

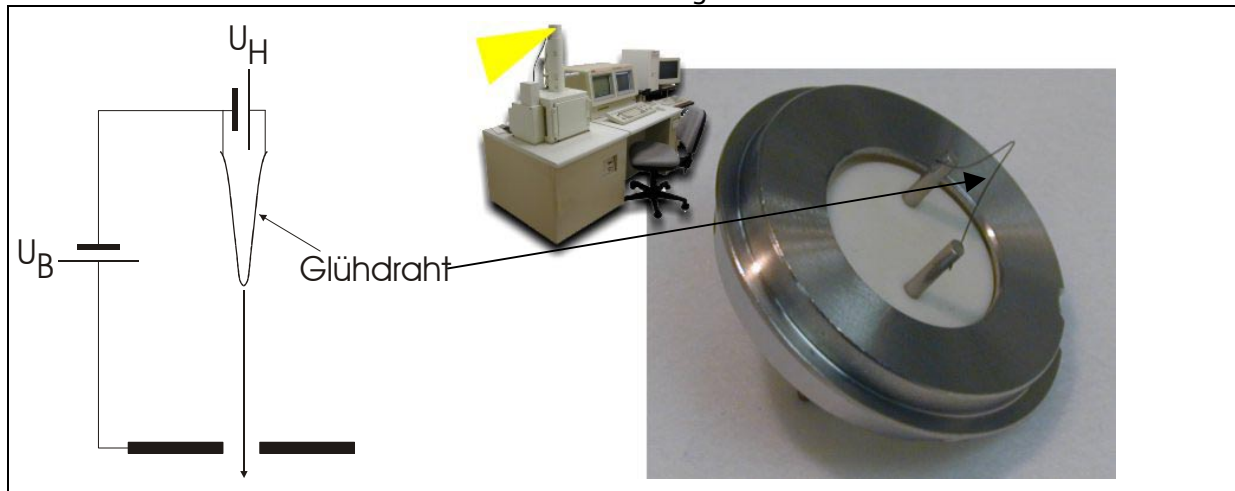
Code-Name:

## 1. Wie funktioniert die Elektronenkanone?

In der Zeichnung ist der prinzipielle Aufbau einer Elektronenkanone zu sehen. Rechts ist der dazu notwendige Heizdraht sowie seine Position im Mikroskop mit einem Pfeil markiert.

Klären Sie in Ihrer Gruppe folgende Fragen anhand der Zeichnung:

1. Warum muss der Glühdraht geheizt werden, um freie Elektronen zu erhalten?
2. Wie wird der Draht geheizt?
3. Wie werden die freien Elektronen beschleunigt?



Falls Ihnen die Funktionsweise einer Elektronenkanone nicht mehr in Erinnerung sein sollte, so finden Sie zusätzliche Informationen im Briefumschlag auf dem Lehrertisch.

### Arbeitsaufträge:

1. Tragen Sie Schlüsselbegriffe (z.B. „glühelektrischer Effekt“) in die Felder ein, die Ihnen für das Verständnis der Elektronenkanone wichtig erscheinen:


2. **Beantworten Sie folgende Verständnisfragen:** (Falls Sie Hilfe benötigen: Die Antworten finden Sie auf den Lösungskärtchen auf dem Lehrertisch.)

1. Wozu wird der Draht zum Glühen gebracht?
2. Wie muss die Beschleunigungsspannung gepolt sein? (mit Begründung)
3. Wie kann man die Zahl der freien Elektronen erhöhen?
4. Wofür werden diese Elektronen im Rasterelektronenmikroskop benötigt?

## 2. Wie kann man den Elektronenstrahl ablenken?

Um das abzubildende Objekt abzurastern, muss der Elektronenstrahl abgelenkt werden. Dies geschieht in der Regel mit Hilfe einer Ablenkspule.

Im Magnetfeld der stromdurchflossenen Ablenkspule wird eine Lorentzkraft auf die Elektronen des Strahls ausgeübt. Die Richtung der Lorentzkraft ergibt sich mit Hilfe der Drei-Finger-Regel der linken Hand aus der Bewegungsrichtung der Elektronen und der Richtung des Magnetfelds der Spule.

Bearbeiten Sie bitte folgende Aufgaben:

1. Bestimmen Sie mit der Drei-Finger-Regel die Richtung des Magnetfelds aus der Ablenkung des Elektronenstrahls.
2. Überprüfen Sie das Ergebnis mit Hilfe der Linke-Hand-Regel.



Falls Ihnen die beiden verwendeten Regeln nicht mehr in Erinnerung sein sollten, so finden Sie zusätzliche Informationen im Briefumschlag. Auch die Erklärung ist dort enthalten!

### Arbeitsaufträge:

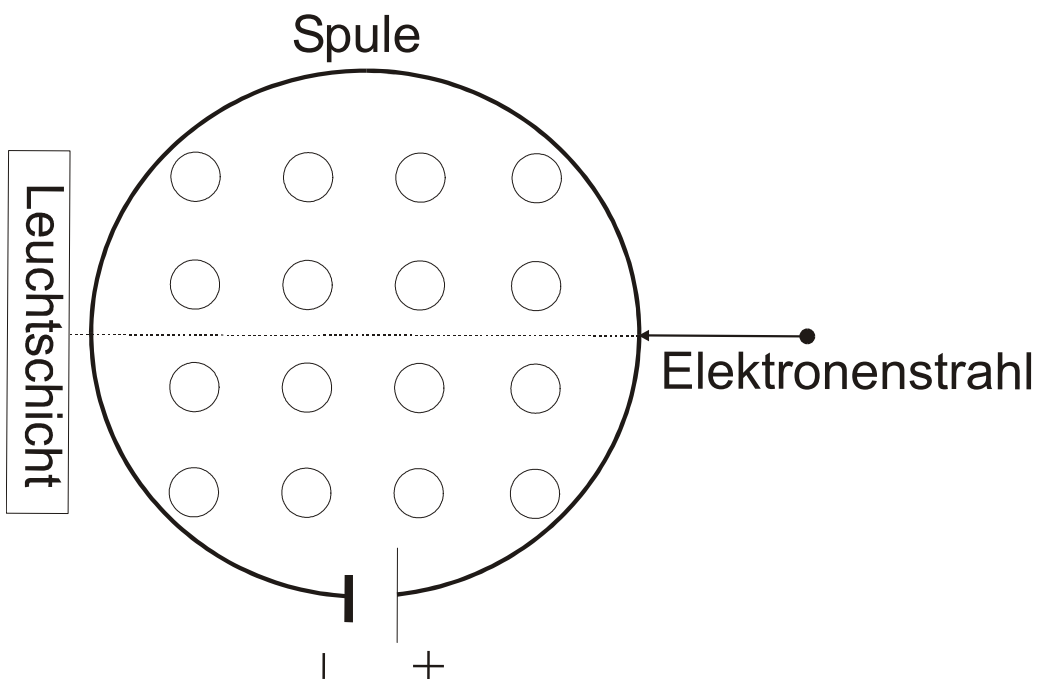
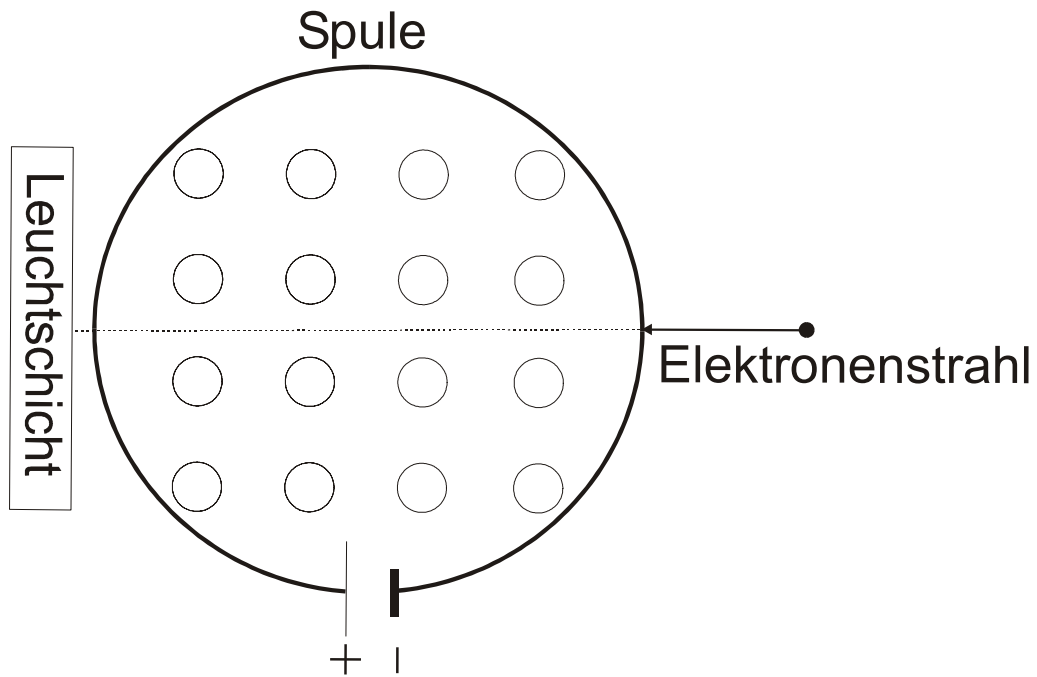
1. Tragen Sie Schlüsselbegriffe (z.B. „Lorentzkraft“) in die Felder ein, die Ihnen für das Verständnis der Strahlablenkung wichtig erscheinen:


2. Bearbeiten Sie zur Verständniskontrolle das folgende **Übungsblatt** „Ablenkung des Elektronenstrahls“. Mit Hilfe der beiden Regeln soll für die beiden dargestellten Polungen die Ablenkrichtung vorhergesagt werden. Die Lösung finden Sie auf der Lösungskarte auf dem Lehrertisch.

## Ablenkung des Elektronenstrahls

Zeichnen Sie für die beiden angegebenen Polungen der Spule

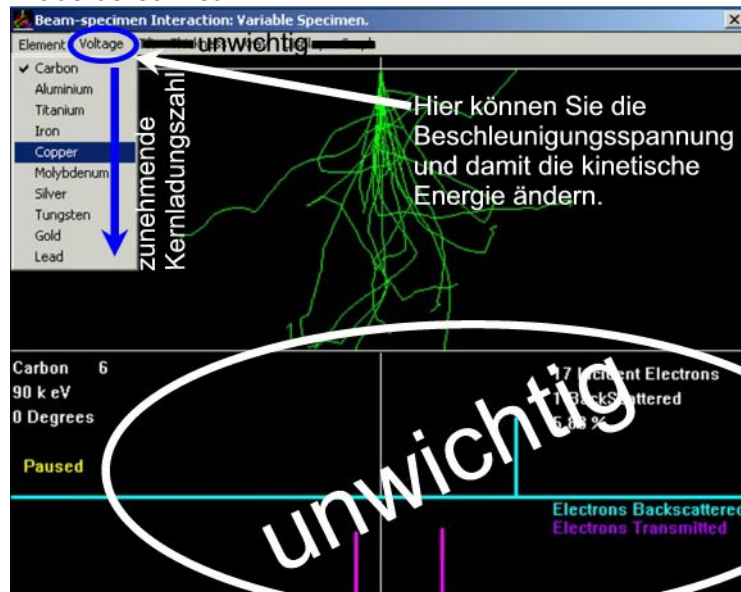
1. das Magnetfeld *mit Hilfe der Linken-Hand-Regel*<sup>1</sup>
2. die Bahn des Elektrons (Lorentzkraft *mit Hilfe der Drei-Finger-Regel der linken Hand*).



<sup>1</sup> Magnetfeld aus der Zeichenebene heraus: Symbol  $\odot$ . Magnetfeld in die Zeichenebene hinein: Symbol  $\otimes$   
 © Dr. Roland Berger (2003)

### 3. Wovon hängt die Eindringtiefe der Elektronen in die Probe ab?

Laden Sie am Computer die Seite [www.matter.org.uk/tem/electron\\_scattering.htm](http://www.matter.org.uk/tem/electron_scattering.htm)  
Dort finden Sie ein Simulationsprogramm, welches die Bahnen der Primärelektronen in einer Probe berechnet:



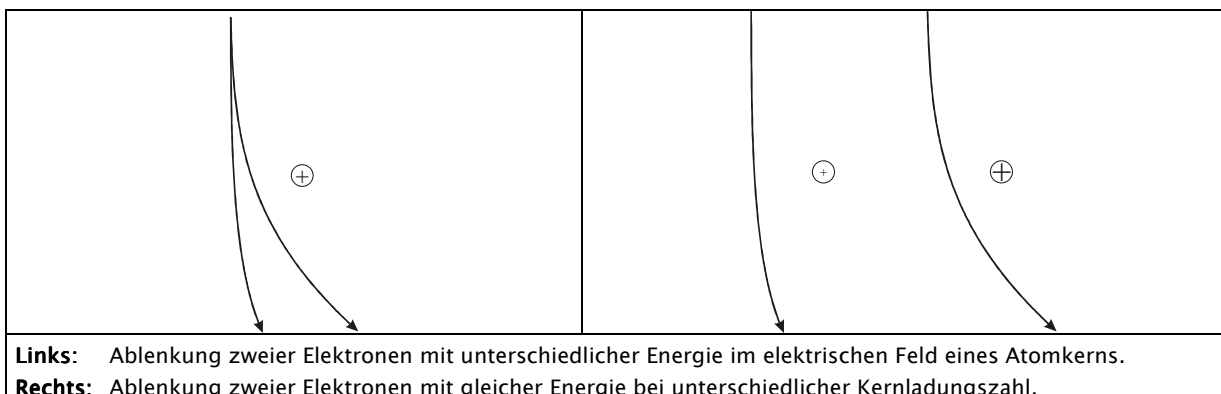
Im Folgenden soll die Abhängigkeit der Eindringtiefe der Primärelektronen

- von der **Energie** der auftreffenden Primärelektronen und
- von der **Kernladungszahl**  $Z$  des Materials, in welches die Primärelektronen eindringen, untersucht werden. Die Kernladungszahl ist die Zahl der Protonen im Kern.

Erarbeiten Sie mit Ihrer Gruppe die Lösung folgender Fragen:

Klären Sie in Ihrer Gruppe folgende Fragestellungen:

1. Warum ist die Bahnlänge der Primärelektronen (grüne Linien im Simulationsprogramm) immer größer als ihre Eindringtiefe in die Probe?
2. Überprüfen Sie mit Hilfe des Programms, wie die Eindringtiefe der Primärelektronen
  - a) von ihrer Energie (bei fester Kernladungszahl  $Z$ ) und
  - b) von der Kernladungszahl des Materials (bei fester Energie des auftreffenden Primärelektrons) abhängt.
3. Wie können diese Abhängigkeiten mit Hilfe der Ablenkung der Primärelektronen durch die Atomkerne („elastische Streuung“) erklärt werden? Beachten Sie dazu auch die folgenden Abbildungen:



Falls Sie Unterstützung benötigen, beachten Sie bitte die zusätzlichen Informationen im Briefumschlag auf dem Lehrertisch.

Dort finden Sie auch Hintergrundinformationen zur Rolle der inelastischen Streuung.

Beantworten Sie die Arbeitsaufträge auf dem folgenden Blatt.

**Arbeitsaufträge:**

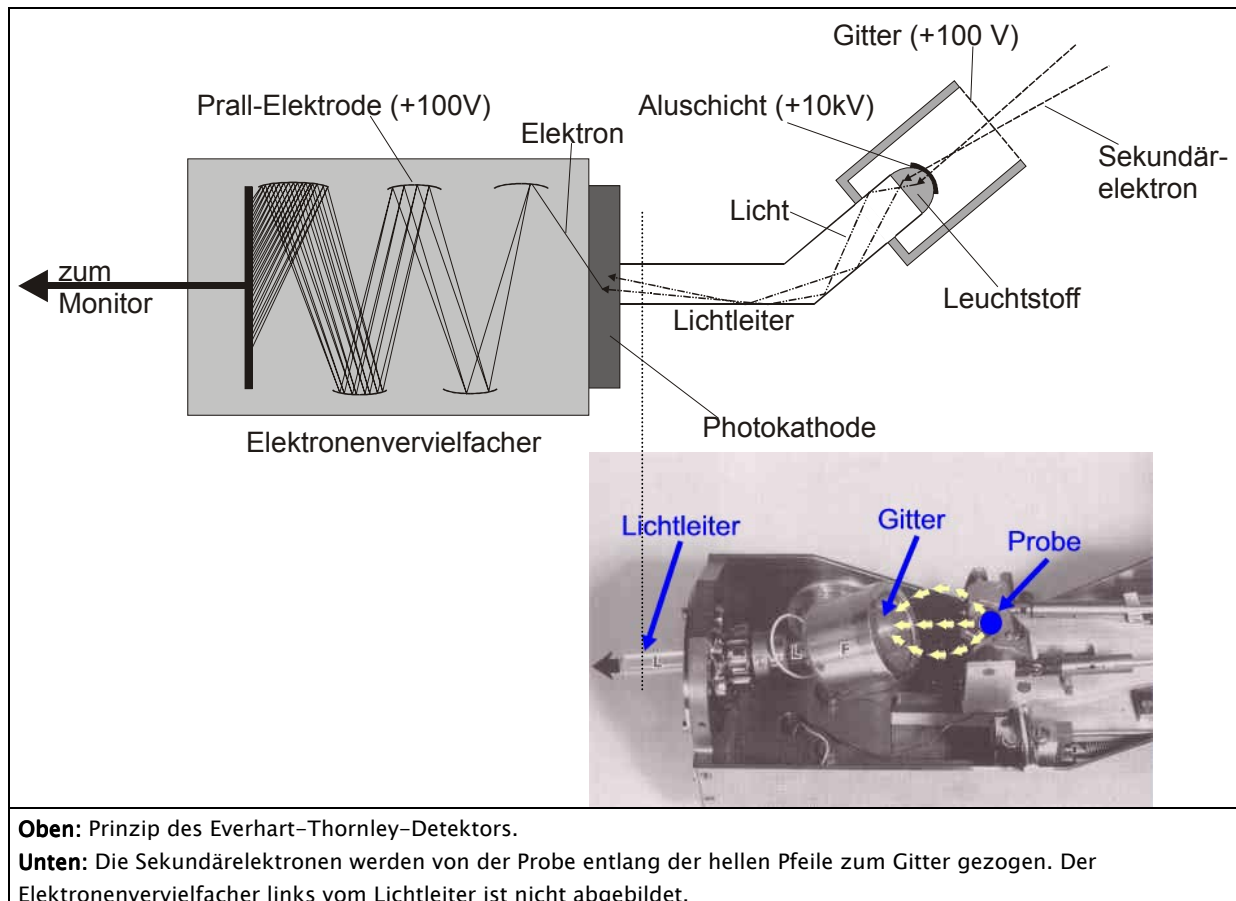
1. Tragen Sie Schlüsselbegriffe (z.B. „Kernladungszahl“) in die Felder ein, die Ihnen für das Verständnis der Abhängigkeit der Eindringtiefe von Energie und Kernladungszahl wichtig erscheinen:


2. **Beantworten Sie folgende Verständnisfragen:** (Falls Sie Hilfe benötigen: Die Antworten finden Sie auf den Lösungskärtchen auf dem Lehrertisch.)

1. Warum unterscheidet sich die Bahnlänge der Primärelektronen von ihrer Eindringtiefe?
2. Wie hängt die Eindringtiefe der Elektronen von den beiden Größen „Energie der Primärelektronen“ und „Kernladungszahl“ ab? Bilden Sie jeweils eine „Je-Desto-Formulierung“.
3. Wie lassen sich diese Abhängigkeiten mit der inelastischen Streuung begründen? (Die Lösung zu dieser Frage finden Sie im Umschlag unter „Ausführliche Beschreibung“.)
4. Warum muss bei der Argumentation jeweils eine der Größen konstant gehalten werden?

#### 4. Wie funktioniert der Elektronendetektor?

Die Sekundärelektronen, die aus der Probe austreten, werden mit dem *Everhart-Thornley-Detektor* registriert:



Die in der Zeichnung von rechts kommenden Sekundärelektronen werden (wie im Unterricht besprochen) von dem positiv gepolten Gitter angezogen. Die meisten der Elektronen gelangen durch das Gitter. Dort stehen sie unter dem Einfluss des starken elektrischen Feldes zwischen dem Gitter und der ca. 50 Nanometer dünnen Metallschicht auf der Oberfläche eines Leuchtstoffs (des so genannten Szintillators) und werden dadurch auf hohe Energie beschleunigt. Diese Energie reicht aus, um die dünne Metallschicht zu durchdringen und den Szintillator zum Leuchten anzuregen. Das Licht wird mit Hilfe eines Lichtleiters auf die so genannte Photokathode geleitet. Dort setzt das Licht Elektronen frei<sup>1</sup>. Diese werden im Elektronenvervielfacher von einer positiv gepolten Prallelektrode angezogen. Beim Aufprall werden pro Elektron ca. 10 weitere Elektronen freigesetzt. Diese werden von weiteren Prall-Elektroden angezogen und liefern jeweils wiederum ca. 10 freie Elektronen. Über mehrere Prall-Elektroden entsteht somit eine regelrechte Elektronenlawine. Sie dient als Signal zur Helligkeitsregelung des Bildpunktes auf dem Monitor. Das Signal ist umso stärker, je mehr Sekundärelektronen die Probe pro Sekunde verlassen haben.

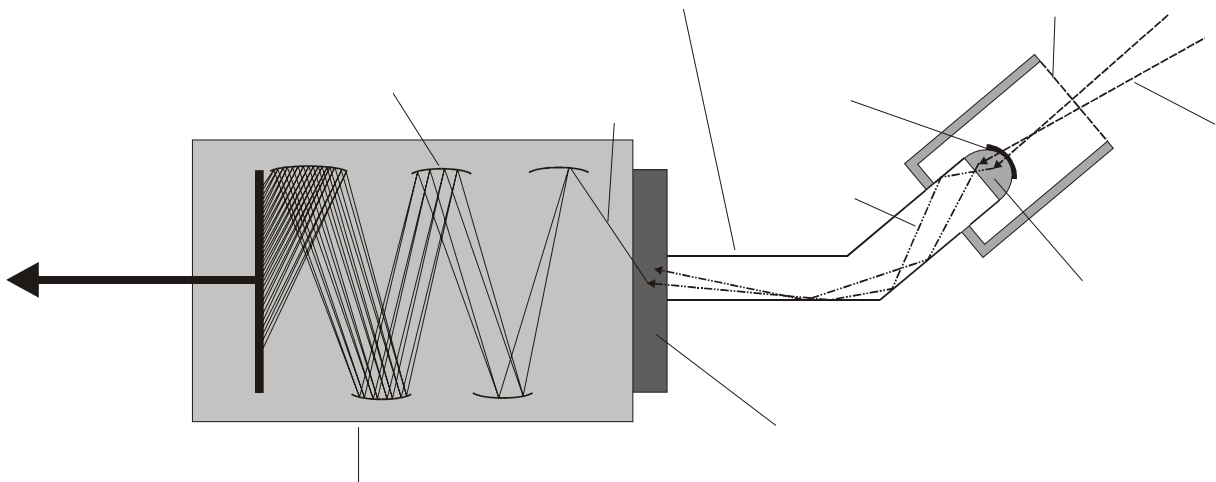
Es wirkt zunächst etwas umständlich, mit Hilfe der Sekundärelektronen Licht zu erzeugen, und dieses an der Photokathode Elektronen freisetzen zu lassen. Man möchte aber den relativ großen Elektronenvervielfacher außerhalb des Vakuums haben, in der sich die Probe befinden muss. (warum muss sich die Probe im Vakuum befinden?). Dieser Vakuumbereich soll aber möglichst klein gehalten werden. Bearbeiten Sie die Arbeitsaufträge auf dem folgenden Blatt.

<sup>1</sup> Diesen so genannten „Photoeffekt“ werden Sie im Rahmen der Quantenphysik noch näher kennen lernen.

**Arbeitsaufträge:**

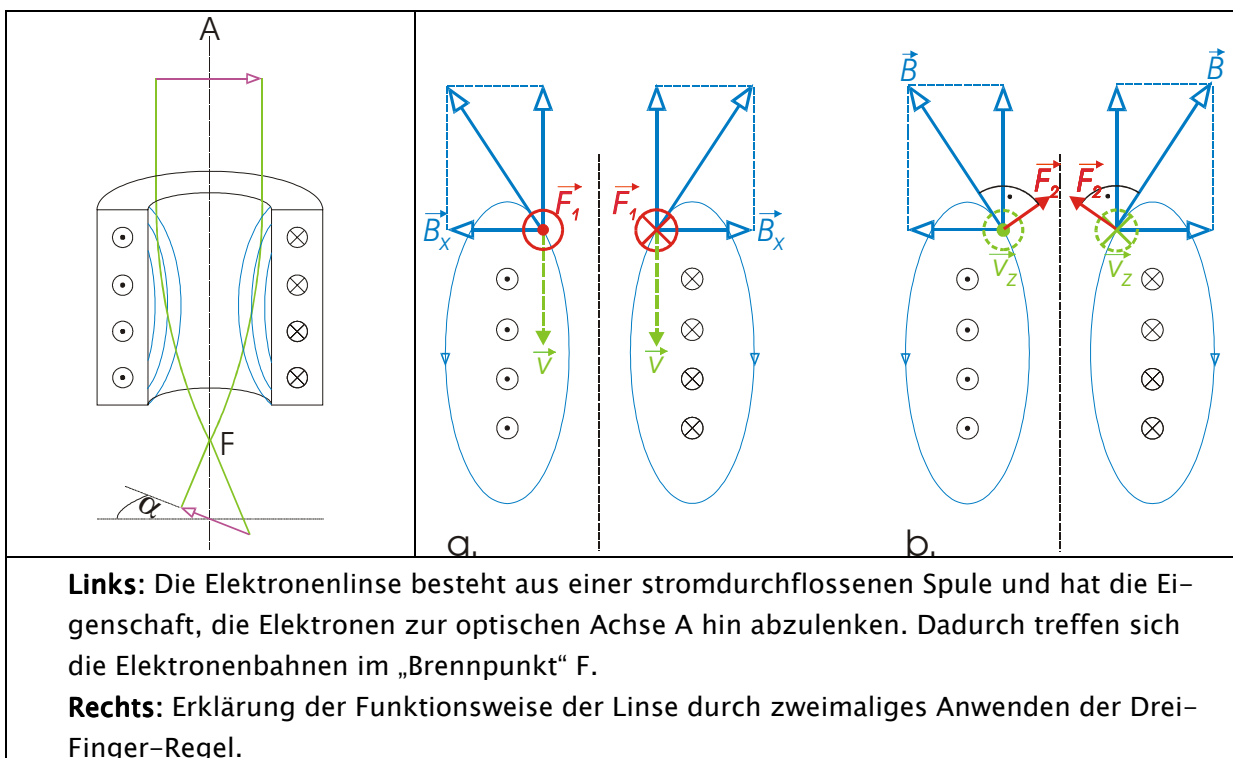
1. Tragen Sie Schlüsselbegriffe (z.B. „Elektronenvervielfacher“) in die Felder ein, die Ihnen für das Verständnis des Detektors wichtig erscheinen:


2. Beschriften Sie die einzelnen Bestandteile des Elektronendetektors und wiederholen Sie für sich deren Funktion:



## 5. Wie funktioniert eine Linse für Elektronen?

Beim Durchgang durch eine stromdurchflossene Spule wird der Elektronenstrahl gedreht und gebündelt (Abb. unten links). Diese beiden Beobachtungen lassen sich mit den beiden Abbildungen unten rechts erklären. Dies geschieht durch zweimaliges Anwenden der Drei-Finger-Regel. Das erste Anwenden zeigt, dass auf die Elektronen eine Lorentzkraft  $\vec{F}_1$  senkrecht zur Zeichenebene wirkt. Dadurch erhalten die Elektronen eine Geschwindigkeitskomponente  $\vec{v}_z$  senkrecht zur Zeichenebene und erfahren somit eine Drehung um die Spulenchse. Die zweite Anwendung der Drei-Finger-Regel ergibt, dass diese zusätzliche Geschwindigkeitskomponente eine Lorentzkraft  $\vec{F}_2$  verursacht. Diese ist zur Spulenchse gerichtet und bewirkt daher die Fokussierung.

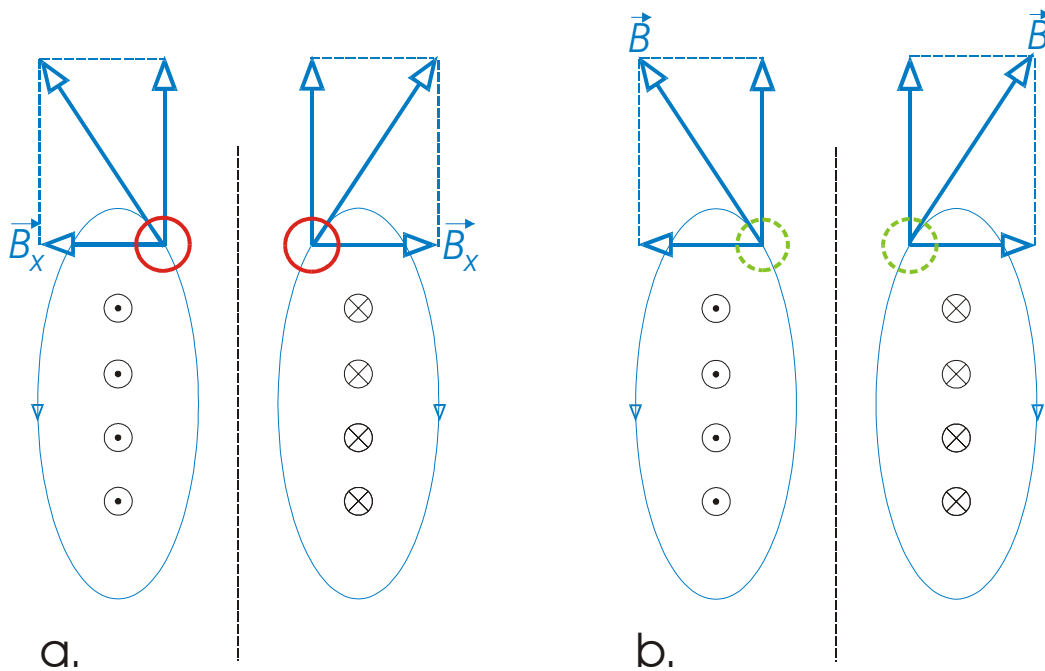


Falls Sie Unterstützung benötigen, beachten Sie bitte die zusätzlichen Informationen im Briefumschlag auf dem Lehrertisch.

**Arbeitsaufträge:**

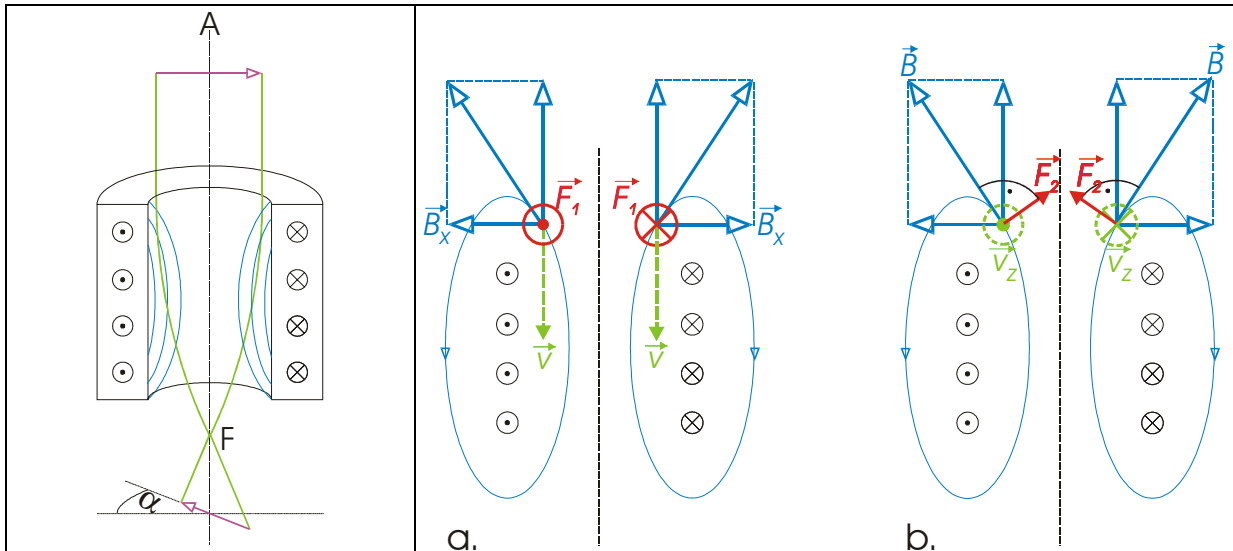
1. Tragen Sie in die freien Felder geeignete **Schlüsselbegriffe** ein, die Ihnen für das Verständnis des Themas wichtig erscheinen:


2. Wenden Sie die Drei-Finger-Regel der linken Hand auf die beiden Zeichnungen an und begründen Sie damit, dass die Elektronenbahn gedreht wird und zur gestrichelten Achse abgelenkt werden. Zeichnen Sie die relevanten Vektoren in die beiden Abbildungen ein:





## Informationen zum Thema „Elektronenlinse“



### Ausführliche Beschreibung:

**Abbildung Links:** Zwei parallel in das inhomogene Magnetfeld (blau) einfallende Elektronen (grün) werden zur Achse A hin abgelenkt.

**Abbildung Rechts:** Die Erklärung dieser fokussierenden Wirkung erfolgt in zwei Schritten entsprechend der Abbildungen a. und b.

**Zu Abbildung a.:** Die beiden Elektronen treten in der Zeichenebene parallel zur Spulenachse A mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  (gestrichelte grüne Pfeile) in das inhomogene Magnetfeld ein. Gezeichnet ist der Übersichtlichkeit halber nur eine Feldlinie (blau). Der Vektor der magnetischen Feldstärke und seine Komponenten in x-Richtung ( $\vec{B}_x$ ) und y-Richtung am Ort des Elektrons sind blau eingezeichnet (offene Pfeilspitzen). Die Lorentzkraft  $\vec{F}_1$  wirkt senkrecht zu  $\vec{v}$  und  $\vec{B}_x$  aus der Zeichenebene heraus (rotes Symbol:  $\odot$ ) bzw. in die Zeichenebene hinein (rotes Symbol:  $\otimes$ ).  $\vec{F}_1$  bewirkt also eine Rotation der Elektronen um die Spulenachse.

**Zu Abbildung b.:** Die Lorentzkraft  $\vec{F}_1$  aus Abbildung a. bewirkt eine Geschwindigkeitskomponente  $\vec{v}_z$  aus der Zeichenebene heraus (gestricheltes grünes Symbol:  $\odot$ ) bzw. in die Zeichenebene hinein (gestricheltes grünes Symbol:  $\otimes$ ). Die Lorentzkraft  $\vec{F}_2$  wirkt senkrecht zu  $\vec{v}_z$  und  $\vec{B}$ .  $\vec{F}_2$  beschleunigt also die beiden Elektronen in Richtung zur Spulenachse. Einfallende Elektronen werden daher zur Spulenachse hin abgelenkt und der Elektronenstrahl somit fokussiert.



## Informationen zur Funktion der Elektronenkanone

### Überlegen Sie:

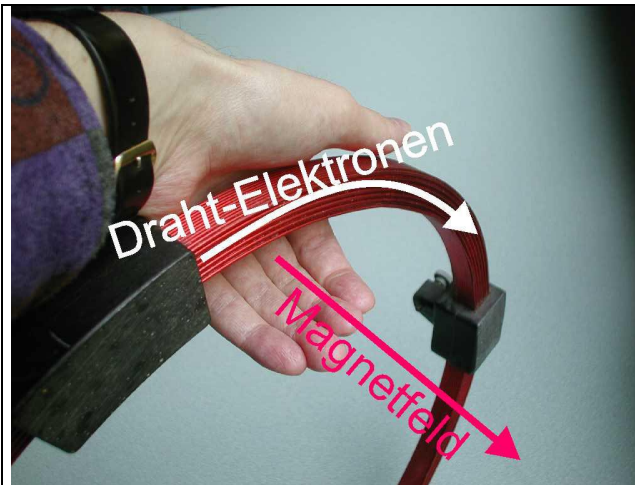
1. Was bedeutet eine höhere Temperatur für die Geschwindigkeit der Elektronen im Draht?
2. Warum können nur schnelle Elektronen den Draht verlassen?
3. Warum werden die freien Elektronen von der elektrisch positiv gepolten Platte angezogen?

### Ausführliche Beschreibung:

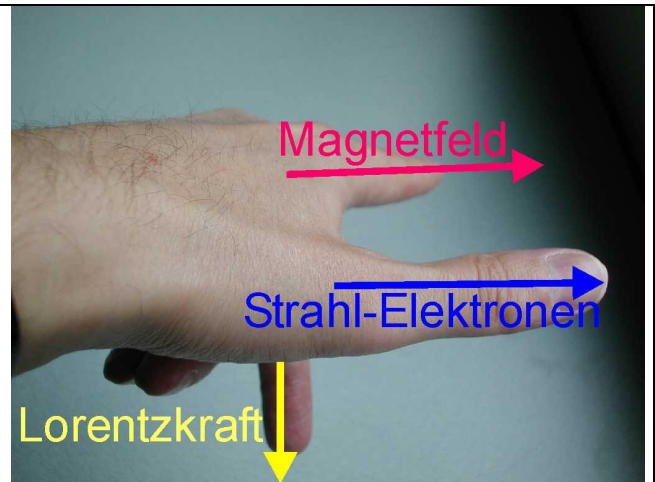
- In der Abbildung ist der prinzipielle Aufbau zur Erzeugung des Elektronenstrahls für die Elektronenmikroskopie zu sehen. Diese „Elektronenkanone“ besteht aus einem Glühdraht aus Metall (Wolfram) und einer Beschleunigungsstrecke.
- Mit Hilfe der Heizspannung  $U_H$  kann man den Glühdraht wie die Glühwendel in einer Glühlampe zum Leuchten bringen. Dabei wird nicht nur Licht erzeugt, sondern auch Elektronen freigesetzt. Dies ist auf den so genannten „glühelektrischen Effekt“ zurückzuführen: Die Wärmebewegung der Elektronen im Metall wird mit zunehmender Temperatur immer stärker. Die schnellsten Elektronen können die Anziehung durch den Draht überwinden und ihn verlassen.
- Diese freien Elektronen haben nach dem Verlassen des Glühdrahts eine Energie von etwa 1 Elektronenvolt (eV). Für die Elektronenmikroskopie sind aber wesentlich höhere Energien im Bereich von einigen 1000 eV notwendig. Daher werden die freien Elektronen mit Hilfe der Beschleunigungsspannung  $U_B$  auf den gewünschten Wert beschleunigt. Die Platte muss mit dem positiven Pol der Spannungsversorgung verbunden sein, da nur so die negativ geladenen Elektronen beschleunigt werden.



## Informationen zur Ablenkung des Elektronenstrahls

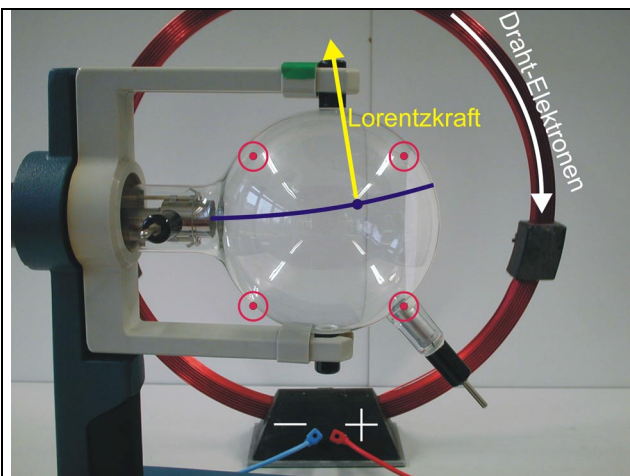


**Linke-Hand-Regel zur Bestimmung der Magnetfeldrichtung in der Spule.** Der Daumen zeigt in Bewegungsrichtung der Elektronen im Spulendraht, die vom Minus- zum Pluspol der Stromquelle fließen. Die gekrümmten Finger geben die Magnetfeldrichtung in der Spule an.

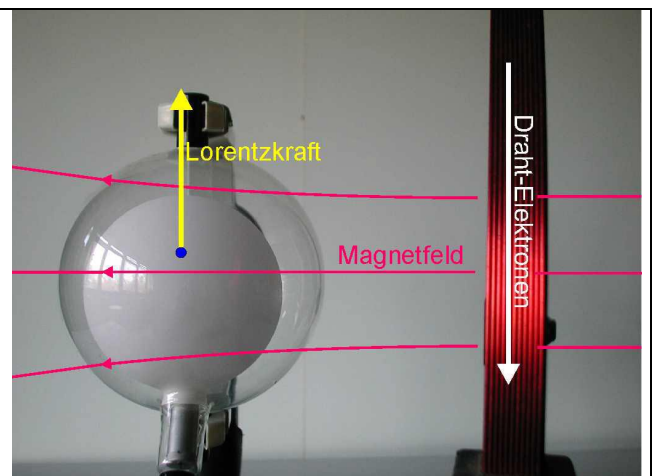


**Drei-Finger-Regel der linken Hand zur Bestimmung der Richtung der Lorentzkraft auf den Primärelektronenstrahl.**

- Daumen: Bewegungsrichtung der Strahl-Elektronen.
- Zeigefinger: Richtung des Magnetfeldes (mit der Linke-Hand-Regel ermittelt).
- Mittelfinger: Lorentzkraft auf die Strahlelektronen



Seitenansicht



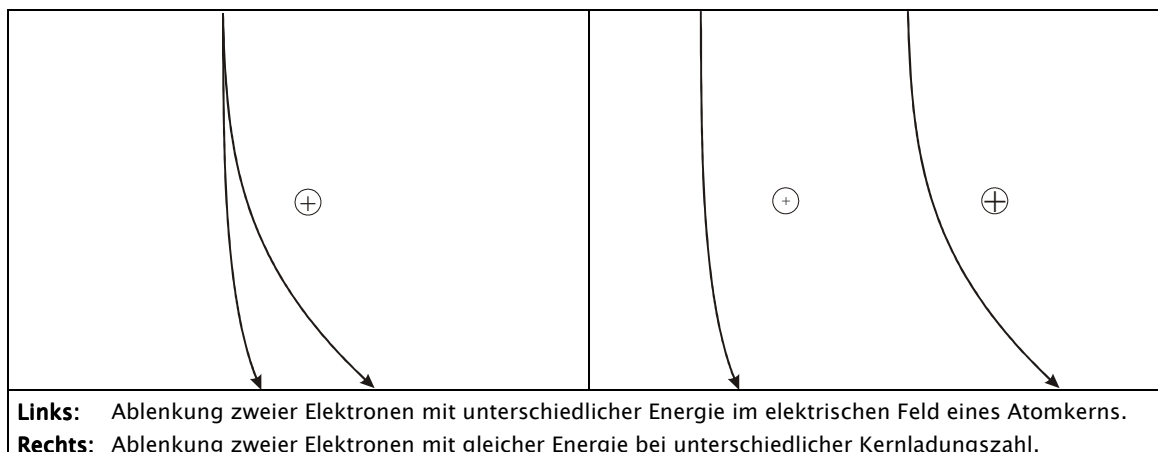
Ansicht von vorne



## Informationen zum Thema „Eindringtiefe“

### Überlegen Sie:

1. Was bedeutet „elastische Streuung“ im Vergleich zur „inelastischen Streuung“?
2. Die Kernladungszahl gibt die Anzahl der Protonen im Kern an. Je größer die Kernladungszahl, desto größer ist also die anziehende Kraft auf ein vorbeifliegendes Primärelektron.



### Ausführliche Beschreibung:

Elastische Streuung = Ablenkung im elektrischen Feld der Atomkerne der Probe.

Mit Hilfe des Programms lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen und auf die elastische Streuung zurückführen (vgl. Abbildung oben):

1. *Die Eindringtiefe eines Primärelektrons nimmt (bei konstanter Kernladungszahl) mit zunehmender Energie zu.* Denn die Primärelektronen werden bei hoher Geschwindigkeit durch die elektrische Anziehung der Protonen im Kern weniger abgelenkt als bei geringer Geschwindigkeit, sodass sie tiefer in die Probe eindringen können (Abb. links).
2. *Die Eindringtiefe eines Primärelektrons nimmt (bei konstanter Anfangsenergie) mit zunehmender Kernladungszahl ab.* Denn je mehr Protonen sich im Kern eines Probenatoms befinden, desto stärker ziehen sie das Primärelektron an. Dann ist die Bahn stärker gekrümmt und damit die Eindringtiefe geringer (vgl. Abb. rechts).

Als Hintergrundinformation für Sie: Neben der elastischen Streuung trägt auch die inelastische Streuung zu den beiden im Simulationsprogramm beobachteten Abhängigkeiten bei:

1. *Die Eindringtiefe eines Primärelektrons nimmt (bei konstanter Kernladungszahl) mit zunehmender Anfangsenergie zu.*  
Denn je höher die Energie (und damit die Geschwindigkeit), desto kürzer wirkt die abstoßende Kraft auf die Atomelektronen ein. Der Energieverlust des Primärelektrons ist daher kleiner als bei geringer Anfangsenergie und es dringt weiter in die Probe ein.
2. *Die Eindringtiefe eines Primärelektrons nimmt (bei konstanter Anfangsenergie) mit zunehmender Kernladungszahl ab.*

Denn ein Atom mit höherer Kernladungszahl hat auch mehr Atomelektronen (denn insgesamt ist es ja neutral!). Je größer die Zahl der Atomelektronen aber ist, desto mehr Sekundärelektronen werden beim Vorbeiflug durch das Primärelektron erzeugt. Das Primärelektron verliert also pro Atom mehr Energie und seine Eindringtiefe ist daher kleiner.