



Physik quer*Feldein*

Aspekte und Methoden der Physik

Kompetenzorientiertes Übungsmaterial

für das Basisfach Physik


Hermann Krämer

Inhaltsverzeichnis

1. Physik in unserer Gesellschaft	3
1.1 Physik im Zeichen der Globalisierung.....	3
1.2 Physik im Zeichen der Nachhaltigkeit.....	4
1.3 Physik in der heutigen Informationsgesellschaft.....	5
2. Basiskonzepte der Physik	6
2.1 Homogenes elektrisches Feld.....	6
2.2 Ladungen in homogenen magnetischen Feldern.....	7
2.3 Elektromagnetische Induktion.....	10
2.4 Harmonische Schwingungen.....	12
2.5 Mechanische Wellen.....	13
2.6 Interferenz bei Wellen.....	15
2.7 Interferenz bei Elektronen.....	17
3. Physikalisches Interpretieren	20
3.1 Interpretieren physikalischer Anordnungen und Systeme.....	20
3.2 Physikalisches Interpretieren experimenteller Situationen.....	25
3.3 Physikalisches Interpretieren von Texten aus Umwelt und Technik.....	27
4. Experimente planen und durchführen	29
4.1 Aspekte der Planung von Experimenten.....	29
4.2 Aspekte der Durchführung von Experimenten.....	34
4.3 Auswertung von Experimenten.....	40

5. Physik als Wahrnehmungsdetektiv.....	43
5.1 Zwischen Wahrnehmung und Messung unterscheiden.....	43
5.2 Messungen können detektivisch weiterhelfen.....	44
 6. Physik querbeet – Analogien und Strukturen.....	 46
6.1 Analoge Konzepte erkennen und darstellen	46
6.2 Mit analogen Konzepten neue Themen entdecken	53
 7. Mathe und Physik? Mit Formeln umgehen.....	 59
7.1 Eine vielfältige Formelwelt.....	59
7.2 Technik erfordert anwendungsorientierte Größen.....	62

Hinweis zum Gebrauch des Materials:

In den Basisthemen (Kapitel 2) werden die einzelnen Themen durch einen farbigen Button gekennzeichnet (z.B.  für „elektrisches Feld“). Dadurch ist in den späteren Kapiteln bei den kompetenzorientierten Beispielen ersichtlich, auf welchem Basisthema diese inhaltlich aufbauen. Vertieft ein kompetenzorientiertes Beispiel mehrere Basisthemen, so wird dies entsprechend durch mehrere Buttons gekennzeichnet.

Hermann Krämer

Oktober 2019

1. Physik in unserer Gesellschaft

1.1 Physik im Zeichen der Globalisierung

Beispiel: Der CERN - ein internationales Forschungslabor

CERN – ein Motor der Wissenschaft

Alles begann nach dem Zweiten Weltkrieg in den frühen 50er Jahren. Europäische Wissenschaftler gründeten ein Laboratorium für Teilchenphysik und legten somit den Grundstein für die zukünftige Wissenschaft. Aus dieser Vereinigung europäischer Wissenschaftler bildete sich eine weltweite, nationenübergreifende Forschungsarbeit mit dem Ziel, den innersten Aufbau des Universums zu verstehen und zu erklären. Doch nicht nur die Wissenschaft ist der Hauptteil des CERN. Durch das Zusammenbringen von Wissenschaftlern aus aller Welt wird eine Verbindung von Kulturen und eine bessere europäische Integration ermöglicht. Auch wird den Wissenschaftlern von Morgen, den Studenten, die Möglichkeit geboten an der Arbeit des CERN teilzunehmen. Ein weiteres Ziel ist es, neue Technologien zu schaffen und diese der Weltbevölkerung zur Verfügung zu stellen. Das beste Beispiel hierfür ist das World-Wide-Web, welches heutzutage nicht mehr wegzudenken ist.

Der CERN als ein internationales Forschungslabor ist ein beeindruckendes Beispiel dafür, wie heutige gesellschaftliche Entwicklungen wie globale Netzwerkarbeit und internationale wissenschaftliche Kooperationen hier repräsentativ stattfinden. Die *gesellschaftliche Relevanz* dieser Forschungseinrichtung äußert sich in ihrem beispielhaften Charakter für eine moderne internationale Netzwerkarbeit.

Besonders bedeutende Aspekte sind dabei:

a) Internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit:

Am CERN arbeiten ca. 3000 Wissenschaftler aus vielen Nationen zusammen. Bedeutend hierbei ist, dass die Forschung komplett über aktuelle politische Grenzen hinweg reicht. Beispielsweise arbeiten hier Iraner, Israelis und Palästinenser miteinander und treten in einen intensiven Austausch zueinander. Dies zeigt, dass der CERN ein Ort des friedlichen Miteinanders im Rahmen eines wissenschaftlichen Austausches ist und dabei politische Gräben überwunden werden.

b) Netzwerkarbeit auf einer Ebene:

Die Zusammenarbeit der Wissenschaftler zeichnet sich dadurch besonders aus, dass die Netzwerkarbeit quasi ohne eine besondere Hierarchie stattfindet. Das heißt, dass die Wissenschaftler auf einer Ebene miteinander kommunizieren und forschen. Dass dies funktioniert hat auch schon dazu geführt, dass sozialwissenschaftliche Forschungseinrichtungen dieses Netzwerk am CERN wissenschaftlich untersuchen.

c) Internationales Datennetzwerk:

Aufgrund der enorm hohen Datenmenge, die bei der Auslese der Ereignisse in den Detektoren anfallen, muss ein internationales Daten-Netzwerk bestehen, das auf viele Standorte in der ganzen Welt verteilt ist. Hierbei handelt es sich um das GRID, in dem die Daten der Experimente ausgewertet werden. Auch die Entstehung des heute nicht mehr wegzudenkenden Internets geht auf den CERN zurück. Hierbei handelte es sich ursprünglich um ein wissenschaftliches Computernetzwerk um Daten aus dem CERN in aller Welt auswerten zu können.

d) Historisch - symbolische Bedeutung:

Dabei wird unter anderem auch sehr die symbolische Bedeutung dieses internationalen Forschungslabors als ein Ort des Aufbruches zur friedlichen Grundlagenforschung in der Kern- und Teilchenphysik betont. Gerade nach den Atombombenabwürfen in Japan am Ende des zweiten Weltkrieges stellt die Gründung des CERN ein markantes Symbol einer Wende in der Forschung dar.

Arbeitsaufträge:

[1] Stelle in Form eines Mindmaps die gesellschaftliche Bedeutung des CERN als ein internationales Forschungslabor zusammen.

[2] Informiere Dich (z.B. im Internet) über zentrale Forschungsprojekte am CERN.

1.2 Physik im Zeichen der Nachhaltigkeit

Beispiel: Freiburger Solarregion

Die Stadt Freiburg im Breisgau verfolgt schon seit vielen Jahren das Ziel, die Solarenergietechnik in einem breiten Umfang auszubauen und zu fördern. Dabei ist insbesondere die intensive Verknüpfung zwischen der Erforschung der physikalischen Grundlagen von Solarenergie, der Herstellung von Solarzellen in einer Solarfabrik und ihrem konkreten Einsatz in Wohngebieten ein zentrales Anliegen. Ziel ist es, eine breite

gesellschaftliche Verankerung der Solartechnik zu erreichen. Beispielsweise beteiligen sich auch Umweltarchitekten, um besondere Gebäudetypen zu entwerfen, die sowohl ästhetisch wie auch praktisch die Nutzung der Solarenergie in die Gebäudeentwürfe integrieren. Auch die Stadt Freiburg als Kommune hat entsprechende Programme beschlossen, um politische Rahmenbedingungen für die Förderung der Solarenergie zu gewährleisten.

Aufgaben:

[1] Informiere dich bspw. im Internet über die Solarregion Freiburg. Versuche dabei insbesondere herauszufinden wie die Bereiche Erforschung - Produktion – Vermarktung von Solartechnik konkret umgesetzt werden.

[2] Stelle deine Ergebnisse aus Aufgabe [1] auf einem Plakat dar.

1.3 Physik in der heutigen Informationsgesellschaft

Beispiel: Informationsübertragung

In unserer heutigen so ausgeprägten Informationsgesellschaft stehen Entwicklungen einer schnellen Informationsübertragung im Vordergrund. Dazu leistet die Physik einen großen Beitrag indem sie in der Grundlagenforschung nach Wegen einer effizienten und schnellen Informationsübertragung sucht. Dabei steht vor allem auch die schnelle Übertragung immer höherer Datenmengen im Vordergrund. Hierbei haben sich in den letzten Jahren vor allem optische Verfahren gerade im Bereich der Entwicklung der Quantencomputer als besonders tragfähig erwiesen.

Aufgabe: Informiere dich über grundlegende Aspekte von Quantencomputern.

2. Basiskonzepte der Physik

EF

2.1 Homogenes elektrisches Feld

Lädt man mittels einer Spannungsquelle die Platten eines Kondensators auf, so bildet sich zwischen den Platten ein Raumbereich, in dem elektrische Kräfte wirken. Dies kann man beispielsweise daran erkennen, dass ein geladenes Kügelchen an einer Schnur hin- und herpendelt.

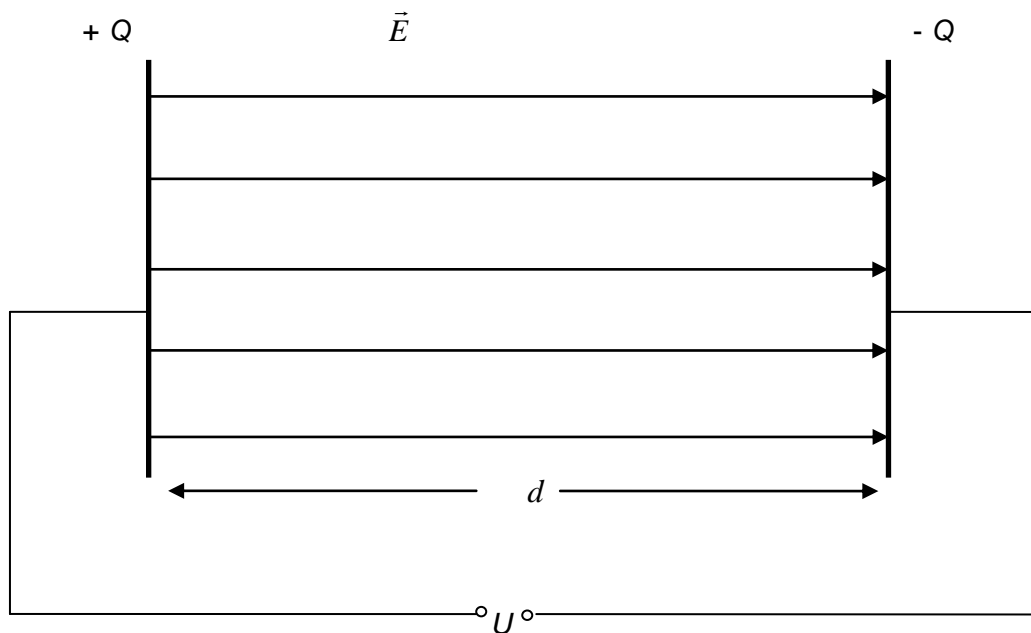


Abb. 1: Homogenes Feld im Plattenkondensator (H. Krämer)

Die Struktur des elektrischen Feldes kann man mittels von **Feldlinien** darstellen, die von der positiv zur negativ geladenen Platte zeigen. Da es sich im Innenraum des Kondensators um ein **homogenes Feld** handelt, werden die Feldlinien parallel und in gleichen Abständen gezeichnet.

Um nun die Stärke eines solchen Feldes quantitativ zu beschreiben, führt man die sog. **elektrische Feldstärke** \vec{E} ein. Ziel ist es eine Größe zu definieren, die unabhängig von der Probeladung die Richtung und Stärke des Feldes charakterisiert. Daher definiert man:

$\vec{E} := \frac{\vec{F}_{el}}{q}$, wobei \vec{F}_{el} die elektrische Feldkraft auf eine Probeladung q darstellt. Im Falle eines

homogenen Feldes ist \vec{E} ein Vektor, dessen Repräsentanten ortsunabhängig an jedem Punkt im Raum die gleiche Richtung und Länge besitzen. Im Fall des homogenen Feldes lässt sich speziell der Betrag der Feldstärke mittels der Gleichung $E = \frac{U}{d}$ berechnen.

Aufgaben:

- [1] An einem Plattenkondensator mit dem Plattenabstand 10 cm liegt eine Spannung von 2000 V an. Berechne den Betrag der elektrischen Feldstärke E .
- [2] Stelle die in [1] berechnete elektrische Feldstärke \vec{E} im obigen Bild maßstabsgerecht mit Hilfe von Pfeilen dar. Wähle dazu verschiedene Punkte im Raumbereich aus, an denen du die Pfeile zeichnest.

MF

2.2 Ladungen in homogenen magnetischen Feldern

Mit Hilfe des Fadenstrahlrohrexperimentes kann man sehr eindrucksvoll die Bewegung von Elektronen in einem homogenen magnetischen Feld untersuchen und dabei auch grundlegende Aspekte über das magnetische Feld lernen. Die untenstehende Abbildung zeigt eine Röhre, die zwischen zwei senkrecht stehenden Helmholtzspulen angebracht ist. In der Kugel befindet sich eine kleine „Elektronenkanone“ bestehend aus einer Anordnung aus einem Glühdraht als Kathode und einer Anode. Die Abbildung zeigt weiterhin ein Netzgerät (links im Bild) zur Versorgung der Röhre mit der notwendigen Heizspannung zur Freisetzung von Elektronen (gelbe Kabel) und der benötigten Beschleunigungsspannung zwischen Kathode und Anode (rote Kabel). Das rechte Netzgerät mit den blauen Kabeln liefert den elektrischen Strom zum Betreiben der Helmholtzspulen und damit zur Erzeugung eines magnetischen Feldes.

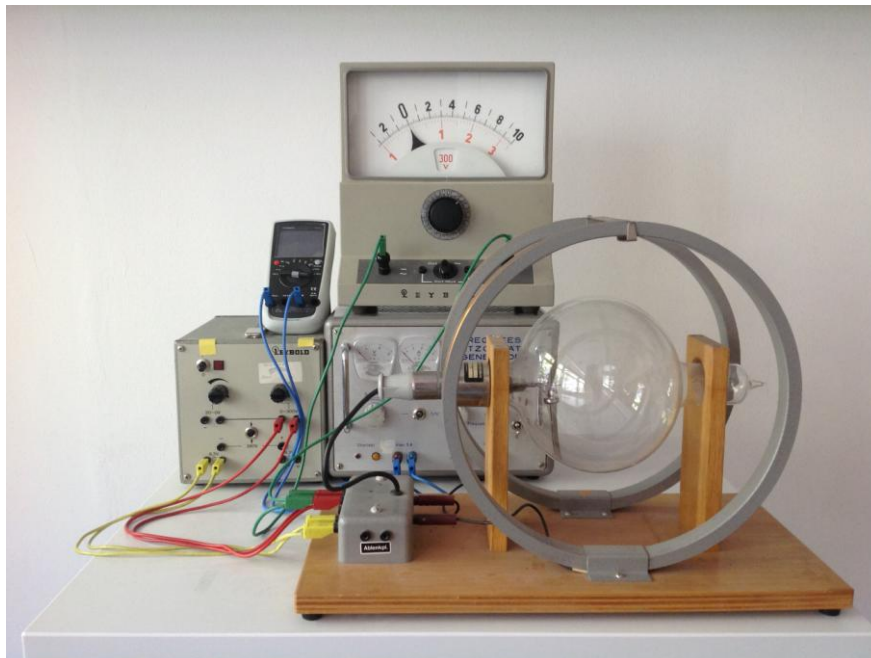


Abb. 2: Versuchsanordnung Fadenstrahlrohr (H. Krämer)

2.2.1 Physikalische Vorgänge im Fadenstrahlrohr

Die wegen des glühelektrischen Effektes an der Kathode austretenden Elektronen werden mittels der Beschleunigungsspannung U_A zur Anode hin gleichmäßig beschleunigt. Sie treten dann in das homogene Magnetfeld ein. Man beobachtet, dass sich die Elektronen auf einer Kreisbahn bewegen, die man im konkreten Experiment als eine bläulich leuchtende Spur registriert. Dies liegt daran, dass die Röhre unter ganz geringem Druck mit Wasserstoff gefüllt ist und daher durch die Stöße mit den Elektronen die Wasserstoffmoleküle energetisch angeregt werden. Jedoch bricht durch die Emission des charakteristischen Lichtes dieser angeregte Zustand der Wasserstoffmoleküle zusammen. Die Kreisbahn der Elektronen entsteht dadurch, dass im magnetischen Feld auf bewegte Ladungsträger eine Kraft wirkt, die man **Lorentzkraft** nennt. Diese wirkt immer senkrecht zur Flugrichtung der Elektronen, was zur Folge hat, dass die Lorentzkraft die Rolle der Zentripetalkraft einer Kreisbewegung einnimmt.

2.2.2 Definition der magnetischen Flussdichte

Eine Möglichkeit, das Experiment quantitativ auszuwerten, besteht nun darin, die Größe der Kreisbahn zu untersuchen. Es lässt sich vermuten, dass der Radius r proportional zum Betrag der Geschwindigkeit v_s der Elektronen ist. Dies kann man in einem Experiment prüfen.

Für eine fest eingestellte Stromstärke in den Helmholtzspulen (damit also für eine bestimmte Stärke des Magnetfeldes) wird für verschiedene Geschwindigkeiten der jeweilige Radius gemessen. Da man allerdings die Bahngeschwindigkeit v_s nicht direkt messen kann, muss man sie mittels der messbaren Beschleunigungsspannung U_A bestimmen. Beispielsweise ergibt sich für $I = 1,0$ A folgende Tabelle:

U_A in V	160	180	200	220	240
v_s in 10^7 ms ⁻¹	7,504	7,959	8,389	8,799	9,180
r in m	0,107	0,111	0,117	0,123	0,129
$\frac{v_s}{r}$ in 10^8 s ⁻¹	7,013	7,170	7,170	7,154	7,124

Tab. 1: Bestimmung des Verhältnisses v_s / r

Die Tabelle zeigt, dass $\frac{v_s}{r}$ näherungsweise konstant und somit r proportional zu v_s ist. Als

Mittelwert für $\frac{v_s}{r}$ ergibt sich $7,126 \cdot 10^8 \frac{1}{s}$.

Diese Beobachtung führt nun zu der Idee, über dieses konstante Verhältnis eine Messgröße für die Stärke des magnetischen Feldes zu definieren: Führt man das Experiment nun für verschiedene Stromstärken und damit für verschieden starke Magnetfelder durch, so erhält man jeweils einen eigenen neuen Werte für das Verhältnis $\frac{v_s}{r}$. Die Idee ist also, jeder Stärke

des Magnetfeldes das dort gültige Verhältnis $\frac{v_s}{r}$ zuzuordnen.

Die folgende Tabelle zeigt exemplarisch für verschiedene Stromstärken die sich ergebenden Werte für $\frac{v_s}{r}$.

I in A (also bestimmte Stärke des Magnetfeldes)	1,0	1,2	1,4	1,6
$\frac{v_s}{r}$ in $10^8 \frac{1}{s}$ (gemittelt)	7,126	8,822	10,324	11,549

Tab. 2: Bestimmung von v_s / r für verschiedene Stromstärken

Da man nun die Bewegung in Magnetfeldern unter Einfluss der Lorentzkraft auch für andere Ladungsträger betrachten kann, ist es sinnvoll, nicht direkt das Verhältnis $\frac{v_s}{r}$ als Maß für die Stärke eines Feldes zu betrachten, sondern dieses nun noch mit charakteristischen Größen wie Masse und Ladung zu „eichen“. Es bietet sich daher als „Eichfaktor“ das Verhältnis $\frac{m_e}{e}$ aus Masse und Ladung von Elektronen an.

Daher kann man nun definieren:

Als Betrag der **magnetischen Flussdichte** definiert man den Term

$$B := \frac{m_e}{e} \cdot \frac{v_s}{r} \quad \text{mit der Einheit } 1 \text{ Tesla} = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{C} \cdot \text{s}}$$

Herleitung einer Gleichung für den Betrag der Lorentzkraft F_L für einzelne Elektronen:

Es gilt ja wegen der Vorgänge im Fadenstrahlrohr:

$F_L = F_Z = m_e \frac{v_s^2}{r}$. Also ergibt sich wegen der obigen Definition $B = \frac{m_e}{e} \cdot \frac{v_s}{r}$ der magnetischen Flussdichte:

$$F_L = m_e \frac{v_s^2}{r} = m_e \frac{\left(\frac{e}{m_e} B r\right)^2}{r} = \frac{e^2}{m_e} \cdot B^2 \cdot r = e \cdot B \cdot \frac{e}{m_e} \cdot B \cdot r = e \cdot v_s \cdot B.$$

Diese Überlegung lässt sich jetzt analog auf andere Ladungsträger übertragen:

Bewegt sich ein Teilchen mit der Ladung q mit der Geschwindigkeit v_s senkrecht zu den Feldlinien eines magnetischen Feldes mit der magnetischen Flussdichte B , so gilt für den Betrag F_L der Lorentzkraft:

$$F_L = q \cdot v_s \cdot B$$

Aufgaben:

- [1a] Berechne für Tabelle 2 nun gemäß der obigen Definition die konkreten Werte für B .
- [1b] Fertige ein I - B -Diagramm an (d.h. I auf der horizontalen Achse) und erkläre, inwiefern dessen Verlauf die Idee der Definition der magnetischen Flussdichte als Messgröße widerspiegelt.
- [2] Berechne für Tabelle 1 für die gegebenen Geschwindigkeiten jeweils den Betrag der Lorentzkraft F_L und bestätige die Proportionalität zwischen F_L und v_s .

EI

2.3 Elektromagnetische Induktion

Mit folgender einfacher Anordnung lässt sich die für unsere alltägliche Umwelt unverzichtbare Erzeugung von Spannungen (elektromagnetische Induktion) verdeutlichen:

Ein Metallstab rollt reibungsfrei auf zwei Metallschienen senkrecht zu einem homogenen magnetischen Feld. Rollt der Stab wie in Abb. 3 beispielsweise nach rechts, so werden in ihm die Elektronen nach rechts transportiert. Somit entsteht also „künstlich“ die Situation, dass Elektronen im Magnetfeld senkrecht zu den Feldlinien bewegt werden. Die wirkende Lorentzkraft führt dazu, dass die Elektronen zum unteren Ende des Stabes transportiert werden, so dass sich dort ein Minuspol aufbaut, am oberen Ende entsprechend ein Pluspol.

Bewegt sich der Stab nun mit konstanter Geschwindigkeit, ist im homogenen Magnetfeld auch die Lorentzkraft konstant. Durch die Elektronenwanderung entsteht im Stab ein sich zunächst ständig verstärkendes elektrisches Feld und somit eine elektrische Feldkraft, die der Elektronenwanderung so lange entgegenwirkt, bis sich ein Kräftegleichgewicht zwischen elektrischer Feldkraft und Lorentzkraft und sich somit eine konstante Spannung einstellt.

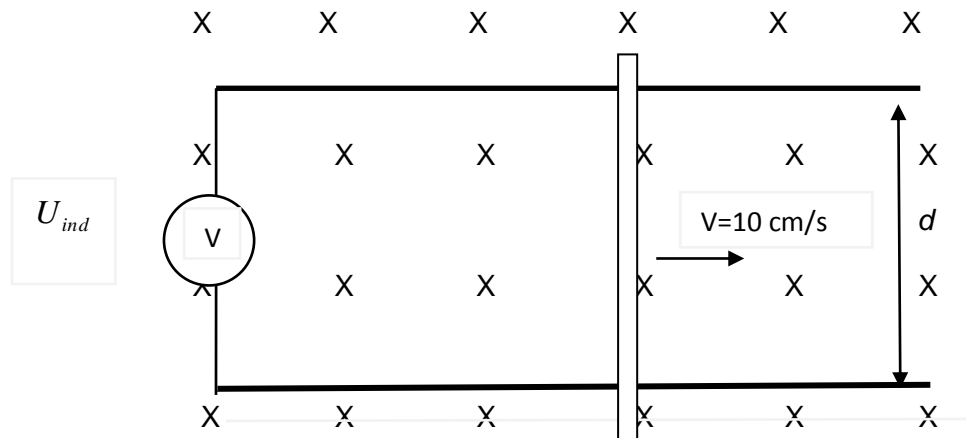


Abb. 3: Induktion bei einem rollenden Stab (H. Krämer)

Man kann nun die induzierte Spannung berechnen:

Im Falle des Kräftegleichgewichtes gilt $\vec{F}_{el} = -\vec{F}_L$ und damit für die Beträge $F_{el} = F_L$. Also

folgt: $e \cdot E = e \cdot \frac{U_{ind}}{d} = e \cdot v \cdot B$ und somit ergibt sich für die induzierte Spannung

$U_{ind} = v \cdot d \cdot B$, wobei d der Abstand zwischen den Schienen darstellt.

Aufgaben:

- [1] Verdeutliche in Abb. 3 zeichnerisch das Kräftegleichgewicht, das für ein Elektron im Stab bei konstanter Induktionsspannung besteht.
- [2] Berechne die induzierte Spannung U_{ind} im obigen Beispiel. Der Schienenabstand soll 20 cm betragen.
- [3] Erläutere für die obige Anordnung Möglichkeiten, wie man die Polung der Spannung umkehren könnte.

Schwingungsvorgänge treten in unserem Alltag auf vielfältige Weise auf. Hierbei kann man beispielsweise an die Erzeugung von Tönen, an Pendelbewegungen bei Uhren und vieles mehr denken. Um oftmals komplexe Schwingungsvorgänge in der Physik beschreiben zu können muss man zunächst vereinfachende Annahmen treffen.

Als Beispiel kann näherungsweise ein Feder-Schwere-Pendel betrachtet werden. Untersucht man das Schwingungsverhalten in Abhängigkeit der Zeit so kann man dies durch ein s - t -Diagramm darstellen. Vernachlässigt man zunächst Dämpfungseffekte, so ergibt sich idealisiert das folgende Schaubild, das dem Verlauf einer Sinusfunktion mit der Amplitude \hat{s} entspricht.

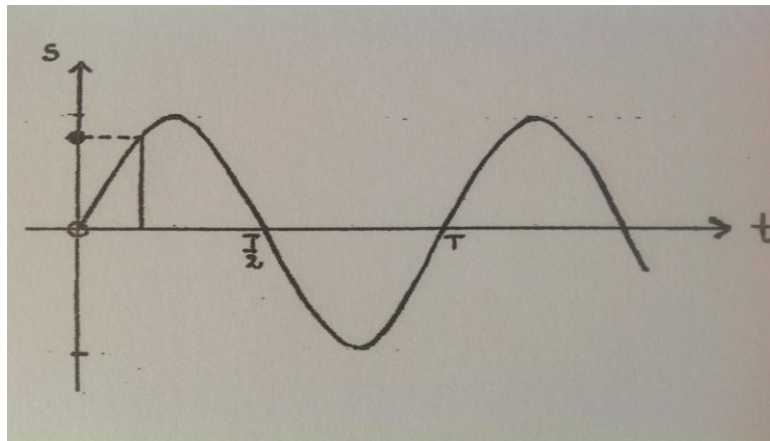


Abb. 4: s - t -Diagramm einer harmonischen Schwingung (H. Krämer)

Startet der Schwinger zum Zeitpunkt $t = 0\text{s}$ in der Ruhelage in Richtung positiver Elongation so kann man als Zeit-Elongation-Gesetz die Funktion $s(t) = \hat{s} \cdot \sin(2\pi f t)$ angeben. Dabei ist \hat{s} die Amplitude und f die Frequenz der Schwingung. In diesem Falle spricht man von einer **harmonischen Schwingung**. Ein wesentlicher Zusammenhang zwischen der Periodendauer T der Schwingung und der Federhärte D der Feder lautet:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}.$$

Betrachtet man die wirkenden Kräfte, so gilt beim Federpendel:

$F(s) = -D \cdot s$, wobei D die Federhärte und $F(s)$ die Rückstellkraft ist. Man kann dies nun auf alle harmonischen Schwingungen übertragen und zeigen, dass immer das lineare Kraftgesetz $F(s) = -D \cdot s$ gilt. Über diese Gleichung kann man auch die harmonische Schwingung definieren.

Aufgaben:

- [1] Fasse wesentliche Merkmale harmonischer Schwingungen zusammen.
- [2] Zeichne das s - t -Diagramm für eine harmonische Schwingung mit der Frequenz 4 Hz und der Amplitude 5 cm. Der Schwinger befinde sich zum Zeitpunkt 0 s in der Ruhelage und schwingt in Richtung der positiven s -Achse.

MW

2.5 Mechanische Wellen



Abb. 5: Wellen im Meer (H. Krämer)

„Welle“ ist ein Begriff, der uns in der Alltagssprache immer wieder begegnet: Wellen im Meer, Funkwellen, Schallwellen, Wellenreiten... Aber wie werden in Anlehnung an die Anschauung nun in der Physik Wellen beschrieben? Wir betrachten in diesem Kapitel zunächst nur solche Wellen, die zur Ausbreitung ein Medium benötigen, also beispielsweise Wasserwellen (Medium Wasser) oder Schallwellen (Medium Luft). Man nennt solche Wellen auch **mechanische Wellen**.

Um das Ausbreitungsverhalten einer Welle nun genauer zu verstehen, betrachten wir ein mechanisches Modell einer Welle: Es besteht aus einer linearen Anordnung von Teilchen, die elastisch miteinander verbunden sind. Diese Anordnung nennt man den **Wellenträger**. Das folgende Bild zeigt eine Momentaufnahme der Ausbreitung einer Welle.



Abb. 6: Wellenmaschine (H. Krämer)

Eine mechanische Welle entsteht dadurch, dass das erste Teilchen (**Wellenerreger**) zu einer Schwingung angeregt wird, die sich dann zeitlich versetzt auf die anderen Teilchen überträgt. Es überträgt sich also lediglich die Schwingungsbewegung, während die Teilchen an ihrer Stelle ortsfest bleiben. Die Folge davon ist, dass sich bei der obigen Wellenmaschine **Wellenberge** und **-täler** bilden.

Führt der Wellenerreger eine harmonische Schwingung aus und übernehmen die übrigen Teilchen der Reihe nach zeitlich konstant versetzt diese Schwingung, so spricht man von einer **harmonischen Welle**.

Wichtig ist also zu sehen, dass bei einer Welle keine Materie, sondern Energie transportiert wird!

Man unterscheidet nun zwei Arten der Ausbreitung einer Welle: Führen die Teilchen nun die Schwingungsbewegung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung durch, so nennt man dies eine **Transversalwelle**. Hierbei bilden sich wie beim Modell oben oder bei Wasserwellen deutlich sichtbare Berge und Täler aus. Im anderen Falle bei paralleler Schwingung zur Ausbreitungsrichtung spricht man von einer **Longitudinalwelle**. Ein wichtiges Beispiel hierfür wäre die Schallwelle. Für diese Wellenart ist charakteristisch, dass sich Verdichtungen und Verdünnungen bilden und sich entlang des Wellenträgers fortpflanzen. Ein Modell für eine Longitudinalwelle ist die Magnetrollenbahn:

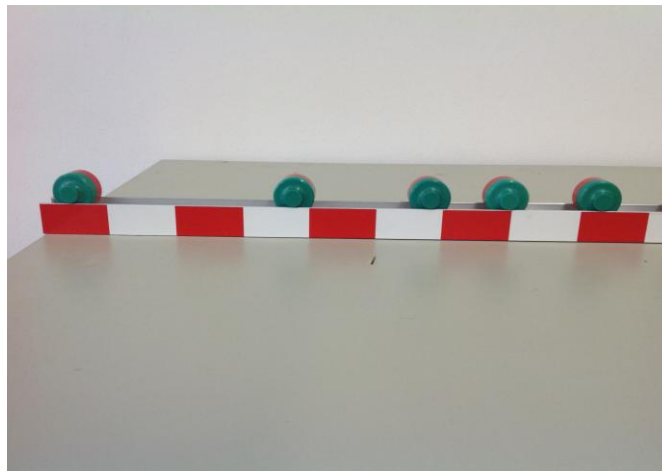


Abb. 7: Magnetrollenbahn (H. Krämer)

Eine sehr charakteristische Größe für die Beschreibung von Wellen ist die **Wellenlänge** λ . Sie ist definiert durch den Abstand zweier benachbarter Teilchen des Wellenträgers, die phasengleich zueinander schwingen. Anschaulich bedeutet dies, dass man die Wellenlänge beispielsweise folgendermaßen einzeichnen kann:

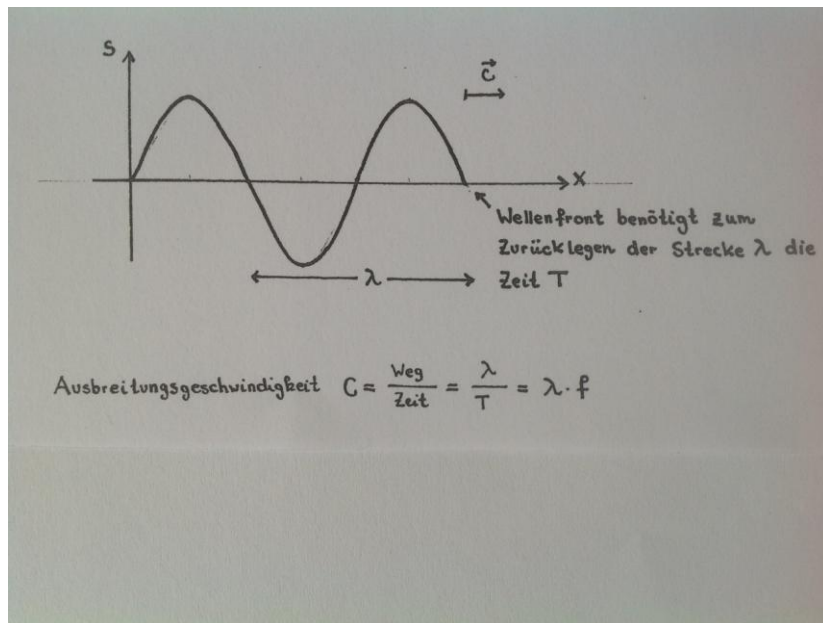


Abb. 8: Momentanbild einer Transversalwelle (H. Krämer)

In Abbildung 8 nennt man den Beginn der Störung auch die **Wellenfront**. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c einer Welle definiert sich als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfront. Breitet sich diese gleichförmig aus, so kann diese mittels der Gleichung $c = \lambda \cdot f$ berechnen. Dabei ist f die **Frequenz der Welle**. Dies ist die Anzahl der Schwingungen, die ein Teilchen des Trägers in einer bestimmten Zeit ausführt.

iw

2.6 Interferenz bei Wellen

Wenn sich Wellen treffen und dabei überlagern, kommt es zu besonderen Phänomenen, die in der Anwendung der Wellentheorie in der Optik wie auch in der Quantenphysik von besonderer Bedeutung sind.

Um nun die Vorgänge bei der Interferenz von Wasserwellen experimentell zu untersuchen, kann man eine Wellenwanne verwenden, in der die Überlagerung von kreisförmigen Wellen untersucht wird.

Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Ausbreitung der Wellen aus der „Vogelperspektive“: Zwei Erreger erzeugen gleichphasige Kreiswellen mit konstanter Frequenz. Die Kämme der Wellenberge seien hier als durchgezogene Kreise und die Sohlen der Täler als gestrichelte Kreise gekennzeichnet. Treffen nun bspw. Berge und Berge (oder Täler und Täler) aufeinander, so verstärken sich die Wellen, d.h. die Amplituden addieren sich maximal. Man spricht von **konstruktiver Interferenz**. Treffen Täler auf Berge, so löschen sich diese gegenseitig aus (**destruktive Interferenz**).

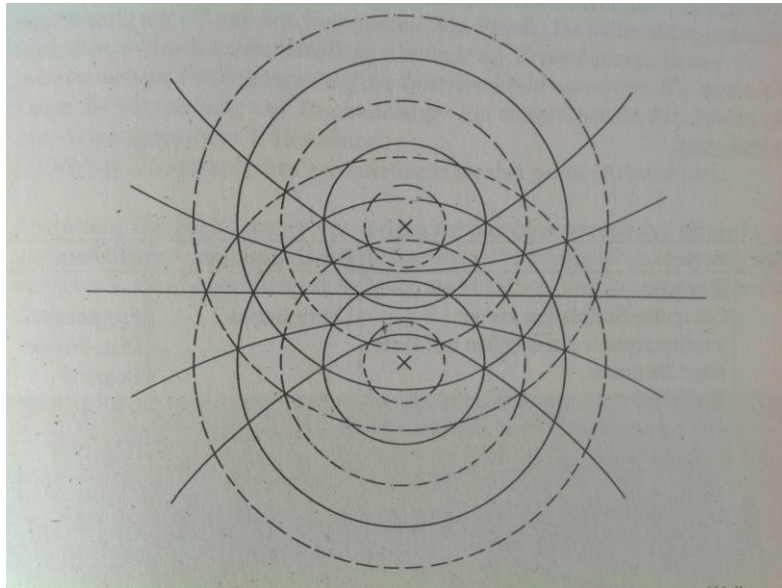


Abb. 9: Interferenz von Wasserwellen (schematisch, H. Krämer)

Markiert man nun Punkte mit konstruktiver und destruktiver Interferenz und verbindet diese, so stellt man fest dass es bestimmte Linien der Verstärkung und Abschwächung gibt. (s. Abb. 9). Verbindet man nun einen Punkt auf einer solchen Linie mit den Erregerzentren, so erhält man zwei Strecken, deren Längenunterschied man als **Gangunterschied** Δs bezeichnet.

Für Punkte mit konstruktiver Interferenz gilt: Der Gangunterschied ist ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge: $\Delta s = k \cdot \lambda$ mit $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$

Für Punkte mit destruktiver Interferenz gilt: Der Gangunterschied ist ein ungeradzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge: $\Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ mit $k \in \{0, 1, 2, \dots\}$

Analog zu den Wasserwellen kann man auch in der Optik die Wellentheorie anwenden. Beispielsweise bei Laserlicht handelt es sich um monochromatisches kohärentes Licht. Dies bedeutet, dass es sich um Licht quasi einer Wellenlänge handelt, wobei zwischen den Wellenzügen eine konstante Phasendifferenz besteht. Die folgende Abbildung zeigt schematisch ein Experiment, bei dem rotes Laserlicht auf einen Doppelspalt geschossen wird. An der Projektionswand beobachtet man nun in entsprechendem Abstand ein Muster heller und dunkler Bereiche.

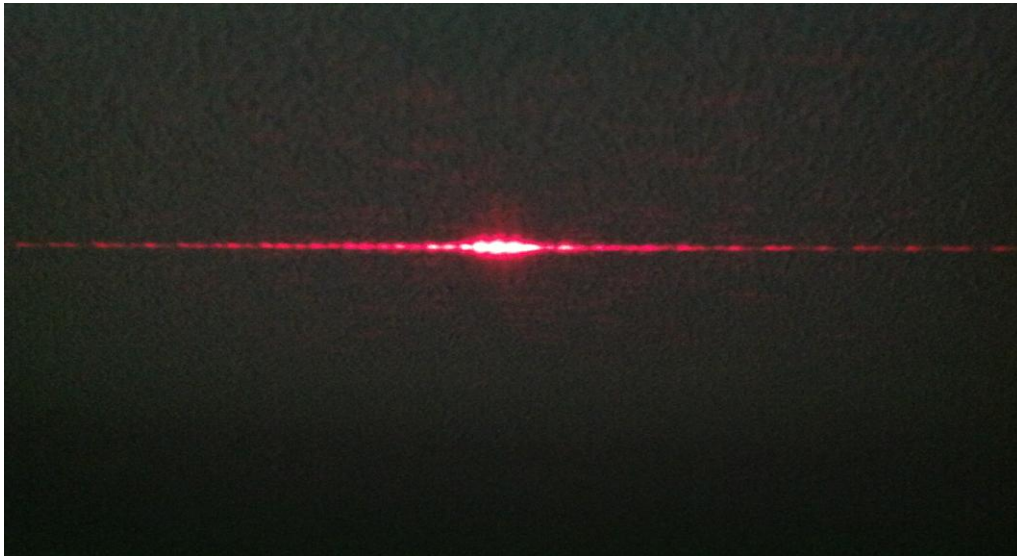


Abb. 10: Interferenzmuster (H. Krämer)

Dieses Muster kann man als Folge der Interferenz der Wellen des Laserlichtes hinter dem Doppelspalt interpretieren. Die Wellen des Lichtes werden an den Spalten gebeugt. Nach dem Huygens'schen Prinzip entstehen hinter dem Doppelspalt kreisförmige Elementarwellen, die sich dann überlagern. Aufgrund der kleinen Abstände der Maxima ist ein entsprechendes Muster erst in einem verhältnismäßig großen Abstand am Projektionsschirm zu beobachten.

Die Lage der Maxima kann mit Hilfe der Gleichungen $\sin \alpha_k = \frac{k \cdot \lambda}{g}$ und $\tan \alpha_k = \frac{d_k}{l}$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$ berechnet werden. Dabei bedeutet:

α_k : k-ter Beugungswinkel, k : Maximum k-ter Ordnung, λ : Wellenlänge des Laserlichtes
 g : Gitterkonstante, d_k : Abstand des Hauptmaximums zum Maximum k -ter Ordnung,
 l : Abstand zwischen Doppelspalt und Schirm

IE

2.7 Interferenz bei Elektronen

Die im vorigen Kapitel dargestellten Phänomene bei der Interferenz von Wellen können nun erstaunlicherweise auch bei anderen mikrophysikalischen Experimenten bspw. mit Elektronen beobachtet werden. Das folgende Bild zeigt einen entsprechenden Versuchsaufbau: Neben Netzgeräten zur Spannungsversorgung ist die **Elektronenbeugungsröhre** im Stativ das Herzstück des Experimentes.

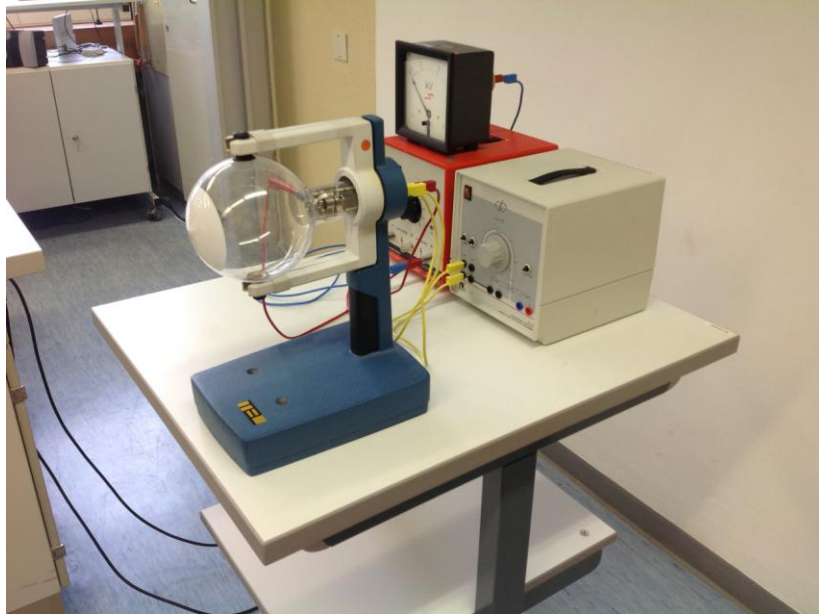


Abb. 11: Versuchsaufbau Elektronenbeugungsröhre (H. Krämer)

Durch Anlegen einer Heizspannung von $U_H = 6 \text{ V}$ treten wegen des glühelektrischen Effektes Elektronen aus der Kathode aus. Diese werden aufgrund der angelegten Beschleunigungsspannung $U_A = 3 \text{ kV}$ zur Anode hin beschleunigt und treffen dann auf das zu untersuchende Target, das aus polykristallinem Grafit besteht. Dies bedeutet, dass dort auf einem Netz ganz fein zermahlenes Grafit-Pulver aufgetragen ist. Die Elektronen werden an dem Target nun dreidimensional in Richtung des Schirmes gestreut. Auf dem Schirm beobachtet man allerdings nun eine bestimmte Anordnung hell leuchtender konzentrischer Kreise. Man nennt diese **Debye-Scherrer-Ringe**.

Eine Deutung dieser Ringe besteht darin, dass man sie als Maxima einer Interferenz auffasst und man somit die Elektronen im Wellenbild darstellt. Damit kann ihnen eine Wellenlänge λ zugeordnet werden. Somit ist dieses Experiment ein wichtiger Hinweis für die Existenz sog. **Materiewellen**. Da man in anderen Experimenten, bspw. beim Fadenstrahlrohr, mit dem Teilchenbild von Elektronen arbeitet, war es ein Postulat von De Broglie, anzunehmen, dass man dann auch typische Größen des einen und anderen Bildes miteinander verknüpfen können müsste. Die Annahme lautet:

Der Impuls p (Teilchenbild) und Wellenlänge λ (Wellenbild) der Elektronen lassen sich über die sog. **De-Broglie-Beziehung**

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \text{mit dem Planckschen Wirkungsquantum } h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

verknüpfen.



Abb. 12: Debye-Scherrer-Ringe (H. Krämer)

Der Impuls der Elektronen hängt von der Beschleunigungsspannung U_A ab und kann mittels des Energieerhaltungssatzes bestimmt werden. Es gilt $\frac{1}{2}m_e v^2 = e \cdot U_A$, woraus sich die Gleichung $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_A}{m_e}}$ ergibt. Aufgrund der noch verhältnismäßig niedrigen Beschleunigungsspannung kann der Ansatz in klassischer Form gewählt werden. Daher bedeutet hier $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ die Ruhemasse der Elektronen. Da man die Wellenlänge für eine bestimmte Beschleunigungsspannung separat aus dem Radius der Ringe bestimmen kann, lässt sich in diesem Experiment die De-Broglie-Beziehung bestätigen. Dieses Experiment ist Ausgangspunkt für unterschiedliche interessante Fragestellungen und Analogien zu anderen Themen, so dass dieses in den folgenden Kapiteln immer wieder aufgegriffen wird.

Aufgaben:

- [1] Elektronen werden in der Röhre mit der Beschleunigungsspannung $U_A = 3 \text{ kV}$ beschleunigt. Berechne die De-Broglie-Wellenlänge für die Elektronen in diesem Falle.
- [2] Im obigen Bild sieht man die konzentrischen Debye-Scherrer Ringe, allerdings sind sie auf dem Schirm nicht zentriert, so dass das Zentrum des Hauptmaximums nicht mit dem Mittelpunkt des Schirms übereinstimmt. Erläutere wie man dies experimentell korrigieren kann.

3. Physikalisches Interpretieren

Im Physikunterricht hast Du sicherlich jetzt schon eine Menge ganz unterschiedlicher Phänomene, Gesetzmäßigkeiten und Konzepte kennengelernt. In diesem Kapitel hast du die Möglichkeit diese zu wiederholen und zu vertiefen, da diese auch in den folgenden Kapiteln teilweise wiederbenötigt und vernetzt werden. Die Idee der folgenden Kapitel besteht darin, dass du quasi kommentarlos Abbildungen verschiedenartiger Anordnungen und Texte erhältst und du diese interpretieren sollst.

3.1 Interpretieren physikalischer Anordnungen und Systeme

Im folgenden siehst du Abbildungen, die schematisch Anordnungen von physikalischen Situationen darstellen. Als Hinweise sind bestimmte Zahlenwerte und sonstige Angaben wie Größensymbole und dergleichen gegeben

Damit du aber nicht ganz orientierungslos bist, bekommst du eine „Interpretationsanleitung“ anhand derer du die Abbildungen durcharbeiten kannst.

1. Beschreibe die im Bild dargestellte Situation.
2. Erläutere die dargestellten physikalischen Vorgänge oder Zustände.
3. Benenne die auftretenden Größen und beschreibe ihre Bedeutung.
4. Berechne die fehlenden Größen (gekennzeichnet mit ?).
5. Ergänze gegebenenfalls die Zeichnung durch weitere Elemente, die deiner Ansicht nach bei der Interpretation hilfreich sind (z.B. Feldlinien, Kraftpfeile) .
6. Erfinde eigene Fragestellungen an die dargestellte Situation.
7. Entwickle und zeichne Varianten zu der dargestellten Anordnung.

3.1.1 Elektrische und magnetische Felder

EF

Beispiel 1: Homogenes elektrisches Feld

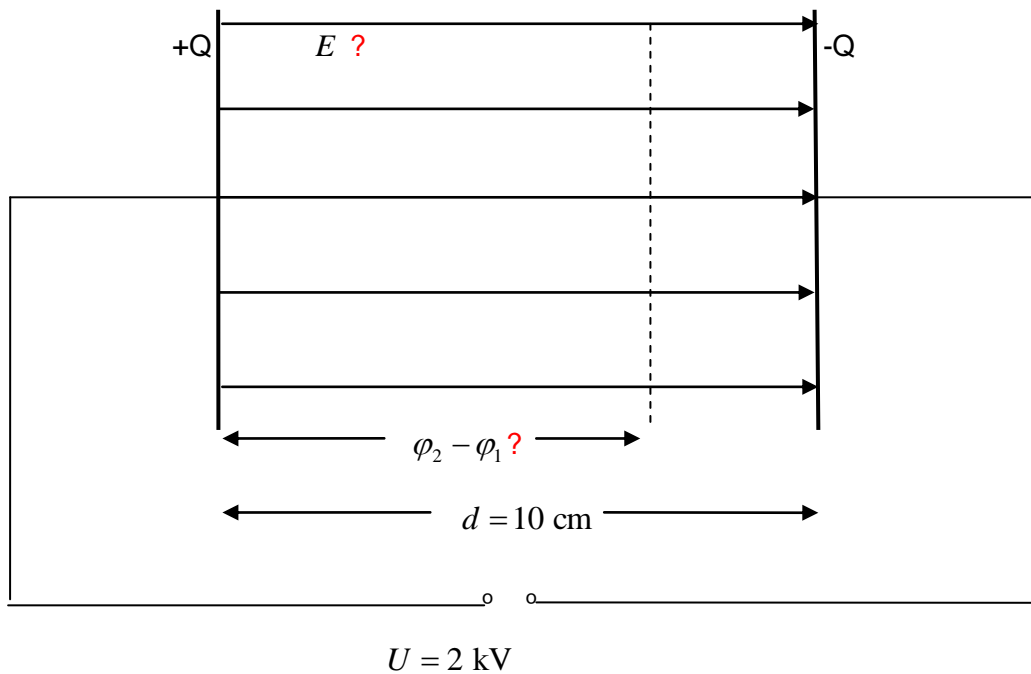


Abb. 13: homogenes elektrisches Feld (H. Krämer)

EF

Beispiel 2: Linearbeschleuniger

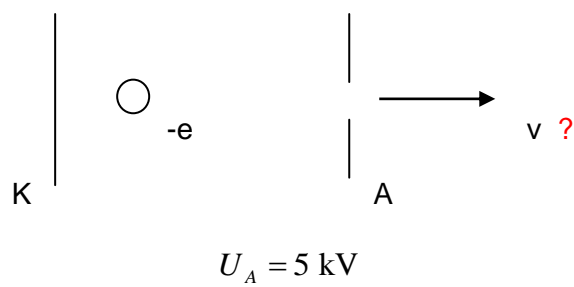


Abb. 14: Linearbeschleuniger (H. Krämer)

EF

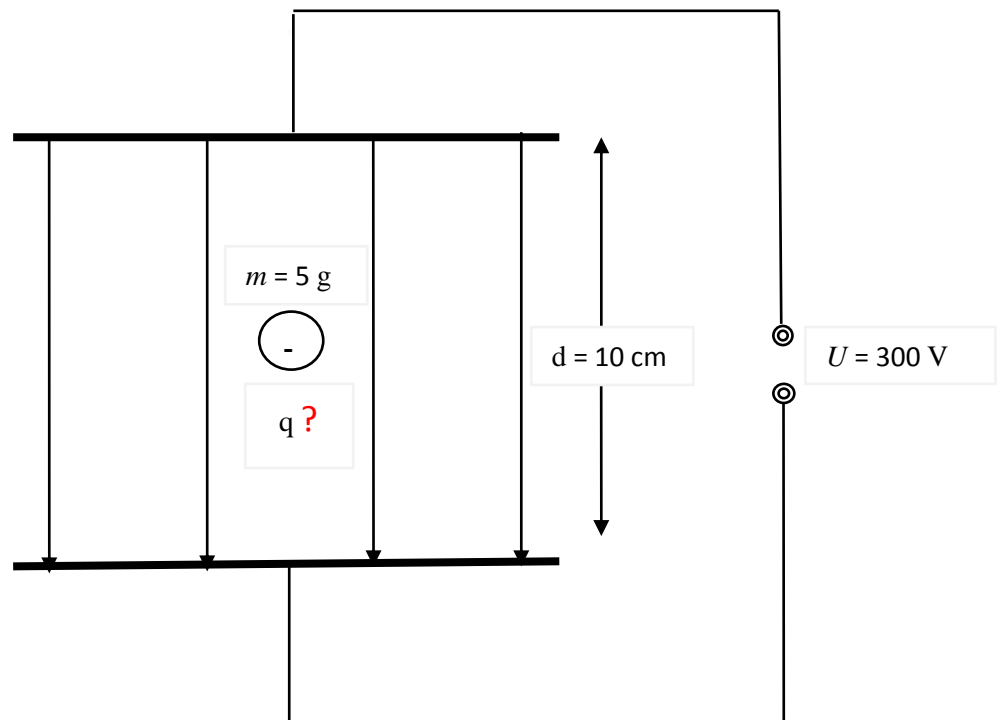
Beispiel 3: Schwebendes Teilchen im vertikalen homogenen elektrischen Feld unter Berücksichtigung des Schwerfeldes der Erde

Abb. 15: vertikales homogenes Feld (H. Krämer)

EF

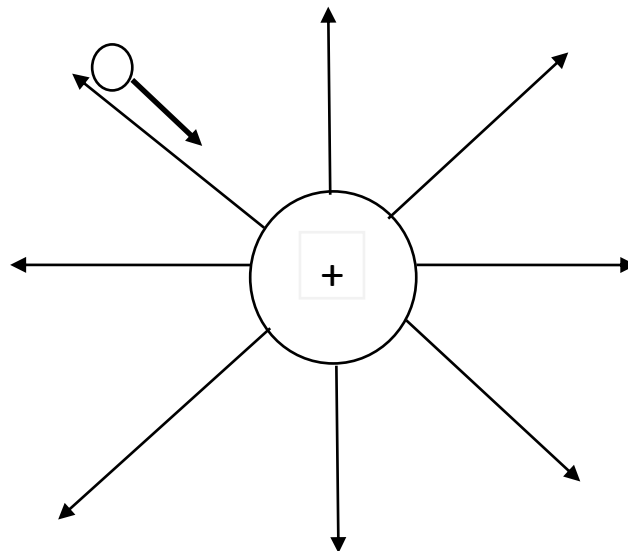
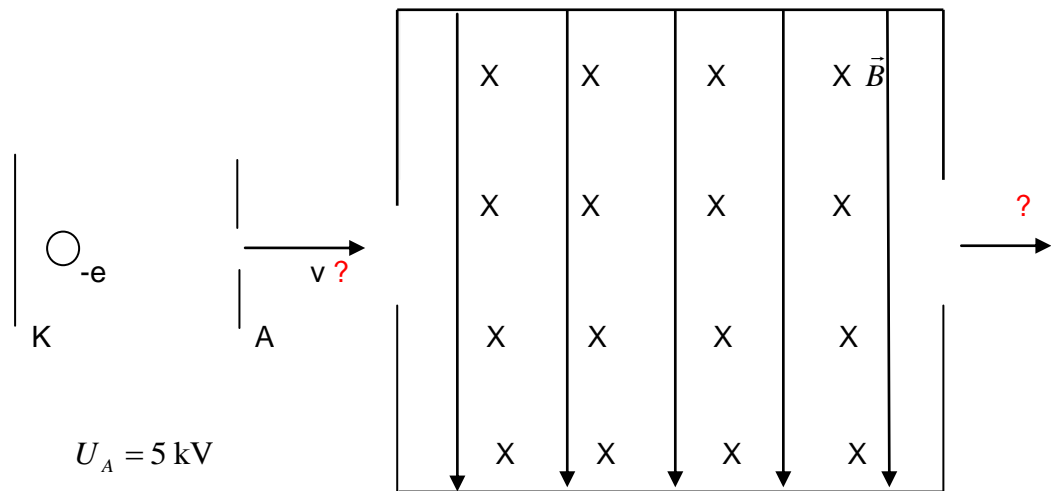
Beispiel 4: Radiales elektrisches Feld

Abb. 16: radiales elektrisches Feld (H. Krämer)

EF

Beispiel 5: Bewegung von Ladungen in senkrecht gekreuzten Feldern

MF



$$E = 50 \frac{\text{kV}}{\text{m}} \quad B = 1 \text{ mT}$$

Abb. 17: Ladungen in senkrecht gekreuzten Feldern (H. Krämer)

EF

Beispiel 6: Induktion an einem bewegten Leiter

MF

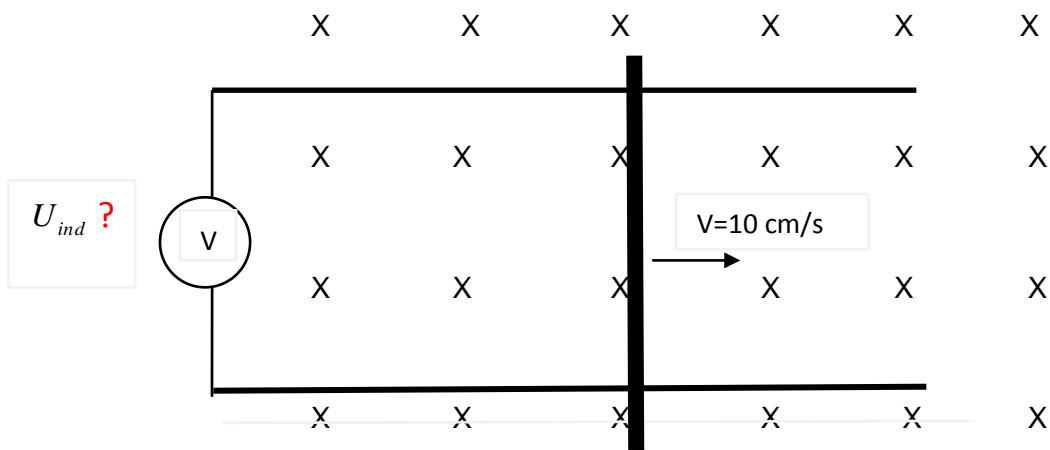


Abb. 18: Induktion an einem bewegten Leiter (H. Krämer)

3.1.2 Schwingungen und Wellen

HS

Beispiel 1: Horizontaler Federschwinger

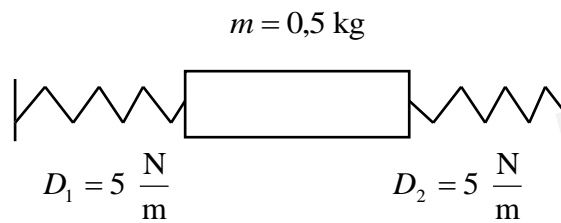


Abb. 19: Horizontaler Federschwinger (H. Krämer)

MW

Beispiel 2: Wellenwanne mit gleichphasig schwingenden Erregern in A und B

IW

$$\lambda = 2 \text{ cm}$$

E X ?

A X

D X ?

C X ?

B X

Abb. 20: Punkte in Wellenwanne (H. Krämer)

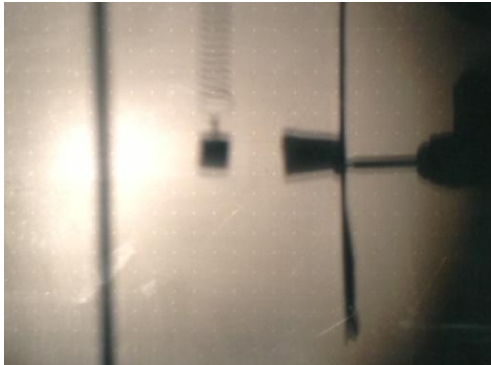
3.2 Physikalisches Interpretieren experimenteller Situationen

Aufgabe:

Die folgenden Abbildungen zeigen Dir beobachtete Situationen von Experimenten.

[1] Erkläre wie die Abbildungen experimentell zustande gekommen sein könnten.

[2] Gib jedem Bild einen passenden Titel und schreibe ihn rechts neben das Bild.



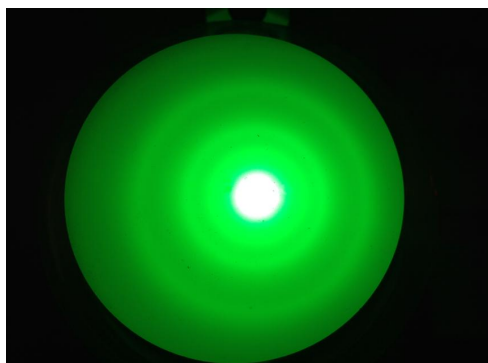
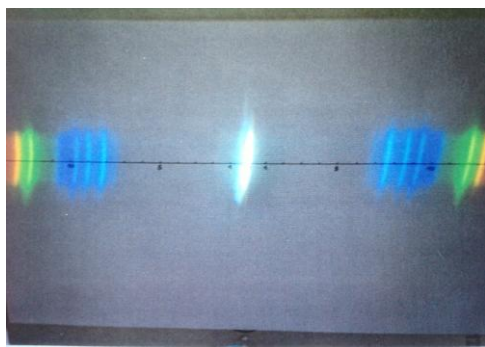
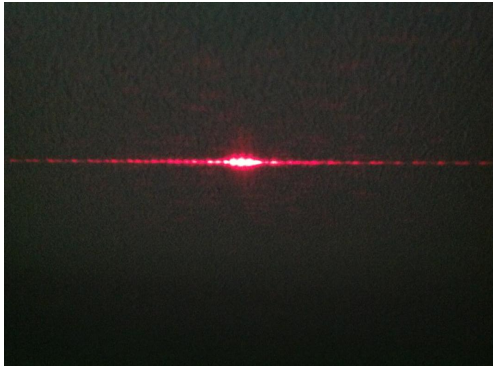




Abb. 21: Beobachtungen bei Experimenten (H. Krämer)

3.3 Physikalisches Interpretieren von Texten aus Umwelt und Technik

In vielen Zeitungsartikeln, Fachzeitschriften sowie auch im Internet findet man immer wieder interessante Texte, die über neueste technische Erfindungen und Fortschritte berichten. Oftmals ist es so, dass sich dann bestimmte physikalische Vorgänge dahinter verbergen, die du nun mit deinen Fachkenntnissen aufspüren kannst. Da solche technischen Texte oft anspruchsvoll sind, kannst du nun anhand des folgenden Beispiels konkret üben, wie man solche Artikel sinnvoll aus physikalischer Perspektive bearbeiten kann, damit du die wesentlichen Vorgänge erkennen kannst, die sich hinter dem technischen Beispiel verbergen. Wie in Kapitel 3.1 erhältst du eine Interpretationsanleitung, die dir als Leitfaden bei der Erarbeitung der Textbeispiele dienen kann.

1. Fasse die wesentlichen Aussagen des Textes stichpunktartig zusammen.
2. Markiere physikalische Fachbegriffe und grenze sie dadurch von der Alltagssprache ab.
3. Überlege mittels Schritt 2, welcher physikalische Vorgang oder Zustand sich hinter dem technischen Beispiel verbirgt und stelle diesen zusammenfassend dar.
4. Fertige gegebenenfalls eine Skizze an, die nur die physikalischen Grundlagen des technischen Beispiels darstellt.

Damit du dir die Durchführung dieser Interpretationsschritte besser vorstellen kannst, dient das folgende Beispiel als Muster:

Damit in Kohlekraftwerken die durch den Verbrennungsprozess anfallende Asche nicht ungehindert in die Luft entweichen kann, muss man dafür sorgen, dass die entstehenden Verbrennungsgase gereinigt werden. Dazu wird ein Verfahren verwendet, das mit elektrischen Ladungen arbeitet. Die Abgase werden dabei durch spezielle Filterzellen geblasen. Diese bestehen aus jeweils zwei **positiv geladenen Platten**, zwischen denen die Abgase durchströmen. Im Innern der Zellen verlaufen stark **negativ geladene Drähte**, so dass die Staubpartikel von diesen beim Durchflug durch die Zelle regelrecht mit **Elektronen** besprüht werden. Dadurch werden die Partikel negativ aufgeladen und von einer der Platten in der Zelle **angezogen**. Zunächst haften die Partikel an der Platte. Um den Staub nun entsorgen zu können, werden die Platten gerüttelt, so dass die Asche dann nach unten fällt und über einen Spülvorgang entsorgt werden kann.

Interpretationsschritte:

1. Zusammenfassung der wesentlichen Aussagen:

Ziel: Entstaubung der Abgase

Vorgehen: Partikel mit Elektronen besprüht (Sprühdrahte) → werden von positiv geladenen Platten angezogen → haften an den Platten und werden dann abgerüttelt.

2. Siehe Text (gelb markiert)

3. Die negativ aufgeladenen Staubpartikel werden mittels der elektrischen Feldkraft angezogen und haften zunächst an der positiv geladenen Platte aufgrund der Anziehungskräfte zwischen den unterschiedlichen Ladungen zwischen Partikel und Platte.

4. Skizze:

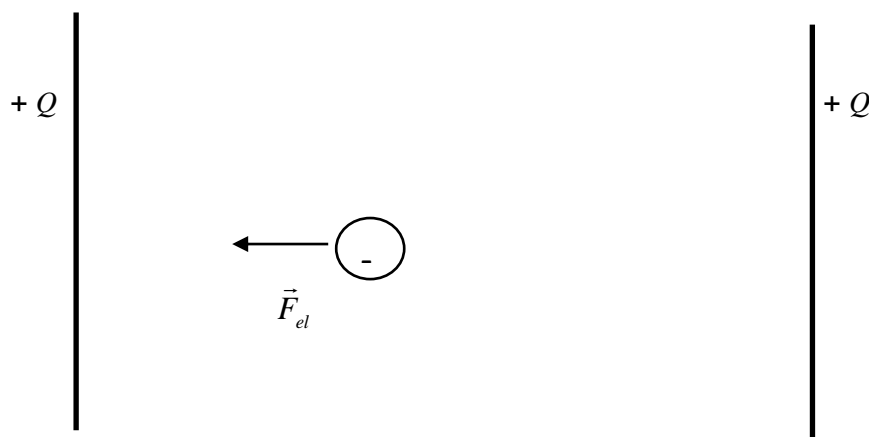


Abb. 22: Vorgänge in einer Entstaubungsanlage (H. Krämer)

4. Experimente planen und durchführen

Das Experimentieren ist sicherlich als eine der grundlegenden Arbeitsmethoden der Physik zu bezeichnen. Im folgenden Kapitel hast du die Möglichkeit dich mit den verschiedenen Schritten des Experimentierens vertraut zu machen.

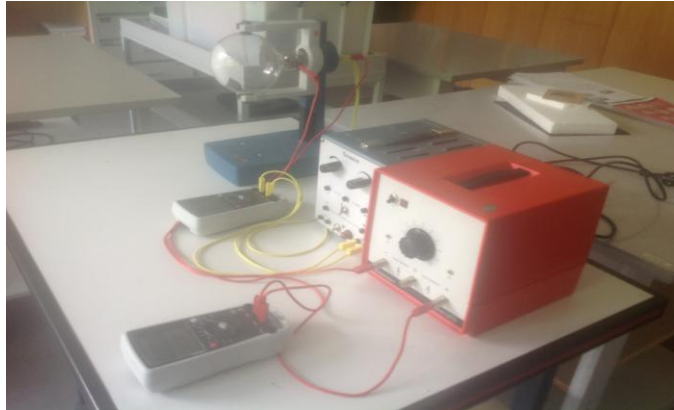


Abb. 23: Versuchsaufbau mit Messgeräten (H. Krämer)

Anfangen von der Bildung von Hypothesen bis hin zur Durchführung und Auswertung kannst Du wesentliche Schritte des Experimentierens in praktischen Beispielen erarbeiten. Damit kannst Du wesentliche Kompetenzen erwerben um auch eigene Experimente planen und durchführen zu können.

4.1 Aspekte der Planung von Experimenten

4.1.1 Hypothesen formulieren

Wenn Experimente geplant werden, steht zunächst eine durchaus offene Problemstellung im Vordergrund, die untersucht werden soll. Oftmals bilden sich Vermutungen, die dann näher verfolgt werden. Damit eine solche Vermutung aber gezielt betrachtet werden kann, muss diese in eine Aussage gekleidet werden, die dann über ein Experiment gezielt bestätigt oder widerlegt wird. Eine solche Aussage nennt man **Hypothese**.

Wir betrachten ein Beispiel:

Problemstellung	Hypothese	Messverfahren
Untersuche das Magnetfeld im Innern einer langgestreckten, stromdurchflossenen Spule	Das Magnetfeld wird vermutlich im Innern relativ homogen sein.	Im Innern der langgestreckten Spule besteht bei konstanter Stromstärke eine konstante magnetische Flussdichte .

Wie in diesem Beispiel kann es natürlich zu einer Fragestellung mehrere denkbare Vermutungen und Hypothesen geben, die dann in verschiedenen Experimenten untersucht werden können. Dabei gibt es wesentliche Kennzeichen bei der sprachlichen Formulierung einer Hypothese:

1. Die Hypothese ist in Form eines Aussagensatzes formuliert.
2. Sie beinhaltet konkrete Aussagen über messbare Größen.
3. Die Aussage ist (quantitativ) prüfbar.

Diese Kennzeichen von Hypothesen zeigen die entscheidende Rolle von messbaren Größen: Sie machen die Prüfbarkeit von Hypothesen „greifbar“.

[1] Formuliere zu folgenden Problemstellungen eine passende Hypothese.
Ergänze die Tabelle.

Problemstellung	Hypothese	Messverfahren
Untersuche das Magnetfeld im Innenbereich eines Hufeisenmagneten		
Untersuche den Widerstand einer Glühlampe.		
Untersuche das elektrische Feld eines Plattenkondensators.		
Untersuche das elektrische Feld einer geladenen Konduktorkugel.		

Tab. 3: Beispiele für Hypothesenbildungen

[2] Formuliere zur folgenden Problemstellung verschiedene denkbare Hypothesen.

Untersuche das Verhalten von bewegten Elektronen in einem magnetischen Feld.

4.1.2 Experimente in verschiedenen Richtungen interpretieren

Bei vielen Experimenten ist es durchaus möglich, dass unterschiedliche Ziele mit ein und demselben Versuch verfolgt werden können. Dies bedeutet, dass unterschiedliche Größen damit bestimmbar sind. Daher musst du dich bei der Planung genau mit der Frage beschäftigen welches Messziel du mit deinem Experiment verfolgst. Das folgende Beispiel zeigt Möglichkeiten einer unterschiedlichen Interpretation eines Experimentes.

MF

Beispiel: Das Fadenstrahlrohr – eine vielfältige Wunderkugel?

Beim Fadenstrahlrohr kann man mittels der Gleichung $\frac{e}{m} = \frac{2U_A}{B^2 r^2}$ die spezifische Ladung und damit die (Ruhe-) Masse der Elektronen bestimmen. Man kann aber auch dieses Experiment in ganz andere Richtungen deuten und einsetzen.

Bestimmbare Größe	Funktion des Fadenstrahlrohres
Spezifische Ladung e/m	Elektronenwaage
Magnetische Flussdichte B	Ersetzt eine Hallsonde
Spannung U_A	Spannungsmesser (Bereich 150 V bis 300 V)
Stromstärke I	Stromstärkemessgerät
Kraft F_Z	Kraftmesser

Aufgaben:

[1] Betrachte das Beispiel der Möglichkeit von Messungen der magnetischen Flussdichte mit Hilfe des Fadenstrahlrohres (Zeile 2 Tabelle oben). Die folgenden Teilaufgaben stellen gleichzeitig die Vorgehensweise zusammen.

[1a] Löse die obige Gleichung nach B auf.

[1b] Plane nun ein Messverfahren zur Bestimmung von B . Überlege dir welche Größen du als bekannt annehmen musst und welche du variabel verändern kannst.

[1c] Führe für ein bestimmtes Magnetfeld die Messung durch und bestimme B .

[2] Führe Aufgabe [1] nun auch für die anderen Einsatzmöglichkeiten des Fadenstrahlrohres durch. Da Stromstärke und Kraft nicht direkt in der obigen Gleichung enthalten sind musst du dir Verbindungsgleichungen überlegen.

- [3] Beurteile die realistische praktische Anwendbarkeit der einzelnen denkbaren Funktionen des Fadenstrahlrohres in der obigen Tabelle.
- [4] Überlege bei folgenden Experimenten welche unterschiedlichen Messziele denkbar sind.
- [4a] Ein Laserstrahl wird auf ein Gitter geschossen. Es wird das entstehende Interferenzbild untersucht.
- [4b] Elektronen werden auf ein Grafitgitter geschossen. Es entstehen sog. Debye-Scherrer-Ringe.
- [5] Stelle weitere Versuche aus dem Unterricht zusammen, bei denen verschiedene Messziele verfolgt werden können.

4.1.3 Theorie als „Lupe“ in die Mikrowelt?

Ein wesentliches Ziel von Experimenten besteht darin, bestimmte Größen zu messen, die dann physikalisch interpretiert werden. Oftmals ist es aber so, dass man die zu bestimmende Größe nicht direkt messen kann, sondern nach Messung bestimmter Größen mit Hilfe von theoretischen Ansätzen erst bestimmt werden kann. Daher musst du dir bei der Planung von Experimenten bewusst werden, wie du bestimmte Messziele erreichst. Insbesondere bei der Erforschung der Materie tritt dies wesentlich zutage. Dort stellt die Theorie eine Art „Lupe“ in die Mikrowelt dar. Das folgende Beispiel zeigt die Verzahnung von Messung und Theorie bei der Bestimmung der spezifischen Ladung der Elektronen beim Fadenstrahlrohr.

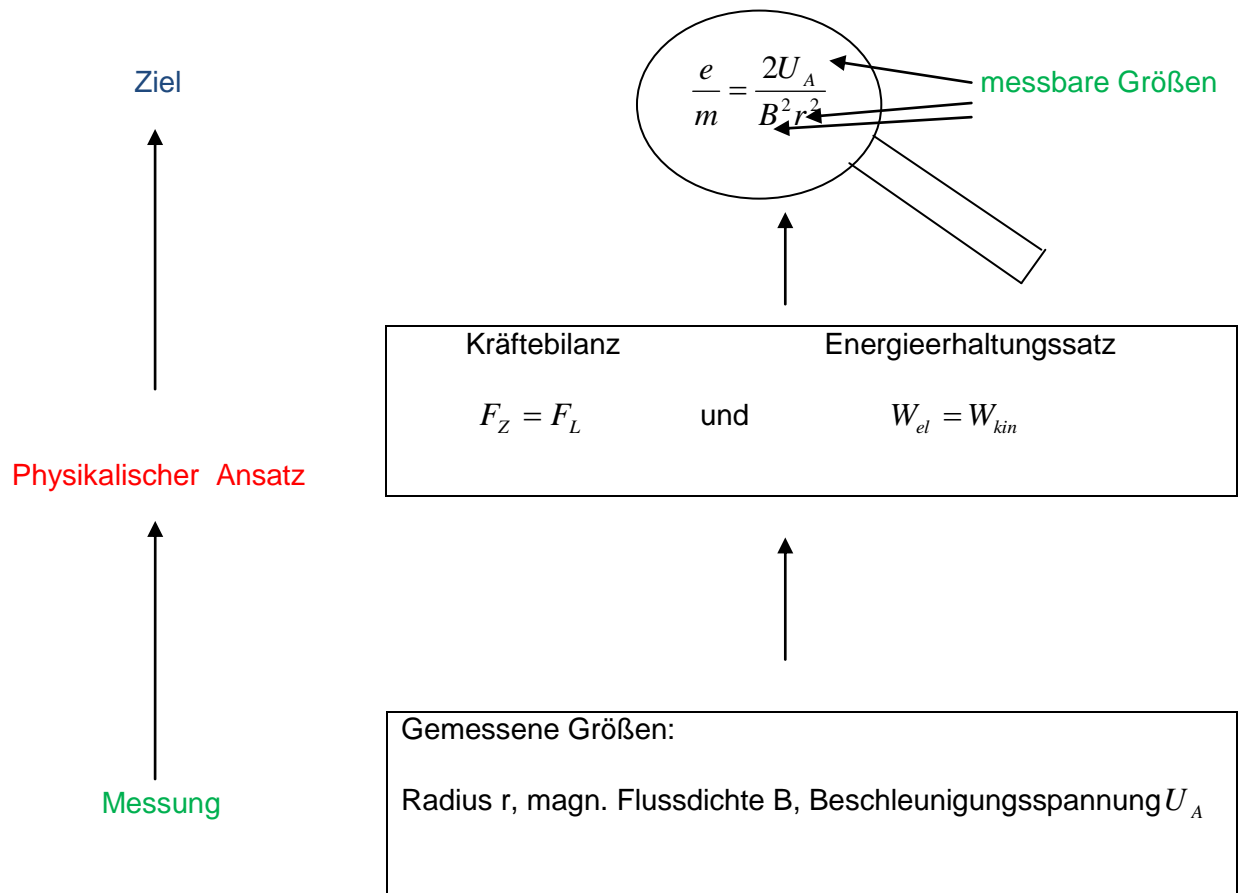


Abb. 24: Ablaufschema für Experimente (H. Krämer)

Aufgaben:

- [1] Erstelle ein entsprechendes Flussdiagramm für
 - [1a] die Bestimmung der Elementarladung beim Millikan-Experiment.
 - [1b] die Bestimmung der Driftgeschwindigkeit von Elektronen in metallischen Leitern mittels des Hall-Effektes.
 - [1c] Bestimmung der atomaren Netzebenenabständen beim Grafit mittels der Elektronenbeugungsröhre.
 - [1d] Bestimmung der Energie von Lichtquanten beim Fotoeffekt.
- [2] Beurteile bei folgenden Formelpaaren, welche der beiden Formeln zur Bestimmung der linken Größe in der Gleichung aus messtechnischer Sicht geeigneter ist. Benenne dazu zunächst die auftretenden Größen.

[2a] Spezifische Ladung: $\frac{e}{m} = \frac{v_s}{B \cdot r}$ oder $\frac{e}{m} = \frac{2 U_A}{B^2 r^2}$?

[2b] Spezifische Ladung: $\frac{e}{m} = \frac{1}{2 U_A} \left(\frac{U}{d B} \right)^2$ oder $\frac{e}{m} = \frac{1}{2 U_A} \left(\frac{E}{B} \right)^2$?

[2c] Kapazität eines Plattenkondensators: $C = \frac{Q}{U}$ oder $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$?

[2d] Magnetische Flussdichte: $B = \frac{F}{I \cdot s}$ oder $B = \frac{U_H}{v_s \cdot h}$?

[2e] Periodendauer beim Fadenpendel für kleine Winkel:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}} \quad \text{oder} \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad ?$$

4.2 Aspekte der Durchführung von Experimenten

4.2.1 Messwerterfassungssysteme helfen weiter

Für die Aufnahme von Messwerten können **Messwerterfassungssysteme (MES)** sehr hilfreich sein. Beispielsweise wird die Aufnahme von Kennlinien wesentlich erleichtert, da man Größen wie Spannung und Stromstärke gegenüber der Zeit auftragen kann. Im folgenden kannst Du eine Art „Checkliste“ durcharbeiten anhand, derer du die typischen Handhabungsmöglichkeiten desjenigen MES zusammenstellen kannst, das du in der Schule verwendest.

Aufgaben:

[1] Starte ein MES an deiner Schule und bearbeite die folgende Checkliste. Mache dich somit mit wesentlichen Funktionen des MES vertraut.

Programmfunktionen	Möglichkeiten und Befehle im Programm des MES
Wie startet man das System?	
Wie startet man eine neue Messung?	
Welche Sensoren für das MES gibt es und	

wie schließt man diese an?	
Welche Darstellungsmöglichkeiten von aufgenommenen Messwerten gibt es?	
Wie kann man Diagramme darstellen?	
Wie kann man die an den Achsen dargestellten Größen verändern?	
Wie kann man Kalibrierungen und Eichungen durchführen?	
Wie kann man Messungen abspeichern?	
Wie kann man verschiedene durchgeführte Messungen vergleichend darstellen?	

Tab. 4: Handhabung eines Messwerverfassungssystems

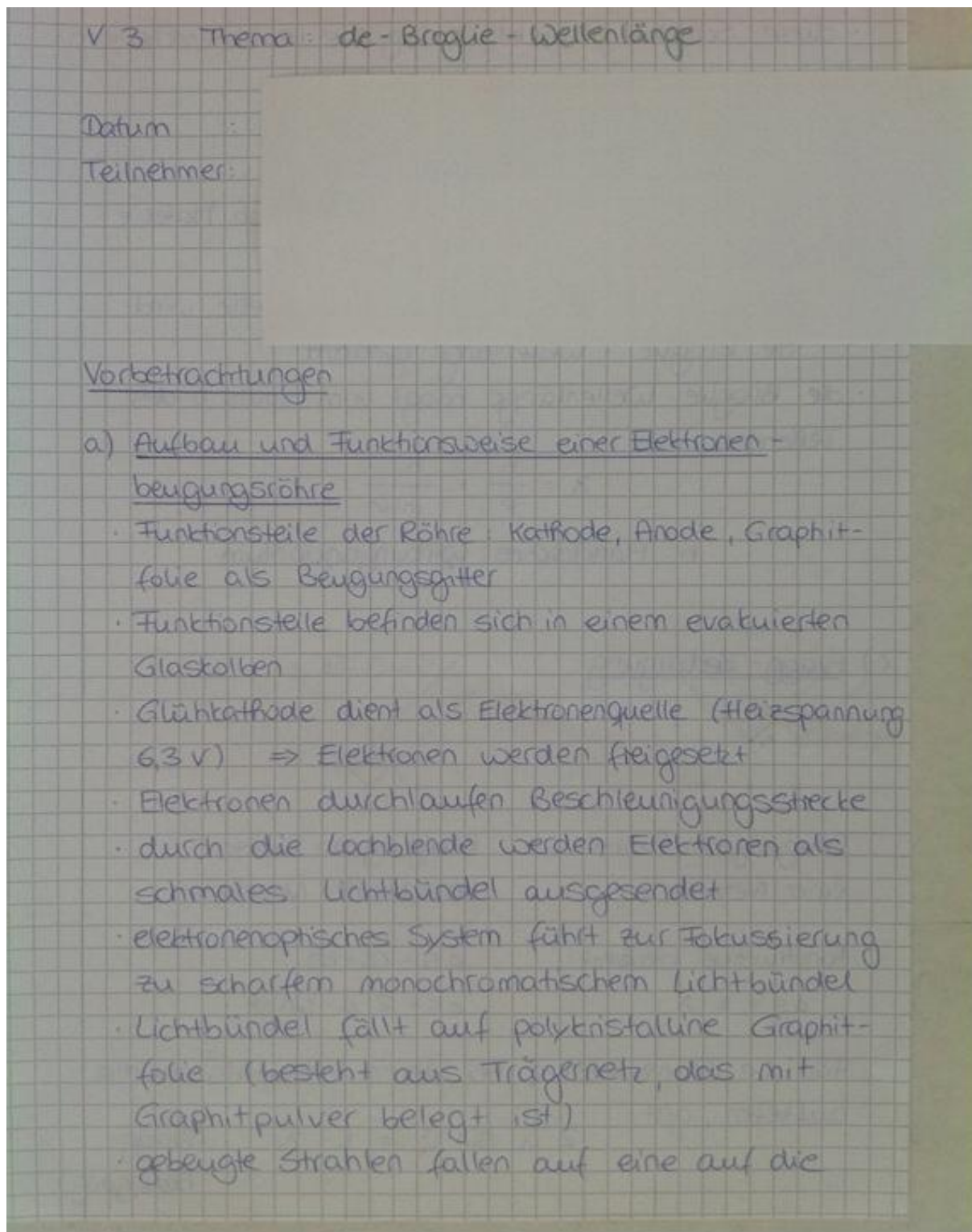
[2] Nimm eine U-I-Kennlinie eines ohmschen Widerstandes auf und verwende dazu als Hilfsmittel das MES. Welche Möglichkeiten des MES kannst du hier besonders gut einsetzen?

4.2.2 Protokollführung

Bei der Ausführung eines Experimentes ist es sehr wichtig die einzelnen Schritte sorgfältig in einem Protokoll festzuhalten. Dabei geht es in erster Linie um ein **authentisches Sichern der Vorgehensweise** bei der Planung, Durchführung (Messung) und **Auswertung** des Experimentes. Auch zunächst falsche Einstellungen von Messbereichen oder ungünstige Vorgehensweisen bei Messungen sollten festgehalten werden. Diese können auch für andere Forscher oft sehr aufschlussreich für das Planen weiterer Experimente sein. Daher wird ein solches Protokoll im Allgemeinen durchaus handschriftlich verfasst, da es parallel beim Experimentieren angefertigt wird.

Beispiel: Elektronenbeugung

Im Folgenden siehst Du ein (anonymisiertes) Protokoll eines Schülerexperimentes zur Bestimmung der de-Broglie-Wellenlänge mit Hilfe der Elektronenbeugungsröhre:



innere Röhrenwandung aufgebraute fluoreszierende Schicht

- diese Schicht bewirkt dort grüne Leuchterscheinung

b) de-Broglie - Wellenlänge

- Louis-Victor de Broglie

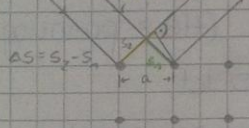
- Entdeckung, dass alle Teilchen durch Materiewellen beschrieben werden können
- Wellenlänge einer solchen Materiewelle wird de Broglie - Wellenlänge genannt

- de-Broglie-Wellenlänge hängt vom Impuls p des Teilchens ab:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$

h : Plancksches Wirkungsquantum

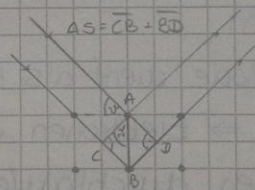
c) Bragg-Bedingung



Beugung an Punkten
einer Netzebene

konstruktive Interferenz:

$$\Delta s = k \cdot \lambda$$



Beugung an Punkten
benachbarter Netzebenen

$$\Delta s = \overline{CB} + \overline{BD}$$

$$\Delta s = 2 \cdot a \cdot \sin \alpha$$

Für die Glanzwinkel α_k , bei denen Intensitätsmaxima auftreten, gilt:

$$2 \cdot a \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$$

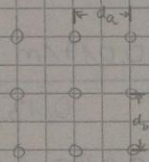
(Bragg-Bedingung)

Auswertung

$$\lambda = \frac{r \cdot d}{l}$$

Abstand Graphit-Schirmebene : $l = 0,13 \text{ m}$

Gitterkonstanten :



$$d_a = 213 \text{ pm}$$

$$d_b = 123 \text{ pm}$$

2 Netzebenenabstände \Rightarrow 2 Hauptmaxima 1. Ordnung

„Innenradius“ = r_i

„Außenradius“ = r_a

① $r_i = 0,018 \text{ m}$

$$r_a = 0,031 \text{ m}$$

$$(U = 2 \text{ V})$$

$$\lambda = \frac{0,018 \text{ m} \cdot 213 \text{ pm}}{0,13 \text{ m}} = 29,49 \text{ pm}$$

$$\lambda = \frac{0,031 \text{ m} \cdot 123 \text{ pm}}{0,13 \text{ m}} = 29,33 \text{ pm}$$

$$\Delta \lambda = 0,16 \text{ pm}$$

② $r_i = 0,01626 \text{ m}$

$$r_a = 0,027 \text{ m}$$

$$(U = 2,6 \text{ V})$$

$$\lambda = \frac{0,01626 \text{ m} \cdot 213 \text{ pm}}{0,13 \text{ m}} = 26,64 \text{ pm}$$

$$\lambda = \frac{0,027 \text{ m} \cdot 123 \text{ pm}}{0,13 \text{ m}} = 25,55 \text{ pm}$$

$$\Delta \lambda = 1,09 \text{ pm}$$

$$\textcircled{3} \quad r_i = 0,0195 \text{ m}$$

$$r_a = 0,0346 \text{ m}$$

$$(U = 1,6 \text{ V})$$

$$\lambda = \frac{0,0195 \text{ m} \cdot 213 \text{ pm}}{0,13 \text{ m}} \approx 31,95 \text{ pm}$$

$$\lambda = \frac{0,0346 \text{ m} \cdot 123 \text{ pm}}{0,13 \text{ m}} \approx 32,74 \text{ pm}$$

$$\Delta \lambda = 0,79 \text{ pm}$$

$$\textcircled{4} \quad r_i = 0,0171 \text{ m}$$

$$r_a = 0,0295 \text{ m}$$

$$\lambda = \frac{0,0171 \text{ m} \cdot 213 \text{ pm}}{0,13 \text{ m}} \approx 28,02 \text{ pm}$$

$$\lambda = \frac{0,0295 \text{ m} \cdot 123 \text{ pm}}{0,13} = 27,91 \text{ pm}$$

$$\Delta \lambda = 0,11$$

Abweichung · siehe $\Delta \lambda$

· eigentlich müsste $\Delta \lambda = 0$ sein

Fehlerbetrachtung:

- ungenaues Ablesen des Durchmessers bzw Radius aufgrund der runden Form der Elektronenbeugungsröhre
- evtl. Verrutschungsgefahr mit Messschieber

Abb. 25: Beispiel eines Schülerprotokolls (H. Krämer)

Aufgaben:

- [1] Beschreibe den inhaltlichen Aufbau der Auswertung und erkläre damit was Du über die Vorgehensweise der Schüler beim Messen und Auswertung erkennen kannst.
- [2] Diskutiere kritisch die Aussagefähigkeit des Protokollauszugs und entwickle Vorschläge für Alternativen.

4.3 Auswertung von Experimenten

4.3.1 Grundlagen der Fehlerbetrachtung

Wenn man bei einem Experiment Messwerte aufgenommen hat, stellt sich für dessen Auswertung die entscheidende Frage, welche Fehler bei der Messung entstehen. Daher kannst du in diesem Teilkapitel Grundlagen der Fehlerrechnung erlernen, die auch eine große Rolle für die „Qualitätskontrolle“ von Experimenten im folgenden Kapitel spielt.

Bei der Betrachtung von Fehlern unterscheidet man zwei Typen:

Systematische Fehler: Diese resultieren aus den Eigenschaften der Messgeräte. Oftmals gibt es bei den Geräten entsprechende Tabellen die den systematischen Fehler als prozentuellen oder absoluten Wert angeben. Folgende Tabelle gibt Beispiele:

Messgröße	Gerät	Systematischer Fehler
Zeit	Stoppuhr	$\pm 2 \%$
Länge	Lineal	$\pm 2 \%$
Stromstärke	Stromstärkemessgerät	$\pm 2,5\%$ des Messbereiches
Temperatur (bis 60°)	Thermometer	$\pm 1 \text{ K}$
Temperatur (über 60°)	Thermometer	$\pm 2 \text{ K}$

Tab. 5: Beispiel für systematische Fehler

Zufällige Fehler: Diese ergeben sich aus den persönlichen Einflüssen des Experimentators, die sich aus seinen subjektiven Entscheidungen ergeben. Diese lassen sich teilweise quantitativ erfassen, so dass man beispielsweise bei Messgeräten einen halben Skalenteil vereinbart.

Aufgaben:

[1] Erkläre mit deinen eigenen Worten den Unterschied zwischen systematischen und zufälligen Fehlern.

[2] Eine Längenmessung mit einem Lineal ergibt $s = 100 \text{ mm}$.

Bestimme mittels obiger Tabelle den systematischen Fehler des Lineals und gib diesen als absoluten Wert an.

4.3.2 „Qualitätskontrolle“ von Experimenten

Wenn man ein Experiment durchgeführt hat stellt sich natürlich die Frage wie man das Ergebnis des Experimentes zu deuten hat und inwieweit sich der Versuch als geeignet zur Untersuchung einer bestimmten Größe herausstellt. Will man beispielsweise die Veränderung des Ortsfaktors g bei unterschiedlichen Breitengraden bestimmen, wird sich ein Federkraftmesser mit einer bestimmten bekannten Masse wohl weniger eignen, da die „Auflösung“ dieser Messapparatur höchstens eine Kommastelle zulässt. Soll hingegen der Unterschied des Ortsfaktors zwischen Mond und Erde ermittelt werden, könnte dies ein Astronaut auf dem Mond sicherlich ausreichend mittels eines Federkraftmessers nachweisen.

Daher stellt sich oftmals die Frage wie man eine Art „Qualitätsprüfung“ von quantitativen Experimenten durchführen kann. Eine Möglichkeit hierzu ist eine Fehlerabschätzung durchzuführen.

Durchführung einer „Quantitativen Qualitätskontrolle“ eines Experimentes:

1. Berechne den Mittelwert \bar{a} deiner Messwerte der zu bestimmenden Größe a .
2. Ermittle systematische und zufällige Fehler, die bei diesem Versuch auftreten können.
3. Bestimme mittels einer Fehlerabschätzung die Fehlerbreite Δa und damit das „Streuintervall“ $a_{\min} \leq \bar{a} \leq a_{\max}$.
4. Beurteile anhand von Beispielsrechnungen die Folgen einer Vergröberung oder Verfeinerung der Fehler auf das Streuintervall und beurteile, ob eventuelle messtechnische Veränderungen sinnvoll sind.
5. Beurteile, ob das Experiment für die geforderte Genauigkeitsstufe ausreichend ist.

Beispiel 1: Fadenstrahlrohr

Bei der Bestimmung der spezifischen Ladung $\frac{e}{m}$ des Elektrons spielt die Messung des Durchmessers der als Leuchtspur erkennbaren Kreisbahn der Elektronen eine zentrale Rolle. Jedoch ist die Spur der Kreisbahn oftmals leicht in der Breite gestreut und daher nicht ganz exakt messbar. Versuche anhand einer Beispielsrechnung abzuschätzen, welche Auswirkungen die Ungenauigkeit der Messung des Kreisradius hätte.

Aufgabe:

Führe eine quantitative Qualitätskontrolle durch.

Beispiel 2: Wellenlängenbestimmung von Laserlicht mit Hilfe eines optischen Gitters

Ein sehr beeindruckendes Beispiel ist die Wellenlängenbestimmung des Laserlichtes mit Hilfe eines Gitters.

Es soll eine Messung der Wellenlänge von rotem Laserlicht mit einem Gitter von 570 Spalten pro mm durchgeführt werden. Es gelte:

l : Abstand vom Gitter zum Schirm

d_1 : Abstand des 1. Maximums zum Hauptmaximum

λ : Wellenlänge des roten Laserlichtes

Führe (unter Aufsicht des Lehrers) ein entsprechendes Experiment durch und trage die Werte in die Tabelle ein. Variiere dabei den Abstand vom Gitter zum Schirm.

l in m					
d_1 in m					
λ in nm					

Tab. 6: Wellenlängenbestimmung des Laserlichtes

Aufgabe:

Führe eine quantitative Qualitätskontrolle durch.

5. Physik als Wahrnehmungsdetektiv

5.1 Zwischen Wahrnehmung und Messung unterscheiden

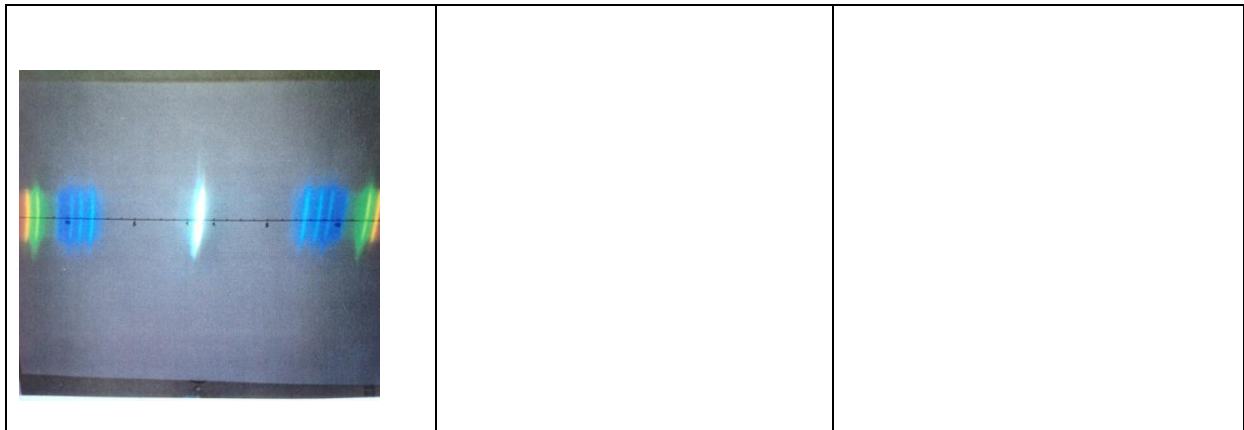
In der folgenden Tabelle findest du entweder Beschreibungen oder Bilder von Situationen, bei denen eine akustische oder optische Wahrnehmung stattfindet.

Aufgaben:

[1] Nenne in der mittleren Spalte physikalische Größen, die diese Phänomene beschreiben und dadurch messbar machen.

[2] Beschreibe in der rechten Spalte stichpunktartig wie sich die Wahrnehmung in der Messung widerspiegelt. Du kannst auch ein passendes Diagramm skizzieren.

Wahrnehmungssituation	Physikalische Größen	Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und Messung
Ein Ton wird lauter empfunden.		
Ein Ton wird höher empfunden.		
		



Tab. 7: Wahrnehmung und Messung (Bilder H. Krämer)

5.2 Messungen können detektivisch weiterhelfen

IW

Beispiel: Täuscht uns das Laserlicht?

Im folgenden Experiment hast du die Möglichkeit, die Intensitätsverteilung eines Laserstrahls beim Durchgang durch einen Einzelspalt genauer zu untersuchen. Dazu ist die Videocom-Kamera (bzw. Digitalkamera) ein nützliches Hilfsmittel. Das Bild zeigt Dir den schematischen Aufbau des Versuches:

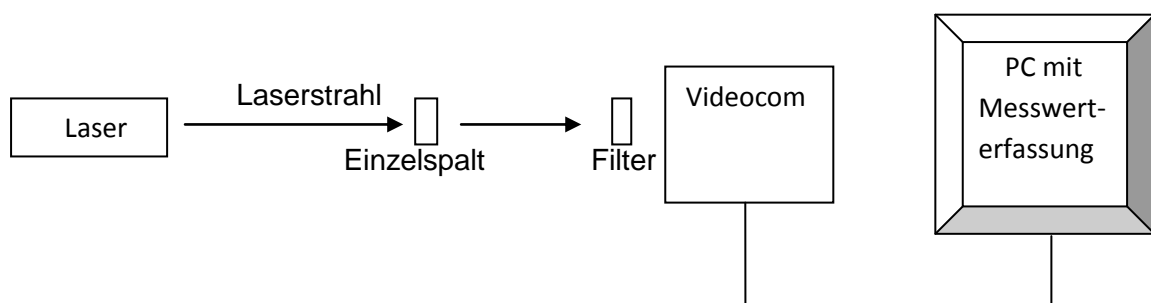


Abb. 26: Schema für Versuchsaufbau am Einzelspalt (H. Krämer)

[1] Wenn Du nun (**nur unter Aufsicht des Lehrers!**) mit einem Laser experimentierst, gilt grundsätzlich

Vermeide immer, dass der Laserstrahl direkt oder indirekt (z.B. durch Reflexion) in Dein Auge fällt!!!!

[1.1] Bevor Du mit dem Experiment beginnst, musst Du einige Dinge beachten:

[1.1.1] Starte den PC und das Programm zur Darstellung der Intensitätsverteilung.

[1.1.2] Schalte nun den Laser ein und überzeuge Dich, dass der Laserstrahl so justiert ist, dass er genau die Mitte der LED-Zeile der Kamera trifft. Der reflektierte Strahl darf allerdings nicht direkt in den Laser zurückfallen.

[1.1.3] Überzeuge Dich, dass die Kamera beim Schalter mit „Mode“ auf Intensität“ eingestellt ist. Starte nun das Programm (siehe Kamerasymbol oben).

[1.2] Beobachte nun die Intensitätsverteilung auf dem Bildschirm und skizziere ihren Verlauf in Deinem Heft.

[2] Vergleiche Deine Beobachtungen auf dem Projektionsschirm mit den Merkmalen des Intensitätsdiagrammes. Halte Deine Ergebnisse in einer Tabelle fest.[3] Wiederhole die Aufgaben [1.2] und [2] mit einem Doppelspalt und einem Dreifachspalt.

6. Physik querbeet – Analogien und Strukturen

6.1 Analoge Konzepte erkennen und darstellen

In diesem Kapitel kannst du üben, wie man Analogien und Strukturen in der Physik erkennt und darstellt. Oftmals ist es so, dass man in ganz unterschiedlichen Bereichen der Physik ähnliche Strukturen erkennt, mit denen man Phänomene beschreibt. Dies hilft dir, Gebiete der Physik zu verknüpfen und somit leichter zu lernen.

Um solche Analogien darzustellen kannst Du bei den folgenden Aufgaben neben der Beschreibung verschiedene Darstellungsmöglichkeiten üben:

1. **Tabellendarstellung:** Mit ihnen kannst du wesentliche Vergleichsaspekte nebeneinander betrachten und formulieren.
2. **Strukturbilder:** Es sind zeichnerische Darstellungen von Phänomenen oder Vorgängen, die nur wesentliche gemeinsame Aspekte beinhalten.

6.1.1 Das Feldkonzept

EF

Beispiel 1: Feldlinienbilder

Das folgende Strukturbild stellt die Struktur eines radialen Feldes dar.

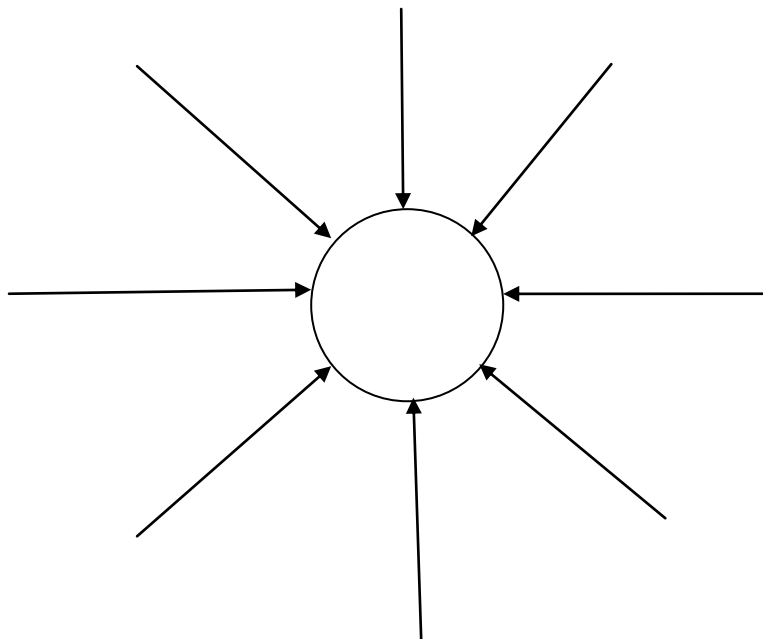


Abb. 27: Radialfeld (H. Krämer)

Aufgaben:

- [1] Nenne zwei unterschiedliche Beispiele für solche radialen Felder und beschreibe, worum es sich dann jeweils beim zentralen Kugelkörper handeln könnte.
- [2] Auf Probekörper wirken in Feldern Kräfte. Ergänze das Strukturbild entsprechend an einem Beispiel.
- [3] Erkläre, wie sich die Feldstärke in der Umgebung der Kugel verhält und verdeutliche dies durch eine entsprechende Pfeildarstellung.

EF

Beispiel 2: Energie und Kräfte in homogenen Feldern

Das untenstehende Strukturbild stellt ein homogenes Feld dar, in dem ein Körper entgegen der Feldkräfte transportiert wird.

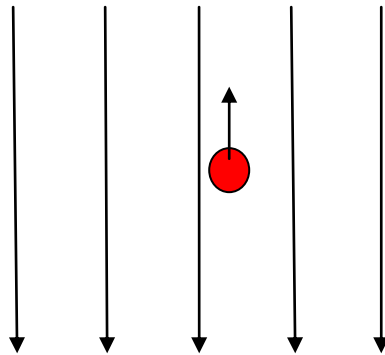


Abb. 28: Homogenes Feld (H. Krämer)

Aufgabe:

Präzisiere anhand folgender Tabelle, wie dieser Vorgang im Schwerfeld und im elektrischen Feld analog beschrieben werden kann.

Vergleichsaspekt	Schwerefeld der Erde	Elektrisches Feld
Probekörper		
Charakteristische Größe für Probekörper		Ladung q
	Schwerkraft	
	g	E
		Plattenabstand
	$E_{pot} = m g h$	

Tab. 8: Analogie Schwerfeld – Elektrisches Feld

6.1.2 Analogien bei Bewegungsvorgängen

EF

Beispiel 1: Wurfbewegungen

Aufgaben:

[1] Vergleiche den waagrechten Wurf eines Balls mit der Ablenkung eines Elektronenstrahls in der Braunschen Röhre. Ergänze die Tabelle:

Aspekt	Wurfbewegung eines Balls	Elektronenablenkung
	Ball	
		m_e
wirkende Kräfte		
	Erdbeschleunigung g	
		elektrisches Feld
Weg-Zeit-Gesetz		
Verhalten der Geschwindigkeiten		
Gleichung der Wurfparabel		

Tab. 9: Vergleich waagrechte Wurfbewegungen

[2] Entwickle nun ein Strukturbild, das wesentliche Gemeinsamkeiten enthält.

EF

Beispiel 2: Der Linearbeschleuniger

Ein einfaches mechanisches Modell eines Linearbeschleunigers ist ein Stein der aus einer bestimmten Höhe frei fallen gelassen wird. Ein analoges Modell wäre beispielsweise ein Elektron, das zwischen Kathode und Anode in einer Braunschen Röhre beschleunigt wird.

Aufgabe:

Vergleiche anhand einer Tabelle beide Vorgänge indem du gemeinsame Aspekte herausarbeitest.

MF

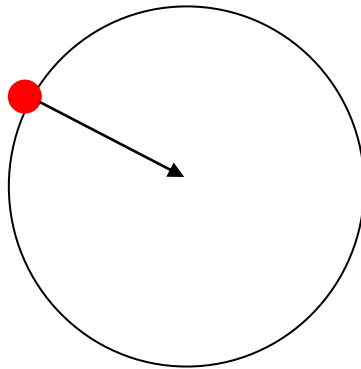
Beispiel 3: Kreisbewegungen

Abb. 29: Strukturbild Kreisbewegung (H. Krämer)

Das obige Strukturbild zeigt einen Körper der unter dem Einfluss der Zentripetalkraft auf einer Kreisbahn rotiert.

Aufgaben:

- [1] Präzisiere anhand konkreter Beispiele aus dem Alltag dieses Strukturbild.
- [2] Erläutere wie speziell bei dem „Elektronenkarussell“ (Fadenstrahlrohr) diese Anordnung konkret aussieht.

6.1.3 Schwingende Systeme

HS

Beispiel 1: Ein mechanisches Modell für einen elektromagnetischen Schwingkreis

Betrachtet man einen elektromagnetischen Schwingkreis bestehend aus Kondensator und Spule, so lässt er sich in Analogie zu einem horizontalen Federschwinger betrachten (s. Abbildung)

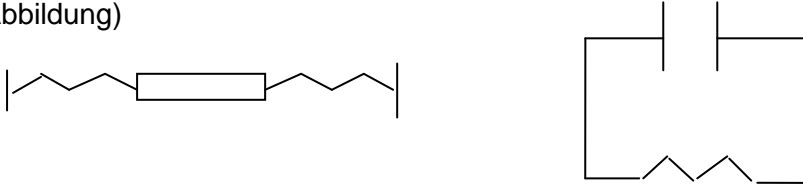


Abb. 30: mechanisches Modell für elektromagnetischen Schwingkreis (H. Krämer)

Aufgabe: Vergleiche beide Systeme, indem du in der Tabelle Entsprechungen ergänzt.

Vergleichsaspekt	Horizontaler Federschwinger	Elektromagnetischer Schwingkreis
		Kondensator
	Schwingender Körper	
Energie		
		Elektrische Ladung
		Kapazität

Tab. 10: Vergleich horizontaler Federschwinger mit elektromagnetischem Schwingkreis

Beispiel 2: Differenzialgleichungen bei schwingenden Systemen

Aufgabe: Vergleiche die Differenzialgleichung der harmonischen Schwingung eines Federpendels mit derjenigen eines elektromagnetischen Schwingkreises.

6.1.4 Interferenzphänomene

Beispiel 1: Interferenz am Doppelspalt

Interferenzphänomene an einem Doppelspalt kannst du bei ganz unterschiedlichen Versuchsanordnungen beobachten. Im folgenden Bild siehst du ebene Wellen die sich auf einen Doppelspalt zubewegen.

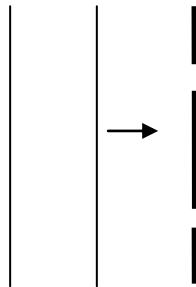


Abb. 31: Interferenz am Doppelspalt (H. Krämer)

Aufgaben:

- [1] Stelle zeichnerisch dar, wie es rechts vom Doppelspalt zu Interferenzphänomenen kommen kann.
- [2] Erläutere konkrete Experimente bei denen du Interferenzphänomene an einem Doppelspalt beobachten kannst.
- [3] Nenne Entsprechungen bei diesen Experimenten.

Beispiel 2: Interferenz an verschiedenen Spalt- und Gitteranordnungen

Aufgabe: Vergleiche Interferenzphänomene am Einzelspalt, Doppelspalt, Dreifachspalt und Gitter (z.B. 570 Striche/mm). Vergleichbare Aspekte sind bspw. Schärfe, Abstände Helligkeit und Anzahl der Maxima, Möglichkeiten der Berechnung der Lage der Maxima oder Minima.

6.2 Mit analogen Konzepten neue Themen entdecken

EF

Beispiel 1: Wien-Filter

MF

In vielen Anwendungen wie bspw. bei Massenspektrometern spielt der sog. Wien-Filter eine bedeutende Rolle.

In einem Röhrenexperiment werden Elektronen zunächst mit einer Beschleunigungsspannung U_A zwischen Kathode und Anode auf eine Geschwindigkeit v beschleunigt und treten dann in einen Wien-Filter ein. Vergleiche hierzu auch das Beispiel 5 in Kapitel 3.1.

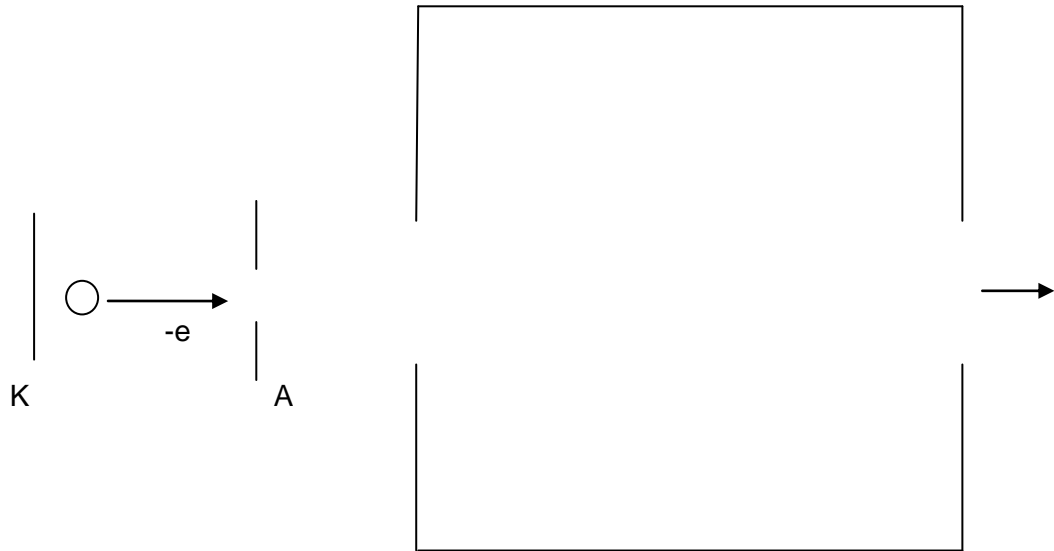


Abb. 32: Wien-Filter (H. Krämer)

Aufgaben:

- [1] Zeichne in der obigen Abbildung im Wien-Filter die bestehenden Felder ein.
- [2] Erkläre wie man die beteiligten Felder experimentell erzeugen könnte.
- [3] Mit einer solchen Anordnung ist es möglich die spezifische Ladung e/m der Elektronen zu bestimmen. Begründe, dass dann die folgende Gleichung gilt:

$$\frac{e}{m} = \frac{1}{2U_A} \left(\frac{E}{B} \right)^2$$

- [4] Erkläre kurz wie man die elektrische Feldstärke E und die magnetische Flussdichte B experimentell bestimmen könnte.

Beispiel 2: Neuen Teilchen auf der Spur

Auf der Suche nach neuen Teilchen und deren Eigenschaften spielt die Auswertung von Spuren, die sie in einem Medium hinterlassen eine große Rolle. Ein wichtiges Beispiel hast du schon im Unterricht kennengelernt: das Fadenstrahlrohr. Hier wird speziell in einer gasgefüllten Röhre (Wasserstoff unter ganz geringem Druck) eine Kreisbahn von Elektronen mit Hilfe eines magnetischen Feldes erzeugt, deren Radius zur Bestimmung der spezifischen Ladung e/m des Elektrons führen. Die Spur dieser Bahn sieht man aufgrund der Wechselwirkung der schnellen Elektronen mit den Gasmolekülen. Die folgende Abbildung zeigt dir noch einmal den Aufbau des Experimentes.

Aufgaben zur Wiederholung:

- [1] Beschreibe den Aufbau und die Funktionsweise eines Fadenstrahlrohres.
- [2] Wie erzeugt man das annähernd homogene magnetische Feld?
- [3] Erkläre, wie es zur Ablenkung der Elektronen im magnetischen Feld kommt.

Auf der Suche nach neuen Teilchen hat man vielfach mit sog. **Blasenkammern** gearbeitet. Sie dienen zur Sichtbarmachung der Bahnen energiereicher Teilchen. Gelangen solche Teilchen in die Kammer (gefüllt mit flüssigem Wasserstoff), so erzeugen sie längs ihrer Flugbahn Dampfbläschen. Daher werden Blasenspuren sichtbar, die dann fotografiert und ausgewertet werden können. Ähnlich wie beim Fadenstrahlrohr wird die Blasenkammer von einem magnetischen Feld durchsetzt, so dass man aus der Krümmung der Bahn Rückschlüsse bspw. auf das Vorzeichen von Ladungen oder deren Geschwindigkeit ziehen kann.

Die folgende Abbildung zeigt dir ein Beispiel eines Ausschnittes einer solchen Blasenkammeraufnahme. Sie lässt sich als spiralförmige Bahn eines geladenen Teilchens interpretieren.



Abb. 33: Ausschnitt aus einer Blasenkammeraufnahme am CERN (H. Krämer)

Aufgaben:

- [1] Welches Ladungsvorzeichen ordnest du dem Teilchen zu, wenn du davon ausgehst, dass das magnetische Feld senkrecht aus der Zeichenebene herausweist und sich das Teilchen in Pfeilrichtung bewegt?
- [2] Zeichne an die mit dem Kreuz markierte Stelle die wirkende Lorentzkraft ein!
- [3] Vergleiche die Vorgehensweise bei der Deutung einer Spur im Fadenstrahlrohr mit derjenigen einer Blasenkammerspur.

Dass solche Blasenkammeraufnahmen sehr komplex sein können, zeigt dir die folgende Darstellung. Es werden viele Spuren gleichzeitig registriert. Für die Wissenschaftler ist es dann eine große Herausforderung, diese Aufnahmen auszuwerten, da viele Bedingungen mit zu berücksichtigen sind. Auch heute spielen solche Spurmuster eine große Rolle. Man arbeitet allerdings eher mit riesigen Detektoren, um die Teilchen zu registrieren. Aufgrund der gewaltigen Datenfülle ist nur noch eine Auswertung mit einem weltweiten Computernetzwerk möglich.

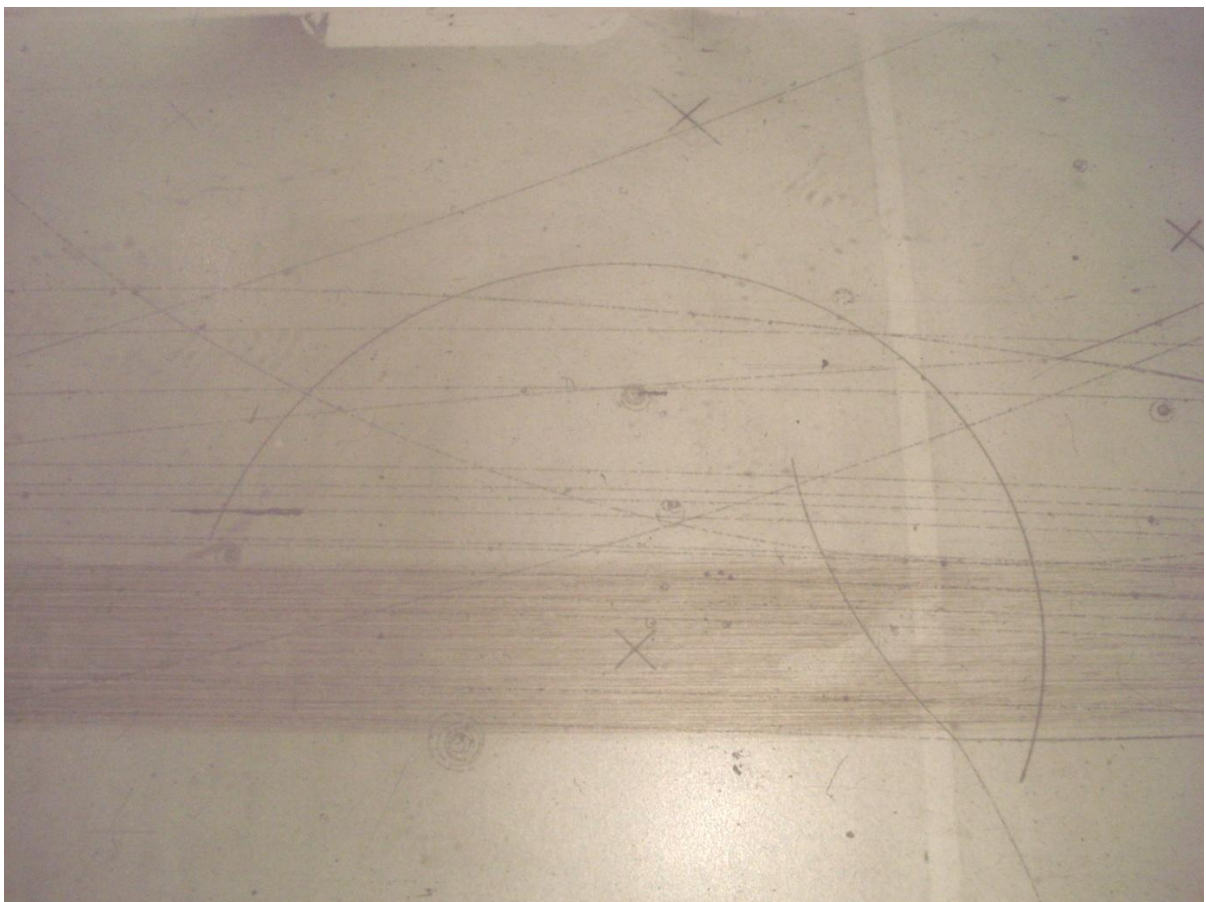


Abb. 34: Blasenkammeraufnahme ahm CERN (H. Krämer)

Beispiel 3: Aus welchen Bausteinen besteht die Materie? Streuexperimente helfen!

Auf der Suche nach den kleinsten Bausteinen der Materie spielen **Streuexperimente** eine wichtige Rolle. Dabei werden Teilchen auf das zu untersuchende Objekt geschossen und daran gestreut. Aus dem Streuverhalten der Teilchen gewinnt man Rückschlüsse auf Struktureigenschaften des Objektes. Ein historisch wichtiges Beispiel ist der **Rutherford-sche Streuversuch**, bei dem α -Teilchen auf eine dünne Goldfolie geschossen wurden. Aus dem Streuverhalten der Teilchen erhielt Rutherford Informationen über den Atomaufbau der Materie.

Ein anderes Beispiel hast du schon näher im Unterricht kennengelernt: Beim **Elektronenbeugungsexperiment** werden Elektronen in einer Röhre beschleunigt und auf eine polykristalline Grafitfolie geschossen. Man beobachtet auf dem Fluoreszenzschirm der Röhre charakteristische Ringe, sog. Debye-Scherrer-Ringe (vgl. Abb. 12), mit Hilfe derer man dann bspw. auf die Wellenlänge der Elektronen zurückschließen kann.

Aufgaben zur Wiederholung:

- [1] Beschreibe den Aufbau und die Funktionsweise einer Elektronenbeugungsröhre!
- [2] Welche Aussage über die Natur des Elektrons gewinnt man aus diesem Experiment?
Welche Bedeutung kommt insbesondere der Gleichung $\lambda = \frac{h}{p}$ zu?
- [3] Wie bestimmt man die Netzebenenabstände des Grafits aus den Abmessungen der Ringe?

[2] Wie du von der Elektronenbeugung weißt ist eine wichtige Voraussetzung für die Aussagekraft eines solchen Experimentes eine hinreichend kleine De-Broglie-Wellenlänge der Elektronen, damit man die Gitterstruktur des Grafit „auflösen“ kann. Dies ist vergleichbar mit Interferenzexperimenten mit dem Laser am Doppelspalt oder Beugungsversuchen am Einzelspalt. Auch hier muss die Wellenlänge unterhalb des Bereiches der untersuchten Spaltabstände bzw. Spaltbreiten liegen, damit überhaupt ein entsprechendes Beugungs- oder Interferenzbild am Schirm entsteht.

Um nun Aussagen über das Innere von Protonen zu gewinnen, entschied man sich schon zu Beginn der 70er Jahre an der Universität Stanford in Kalifornien, Elektronen auf Protonen zu schießen, um Erkenntnisse über das Innere der Protonen zu erhalten. Damit die Elektronen dazu eine hinreichend kleine De-Broglie-Wellenlänge besitzen, müssen sie wesentlich stärker beschleunigt werden. Heute erreicht man am CERN bei Genf bei solchen Experimenten durchaus Energien bis zu mehreren TeV ($1 \text{ TeV} = 1 \cdot 10^{12} \text{ eV}$). Dies stellt natürlich hohe Anforderungen an die Beschleunigertechnik.

Aufgaben:

- [1] Erinnere dich nochmals an die Elektronenbeugung: In welcher Größenordnung liegt die Energie der Elektronen? Vergleiche die Größenordnung der Wellenlänge mit der Größe des Abstandes der Netzebenen!
- [2] Berechne die De-Broglie-Wellenlänge von Elektronen, die mit 1 TeV auf Protonen geschossen werden. Vergleiche dein Ergebnis mit dem Durchmesser eines Protons (ca. 10^{-14} m).

Dazu ein kleiner Hinweis: Beachte, dass du im Gegensatz zur Elektronenbeugungsröhre bei so großen Energien den relativistischen Massenzuwachs der Elektronen berücksichtigen musst. Multipliziere dazu in diesem Beispiel die Geschwindigkeit $v \approx c$ mit dem relativistischen Korrekturfaktor $\gamma = \frac{E}{E_0} = 2 \cdot 10^6$.

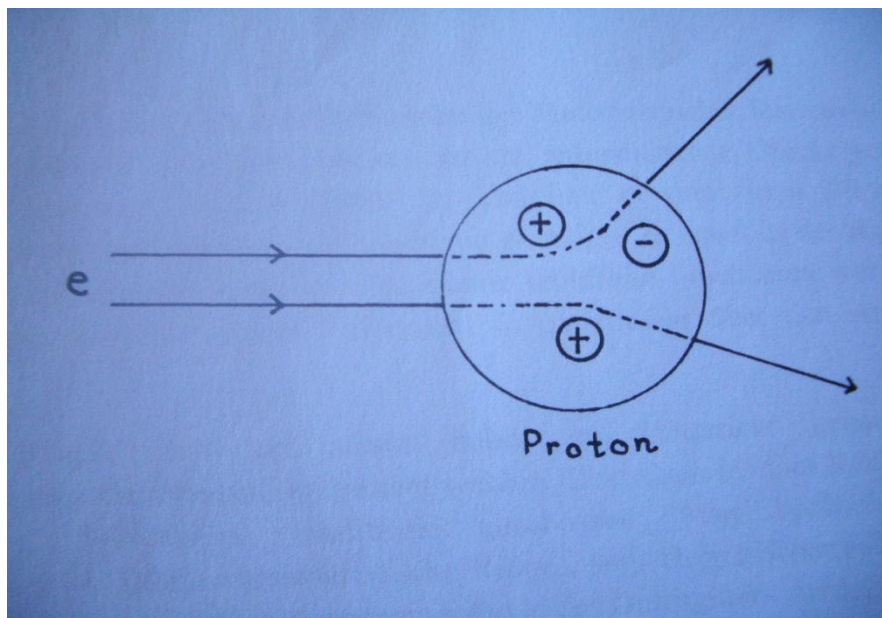


Abb. 35: Elektronenstreuung am Proton (schematisch, H. Krämer)

Wie das obige Bild zeigt, hat man bei diesen Streuexperimenten erstaunlicherweise festgestellt, dass das Proton nicht gleichmäßig mit positiver Ladung gefüllt ist, sondern auch negative Ladung auftritt, an denen die Elektronen abgelenkt werden. Man kann sich daher das Proton aus Teilladungen zusammengesetzt denken, die man auch als **Quarks** bezeichnet.

Zusammenfassung: Elektronenbeugung als Streuexperiment interpretiert

Streuexperiment	Elektronenbeugung
Gestreute Teilchen	Elektronen
Target	Grafitfolie
Größen: Energie der beschleunigten Teilchen De-Broglie-Wellenlänge Dicke des Targets	Energie der Elektronen durch Beschleunigungsspannung (5 kV) De-Broglie-Wellenlänge der Elektronen Dicke der Folie
Streu-Spektrum	Debye-Scherrer-Ringe als Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Elektronenauftrufforte
Detektor	Fluoreszenzschirm

Tab. 11: Elektronenbeugung als Streuexperiment

7. Mathe und Physik? Mit Formeln umgehen

7.1 Eine vielfältige Formelwelt

In diesem Abschnitt kannst Du eine Reise in die vielfältige Formelwelt der Physik unternehmen. In den folgenden Aufgaben zu verschiedenen Themen kommt immer eine Formel vor, die du näher untersuchen sollst. Wundere dich nicht! Es kann gut sein, dass du die Formel nicht kennst! Das ist aber durchaus Absicht. Das Ziel ist es, dass Du sehen kannst, auf welche vielfältige Weise Formeln zur quantitativen Beschreibung eines Sachverhaltes dienen können.

Geübte Fertigkeiten:

1. Bezug der Formel zu einem Sachverhalt erkennen.
2. Größen in der Formel zu benennen.
3. Exemplarisch Abhängigkeiten zu untersuchen.
4. Aussagen der Formel grafisch darstellen.

EF

Beispiel 1: Elektrisches Feld einer geladenen Kugel

Auf einer Konduktorkugel mit dem Radius r_0 befindet sich eine positive Ladung $+Q$.

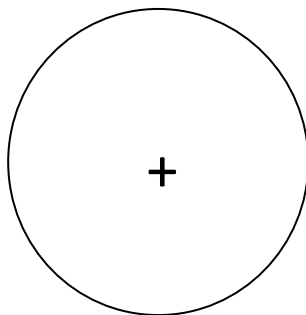


Abb. 36: geladene Kugel (H. Krämer)

Aufgaben:

- [1] Zeichne das elektrische Feld in der Umgebung der Kugel ein.
- [2] Beschreibe das Verhalten der elektrischen Feldstärke in der Umgebung der Kugel.
- [3] Den Betrag der elektrischen Feldstärke kann man mit folgender Gleichung berechnen:

$$E(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r^2} \quad \text{für } r \geq r_0$$

- [3.1] Benenne die in der Gleichung auftretenden Größen.
- [3.2] Erläutere, wie sich die Feldstärke beim Verdoppeln des Radius ändert.
- [3.3] Gegeben ist eine Kugel ($r_0 = 2 \text{ cm}$) mit der Ladung $Q = 5 \text{ nC}$.
Zeichne ein E - r -Diagramm für $2 \text{ cm} \leq r \leq 15 \text{ cm}$.

EF

Beispiel 2: Kapazität eines Kugelkondensators

Neben den Plattenkondensatoren kann man sich auch einen besonderen Kondensator vorstellen, der nur aus einer geladenen Konduktorkugel besteht. Da jetzt quasi eine zweite geladene Platte fehlt, bezieht man die Kapazität auf das Unendliche, stellt sich also vor, die andere Platte läge quasi unendlich weit entfernt.

Für die Kapazität des Kugelkondensators gilt die Gleichung

$$C(r) = 4\pi\epsilon_0\epsilon_r r.$$

Aufgaben:

- [1] Benenne die in der Gleichung auftretenden Größen.
- [2] Zeichne für Luft ($\epsilon_r \approx 1$) ein C - r -Diagramm und erkläre anhand dessen die Abhängigkeit der Kapazität vom Radius der Kugel.

Beispiel 3: Magnetfeld in der Umgebung eines geraden Leiters

Bei einem geraden stromdurchflossenen Leiter kann man im Abstand r die magnetische Flussdichte B des umgebenden Magnetfeldes gemäß der Formel

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi \cdot r}$$

berechnen.

[1] Skizziere das Magnetfeld eines geraden stromdurchflossenen Leiters.

[2] In einem Leiter fließt die Stromstärke $I = 1 \text{ A}$. Stelle das Verhalten der magnetischen Flussdichte B in einem B - r -Diagramm dar. Es gilt: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

[3] Erläutere, wie man obige Gleichung verwenden könnte um die magnetische Feldkonstante μ_0 zu experimentell zu bestimmen.

Beispiel 4: Beugung am Einzelspalt

Rotes Laserlicht der Wellenlänge $\lambda = 633 \text{ nm}$ trifft auf einen Einzelspalt mit der Spaltbreite $b = 0,1 \text{ mm}$. Ein Projektionsschirm befindet sich in 8 m Entfernung hinter dem Einzelspalt.

[1] Beschreibe, was man auf dem Projektionsschirm beobachten kann.

[2] Berechne die Beugungswinkel und Lagen der Minima der ersten bis zur vierten Ordnung.

[3] Die relative Intensität I_n / I_0 des n -ten Maximums bezüglich der Intensität des I_0 des Hauptmaximums kann man näherungsweise mit der Gleichung

$$\frac{I_n}{I_0} = \frac{1}{(2n+1)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \quad \text{mit } n = 1, 2, 3, \dots \text{ berechnen.}$$

[3.1] Berechne die relativen Intensitäten des ersten, zweiten und dritten Maximums.

[3.2] Beschreibe, inwiefern die Ergebnisse aus Aufgabe [3.1] die Beobachtungen der Beugung des Laserlichts am Einzelspalt widerspiegeln.

[3.3] Verwende die Ergebnisse von Aufgabe [2] und [3.1] um ein Intensitätsdiagramm für die Beugung am obigen Einzelspalt zu zeichnen.

7.2 Technik erfordert anwendungsorientierte Größen

Bei technischen Anwendungen physikalischer Gesetze ist es manchmal notwendig passende neue „anwendungsorientierte Größen“ zu definieren, die passend Eigenschaften von Geräten oder technischen Vorgängen beschreiben. Diese Größen werden daher häufig aus bekannten physikalischen Größen passend zusammengesetzt.

Die folgenden Aufgaben zeigen Dir entsprechende Beispiele.

Geübte Fertigkeiten:

1. Erkennen bekannter Größen in der neuen definierten Größe.
2. Einschätzen des Sinns der neuen Größe im technischen Zusammenhang.

Beispiel 1: Trennfaktor bei Zentrifugen

Als Maß für die Trennwirkung einer Zentrifuge dient der *Trennfaktor* Z . Er wird definiert als Quotient $Z = \frac{F_Z}{F_G}$ aus der Zentrifugalkraft F_Z und der Gewichtskraft F_G , die auf ein Feststoffteilchen in der Suspension wirken.

[1] Erkläre, inwiefern dieser Quotient sich als ein Maß für die Trennwirkung eignet.

[2] Zeige, dass die Gleichung $Z = \frac{(2\pi f)^2 \cdot r}{g}$ gilt.

[3] Erläutere, welche Abhängigkeiten die obige Gleichung zeigt.

[4] Der Rotor einer Laborzentrifuge habe den Durchmesser 30 cm. Bei einer Frequenz von 9000 Umdrehungen pro Minute soll der Feststoffanteil aus einer Suspension abgetrennt werden. Berechne den Trennfaktor Z .

Beispiel 2: Der Leitwert bei elektrischen Strömen

Bei elektrischen Leitern wird das Verhältnis aus Spannung U und elektrischer Stromstärke I als der elektrische Widerstand R bezeichnet. Bei einem ohmschen Widerstand R ist das

Verhältnis $R = \frac{U}{I}$ konstant.

Alternativ benennt man bei der Betrachtung von Strömen den Kehrwert $\frac{1}{R}$ als den *Leitwert* G , den man in der Einheit *1 Siemens* angibt.

[1] Benenne den Zusammenhang zwischen den Einheiten Siemens und Ohm.

[2] Erläutere ein Motiv, warum man den Leitwert definiert.

[3] Erinnere dich an Gesetze für den elektrischen Widerstand bei Reihen- und Parallelschaltungen. Wie würden diese entsprechend für den Leitwert aussehen?