er ließe mich vor

einem Jahr nicht gehen. Ich finde, dass das auch schon mehr sagt, als jede Empfehlung. [...]

13. Januar 1929:

[...] Am 10. Februar fahre ich nach Göttingen, um dort einen Vortrag auf der Tagung des Gauvereins Niedersachsen der Physikalischen Gesellschaft zu halten und im Anschluss darin in Viennenburg in den Salzlagern Messungen zu machen. Ich habe nun eine große Bitte, ich kann das Geld für diese Reise erst nachträglich im Erstattungswege bekommen und wäre euch daher sehr dankbar, wenn ihr mir Anfang Februar einen Vorschuss von 40 Mark geben könntet. [...]

5. März 1929:

[...] Im Institut ist unheimlich viel zu tun, was geleistet wird, geht aus den etwa alle Vierteljahr von Geiger und mir veröffentlichten Arbeiten hervor. Außer diesen Arbeiten habe ich noch 3 Doktoranden zu beaufsichtigen, übrigens sind alle drei sehr nette und ordentliche Leute, von denen einer sogar meine Doktorarbeit mit Verständnis gelesen hat. [...]

15. April 1929:

[...] Geiger ist seit vorigem Mittwoch mit seinem Auto nach Wiesbaden unterwegs. Er hatte mir vorher noch ein paar interessante Sachen mitgeteilt. [...] Er hatte eine Antwort von Einstein auf seine Gratulation zum 50. Geburtstag bekommen, in der Einstein das Zählrohr als das 'empfindlichsten Organ der Menschheit' bezeichnet. Das ist doch eine sehr hübsche Anerkennung. [...]

13 Juni 1929

[...] In der nächsten Woche ist hier die Nordisch-Deutsche Hochschulwoche. Es gibt dazu eine ganze Menge Unruhe, denn unser Institut wird wieder einmal von Scharen von Besuchern heimgesucht, worunter sich auch der berühmte Niels Bohr aus Kopenhagen befindet (Nobelpreisträger). [...]

16. Juli 1929

[...] Da wir vielleicht schon vor dem 1. Oktober nach Tübingen gehen, sollen erst unsere Höhenstrahlungsversuche zum Abschluss gebracht werden. Etwas Näheres kann ich noch nicht erfahren, da Geiger den Ruf noch nicht angenommen hat, sondern sich erst in etwa 8 Tagen entscheiden will. Dass er aber annimmt, ist sicher. [...]

25.Juli 1929

[...] Über Tübingen kann ich heute auch noch nichts Genaueres sagen, weil Geiger heute Abend erst aus Berlin wieder kommt. Er ist noch beim preußischen Kultusminister gewesen, der sicher versuchen wird, ihn in Kiel zu halten. Es ist aber doch ganz ohne Frage, dass er nach Tübingen geht. [...] Sobald die Sache sicher ist, und ich meinen Vertrag fest in Händen habe, schreibe ich es gleich. [...]

2. August 1929

[...] Geiger ist heute nach Tübingen gefahren, meine Sache wird also in diesen Tagen verhandelt, wenigstens formal, denn es ist ja schon längst klar. Am 1. Oktober geht es also nach Tübingen. [...]

18. September 1929

[...] Ich bin nämlich auf das Äußerste empört, dass ich von Geiger tatsächlich in der übelsten Weise betrogen werden soll. Die Folge wird sein, dass ich zwar mit nach Tübingen gehen werde, aber bei der nächsten Gelegenheit mich verändern werden. [...]

22. September 1929

[...] Nachdem es Geiger bis vor 8 Tagen gelungen war, mich hinzuhalten, habe ich endlich klare schriftliche Zusagen verlangt. Da kam es dann heraus, dass er gar nicht die Absicht hatte, irgend etwas für mich zu tun. Er stellt sich meinen Aufenthalt in Tübingen so vor, dass ich weiter arbeite für 180 Mark und dann für Institutstätigkeit noch 100 Mark monatlich hinzubekomme. [...] Die Notgemeinschaft teilte mir jedoch mit, dass ihre Stipendiaten keine Nebenverdienste haben dürften. [...] Man stelle sich vor: Geiger bekommt auf meine Arbeiten hin einen Ruf und verbessert sich gewaltig. Unbeteiligte Personen, wie Klemperer verbessern sich ebenfalls stark. Klemperer hat freie Bahn in Kiel zur Habilitation und vertritt Geiger im Institut mindestens für das nächste Semester bei einem Gehalt von etwa 1000 Mark nur für diesen Winter. Der Posten von Christian Gerthsen in Kiel fällt an zwei noch nicht promovierte Studenten, die jeder etwas mehr bekommen als ich. Nur ich soll unter gleichen Bedingungen für Jahre nach Tübingen. Ich finde das einfach zum Speien. [...]

- Archiv des Deutschen Museums München, NL24 - (redigiert und gekürzt)

Auszüge und Zusammenfassung aus Müllers Briefen an Eduard Wildhagen im Jahr 1957 und 1963.

Sehr geehrter Herr Dr. Wildhagen!

Meinen besten Dank für Ihren freundlichen Brief vom 4. April. [...] Ich bin natürlich gerne bereit, Ihnen aus der Geschichte des Zählrohres einige Daten zu geben, die kaum bekannt sind, da sie in den vorhandenen Darstellungen aus Interessenpolitik oder Ignoranz verschwiegen werden. [...]

Das erste halbe Dutzend Veröffentlichungen über das Zählrohr in wissenschaftlichen Journalen gibt Geiger und mich als Verfasser an. Nach gutem Brauch haben daher beide als Erfinder zu gelten, ohne dass außenstehende Personen das Recht haben, über den Anteil jeder der Erfinder Vermutungen zu äußern. Dritte Personen waren überhaupt nicht zugegen und wurden erst nach vielen Wochen ins Vertrauen gezogen, und niemand kann sich daher eine auf eigene Kenntnis gestützte Meinung über die Vorgänge bilden. Der unglückliche Umstand, dass Geiger vor 12 Jahren verstorben ist, macht für mich leider eine öffentliche Erörterung recht heikel, sodass ich nur beweisbare Vorgänge in Betracht ziehen kann. [...] Als Geiger im Jahre 1926 aus der Physikalisch Technischen Reichsanstalt in Berlin als ordentlicher Professor nach Kiel berufen wurde, hatte ich meine Physik und höhere Mathematik einigermaßen gelernt und ich meldete mich bei Geiger in der üblichen Weise mit der Bitte, bei im doktorieren zu dürfen. Es dauert einige Zeit, dann zog Geiger aus inzwischen eingetroffenen Apparatekiste ein Messingrohr Hartgummistopfen an den Seiten und forderte mich auf, einen Draht darin auszuspannen, das Ganze an die Vakuumpumpe zu hängen und elektrische Entladungen im Zylinder zu studieren. [...] Ich verschwand daraufhin für einige Wochen vom Skattisch, Kneipe und den Ruderbooten auf der Kieler Förde und wurde nur mittags kurz in der Mensa, frühmorgens und spätabends auf dem Heimweg und sonst in der Bibliothek gesehen. Nach diesen Wochen galt ich im Physikalischen Institut als Sachverständiger für Gasentladungen, da ich tatsächlich alles greifbare aufgestöbert und studiert hatte. [...] Nur der Anblick des mir von Geiger überreichten Messingrohres stimmte mich traurig. Was sollte ich damit eigentlich neues entdecken? Soweit Spannungen unterhalb der Durchschlagspannung in Frage kamen, hatten schon andere Forscher Jahre zuvor in ihren glänzenden Experimenten eigentlich alles aufgeklärt. Oberhalb der Durchbruchspannung waren, wie jedermann wusste und in Büchern und Schwarten nachlesen konnte, nur wilde Entladungen zu erwarten, mit denen sich ein ordentlicher Physiker nicht abgab, denn er stellte zuerst saubere Versuchsbedingungen her, bei denen so etwas nicht vorkam. [...] Ich machte mich dann also unverdrossen an die Arbeit, pumpte an dem unglückseligen Messingrohr herum und registrierte einige Hefte voll Zahlen, die meistens winzige Strommengen betrafen. [...] Ich hatte es sehr eilig, meinen Doktortitel zu erwerben und es gelang, Geiger dazu zu bringen, die Arbeit als Dissertation anzuerkennen, ohne eine Ausdehnung der Experimente zu verlangen.

Am 1. April 1928 wurde ich dann Assistent von Geiger und hatte beim Vorlesungsdienst mit dem Aufbauen von Versuchen und dem Malen von Diapositiven zu tun. Daneben musste ich aber auch eine Untersuchung im Röntgenstrahlgebiet vorzubereiten. Die Zeichnungen waren bald gemacht und kamen in die Werkstatt. Ich habe mich Zeit meines Lebens über die Langsamkeit von Werkstätten geärgert, in diesem Fall hat sie mir aber sechs goldene Wochen des Wartens beschert, in denen ich eigentlich nicht viel zu tun hatte. Ich dachte nochmal über meine Doktorarbeit nach, die mir das unbehagliche Gefühl hinterlassen hatte, als sei sie eigentlich nicht fertig geworden. [...] Das alte Messingrohr und ein paar später hinzugekommene Brüder lagen noch herum. Die Spinnen wurden verjagt, und Alkohol stellt den alten Hochglanz wieder her. [...]Am 4. Mai 1928 wurde dann endlich wieder eingeschaltet. Da waren dann also wieder die vielen wilden

Ausschläge, die auf ihre Legitimität geprüft werden sollten, nur waren es noch viel mehr, als ich in meinen bösesten Träumen befürchtet hatte. Ich sah mir die Sache von allen Seiten an, und dann fiel mir auf, dass die Zahl der Ausschläge auf einen Bruchteil sank, wenn ich auf der Seite zur Tür ins Nebenzimmer stand. Natürlich, Herr Klemperer arbeitete ja mit 20 mg Radium, und wenn ich zwischen Radium und Rohr trat, wurde ein großer Teil der Strahlung durch mich abgeschirmt. Auf Radium in größerer Nähe sprach das Instrument mit größter Heftigkeit an. In kurzer Zeit wurden mit Geiger strenge kritische Versuche angestellt, um zu beweisen, dass tatsächlich ein Messinstrument vorlag, das auf Strahlen und nicht anderes ansprach und eine solche Empfindlichkeit hatte, dass es von Einstein als das feinste Sinnesorgan der Menschheit bezeichnet wurde.

Die bald darauf erfolgende Veröffentlichung des Zählrohres in der Zeitschrift "Naturwissenschaften" hatte ein außerordentlich starkes Echo in der ganzen Welt und es war eine recht große Korrespondenz zu erledigen. [...]

Natürlich war es vom Zählrohr bis zur Entwicklung der jüngsten Atomtechnik ein ungeheurer Schritt. Wie wenig man damals allgemein wusste geht in vielleicht besonders typischer Weise aus dem Wasserstoffproblem 1928 hervor. Schon 1932 wurde dann das Wasserstoff-Isotop Deuterium, und zwar in solcher Menge im gewöhnlichen Wasser entdeckt, dass auf jede Tonne einige Liter dieses Gases kommen, und dann kam 1934 schon ein weiteres Isotop, das Tritium, hinzu. Im Kriege wurde es eifrig zur Herstellung von Bomben benutzt. [...]

Ich selbst habe von der Entdeckung des Zählrohres kaum etwas außer schäbigstem Neid gehabt, der sich in den groteskesten Formen geltend machte, und der in einigen mir bekannten und nachweisbaren Fällen für die Pflege der Bezeichnung "Geigerzähler" statt "Geiger-Müller Zähler" verantwortlich ist.

Ein materielles Interesse habe ich heute selbstverständlich an dem Zählrohr nicht mehr. Entgegen der landläufigen Ansicht wäre aus dem Zählrohr niemals ein Millionengeschäft geworden, wenn es patentiert worden wäre. Die Erwerbung und Aufrechterhaltung eines Patentes hätten 10 000 bis 15000 Mark gekostet. Die gewerbliche Verwertung, die allein lizenzpflichtig ist, hatte bis nach dem Kriege nur den geringen Umfang von höchsten einigen tausend Exemplaren. Selbst eine hohe Lizenzgebühr hätte also nie die Kosten des Patentes eingebracht.³

Bei Geiger hatte ich in den nachfolgenden 1 ¾ Jahren auch keine recht glückliche Zeit. Im Sturm meiner 22 Jahre wollte ich das Zählrohr auf alle Gebiete anwenden, auf denen sich später die Physiker reihenweise mit Hilfe des Zählrohres ihre Nobelpreise holten. Geiger beschränkte mich auf Untersuchungen am eigentlich Zählrohr, also Messungen von Drucken, Spannungen und allen möglichen mir höchst uninteressant und langweilig erscheinenden Dingen. Die für mich zur Verfügung stehenden Ausrüstungen waren kläglich, reichte doch der zur Verfügung stehenden Etat kaum für die Anforderungen der Arbeit von Geiger. Für das 150 Mark - Stipendium der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaften bin ich zu Dank verpflichtet, aber meine Hoffnung mit Geiger noch Tübingen in eine besser bezahlte Position zu wechseln, hat sich nicht erfüllt. Für mich war dies alles Grund, auf weitere Arbeit bei Geiger zu verzichten.

Ich verließ dann den Universitätsbetrieb aus Protest gegen die damals verbreitete Ansicht, man müsse etwa 10 Jahre lang unterbezahlt, gegängelt und ausgebeutet werden, bevor man es zu etwas bringen könnte. Es gibt gelegentlich an Hochschulen und in der Industrie anzutreffende Autokraten, deren Standpunkt in etwa wie folgt lautet: "Es ist jüngeren Herren mit weniger als 10 tadelsfreien Dienstjahren nicht gestattet, eigene Gedanken zu haben oder ihnen nachzugehen. Bei Zuwiderhandlung übernimmt der Chef den Fall, denn

.

³ Dieser Absatz ist aus dem Jahr 1963.

er ist aufgrund seiner Leistung allein befähigt und befugt, neue Gedanken auszuwerten." Diese Leute erkennen selbstverständlich nur ein Geiger-Zählrohr an.⁴ [...] Mit den besten Grüßen,

Walter Müller

- Archiv des Deutschen Museums München, NL24-7/30 - (redigiert und gekürzt)

⁴ Dieser Absatz ist aus dem Jahr 1963.

Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten¹.

Handelt es sich um die Aufgabe, die Radioaktivität sehr schwach aktiver Substanzen zu bestimmen, so hat sich bisher nur das Blättchenelektrometer und das Hoffmannsche Nadelelektrometer bewährt. Der Spitzenzähler dagegen erweist sich trotz seiner hohen Empfindlichkeit nicht als geeignet, weil er nur die Auszählung einer relativ sehr kleinen Oberfläche der aktiven Substanz zuläßt.

Die im folgenden beschriebene Apparatur, die wir als Elektronenzählrohr bezeichnen möchten, vereinigt eine große Zählfläche mit der Empfindlichkeit des Spitzenzählers. Ein dünner Draht wird mit einer möglichst gleichmäßigen, aber schlecht leitenden Haut überzogen und dann axial in einem Metallrohr ausgespannt. Die isolierende Wirkung der Oberflächenhaut erlaubt es, die Spannung zwischen Draht und Metallrohr über das Funkenpotential zu steigern. Dies hat zur Folge, daß ein Elektronenstrahl, der von außen kommend oder an der Rohrwand entstehend an beliebiger Stelle das Rohr durchsetzt, einen kräftigen Ionisationsstrom hervorruft, der aber infolge der Aufladung der Oberflächenhaut sofort wieder abreißt. Die einzelnen Stromstöße können durch ein Fadenelektrometer leicht sichtbar gemacht werden. Die Anordnung stellt daher einen auf Korpuskularstrahlen ansprechenden Zähler dar, bei dem die ganze Fläche des äußeren Zylinders als wirksame Zählöffnung anzusehen ist. Daß dieses Zählrohr wirklich in der angegebenen Weise arbeitet, geht daraus hervor, daß die Ausschlagszahl der Rohroberfläche proportional ist und daß sie sich über einen Spannungsbereich von etwa 50 Volt praktisch mit der Spannung nicht ändert. Auch entspricht die Ausschlagszahl, die man von der γ-Strahlung eines in die Nähe gebrachten Radiumpräparates erhält, der Größenordnung nach den bisherigen Erfahrungen über

die Intensität der sekundären Elektronenstrahlung.
Die Empfindlichkeit des Zählrohrs ist erstaunlich.
Stellt man ein Zählrohr von größerer Oberfläche ohne
besonderen Strahlungsschutz in einem Zimmer auf,
so zeigen sich Hunderte von Ausschlägen in der Minute,
die von der Höhenstrahlung, von der Strahlung der
Zimmerwände, des Erdbodens usw. herrühren. In dem
Maße aber, in dem man das Zählrohr durch Metall-

panzer gegen diese äußeren Strahlungen abschirmt, nimmt auch die Ausschlagszahl ab. Mit einem 80-qcm-Zählrohr sind wir bei allseitigem Eisenpanzer von ca. 25 cm Dicke bis zu Ausschlagszahlen von 0,6 pro qcm Oberfläche und Minute heruntergekommen. Es steht noch nicht fest, ob diese restliche Strahlung der Eigenaktivität des Zählrohrs oder der durchdringenden Komponente der Höhenstrahlung zugeschrieben werden muß.

Die γ -Strahlung von Kalium konnte mit einem 50-qcm-Zählrohr an 100 g Kaliumchlorid in wenigen Minuten nachgewiesen werden. Etwa 50 mg Kaliumchlorid gaben im Innern des Zählrohrs durch ihre β -Strahlung eine so starke Wirkung, daß Zählungen kaum noch möglich waren. Aktivitäten, die tausendmal kleiner sind als die des Kaliums, werden sich wohl noch leicht messen lassen. Wir hoffen, in Bälde über quantitative Messungen berichten zu können.

Kiel, den 7. Juli 1928.

H. GEIGER und W. MULLER.

Geiger, Hans & Müller, Walther, 1928. Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten. In: *Die Naturwissenschaften*, 617-618.

¹ Vorgetragen und demonstriert auf der Kieler Tagung des Gauvereins Niedersachsen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft am 7. Juli 1928.

E. Liste von analysierten Schulbüchern

- 1980 Baumann "Physik" Girardet Verlag, Essen
- 1980 Dorn- Bader Physik Mittelstufe, Schroedel Schulbuchverlag
- 1982 Hammer Physik GK II Oldenbourg München
- 1982 Metzler Physik Gesamtband, 1. Auflage (verbesserter Nachdruck), J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- 1983 umwelt physik Ausgabe Nordrhein-Westfalen, 1. Auflage, Ernst Klett Stuttgart
- 1983 Walz "Physik" Schroedel Verlag, Hannover
- 1984 Kuhn Lehrbuch der Physik Westermann Schulbuchverlag, Braunschweig
- 1985 Bergmann und Schröder "Einführung in die Physik" Diesterweg Verlag, Frankfurt am Main
- 1985 Gross Berhag physik für die Sekundarstufe 1, 1. Auflage, Ernst Klett Schulbuchverlag
- 1987 Dorn-Bader "Physik Oberstufe Grundkurs 1213" Schroedel Verlag Hannover
- 1987 Einführung in die Physik Sekundarstufe 1, 2., neubearbeitete Auflage, Verlag Moritz Diesterweg
- 1987 Gross Berhag atome kerne quanten, 1. Auflage, Ernst Klett Schulbuchverlag
- 1991 Physik Band 2 Cornelsen Verlag
- 1993 Impulse Physik 1 für die Mittelstufe der Gymnasien, 1. Auflage, Ernst Klett Verlag
- 1993 Physik für Gymnasien Länderaudgabe N Gesamtband, 2. Auflage, Cornelsen
- 1997 ImpulsePhysik 2, 1. Auflage, Ernst Klett Verlag
- 1997 umwelt physik 9, 10 Niedersachsen, 1. Auflage, Ernst Klett Verlag
- 1999 Oberstufe Physik Gesamtband, 1. Auflage, Cornelsen
- 2000 Metzler Physik 3. Auflage
- 2002 Natur und Technik Physik Hauptschule 9, 10 Nordrhein-Westfalen, 1. Auflage, Cornelsen
- 2003 DornBader Physik Westermann 4. Auflage
- 2007 Physik Lehrbuch für die Sekundarstufe 1, Bd. 2 Baden- Württemberg Gymnasium, 1. Auflage, Duden Paetec
- 2008 Physik interaktiv Cornelsen
- 2009 Fokus Physik Cornelsen