

REAL UND DIGITAL KOMBINIERT

Versuche mit Elektronen in E- und B-Feld

Stefan Richtberg, Wilhelmsgymnasium München

Inhalt

I. Überblick über die „Lernumgebung“

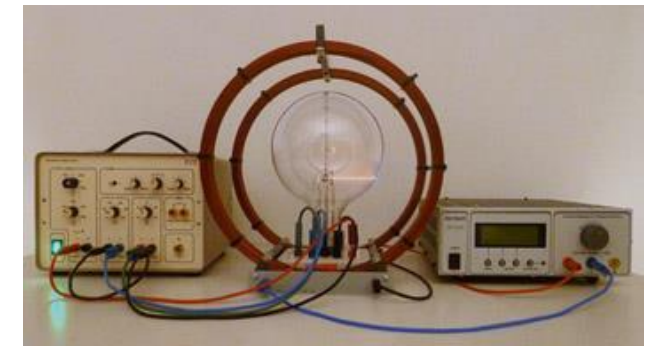
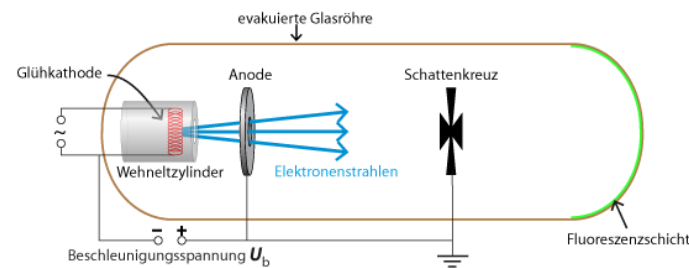
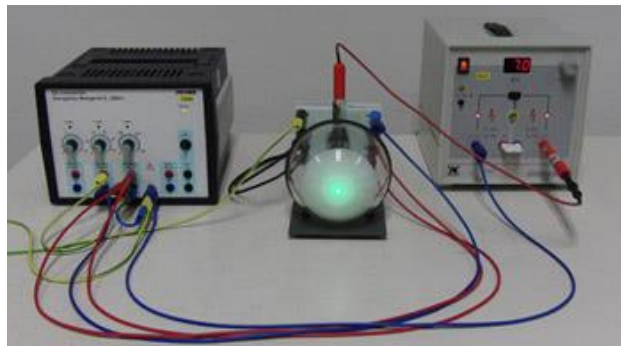
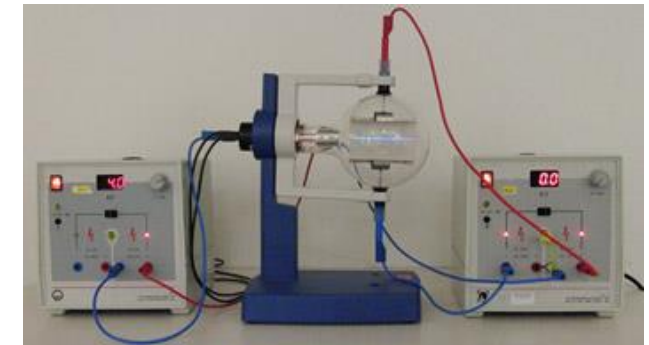
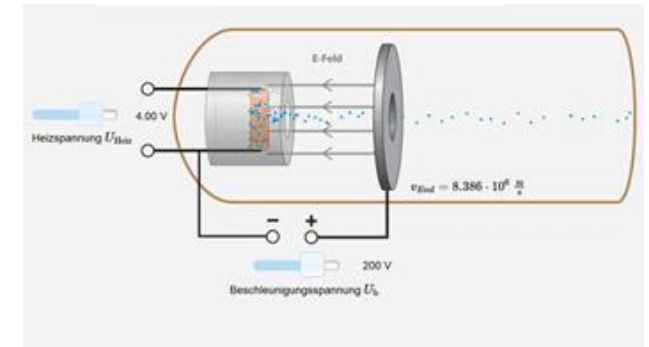
II. Verknüpfung von real und digital

- in der Lernumgebung
- beim Einsatz im Unterricht

III. Beispielhafte Einsatzmöglichkeiten und Aufgaben

Die „Lernumgebung“

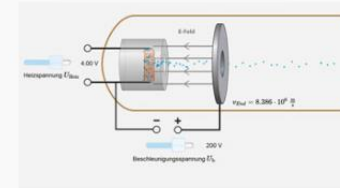
- Elektronenkanone
- Elektronenablenkröhre
- Kathodenstrahlröhre im B-Feld
- (Schattenkreuzröhre)
- Elektronenbeugung



Die „Lernumgebung“

- Kein Login
- Werbefrei
- Per iframe einbettbar
- „Responsive“

Elektronenkanone (Längsfeld)



Aufbau

Simulation

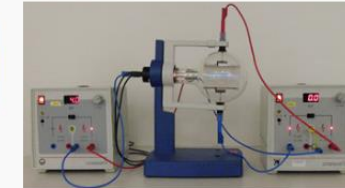
Berechnung der Endgeschwindigkeit (klassisch)

relativistische Berechnung

Vergleich klassisch vs. relativistisch

Übungen und Aufgaben

Elektronenablenkröhre (Querfeld)



Aufbau und Hypothesen

Experimentelle Herangehensweise

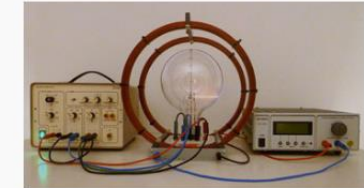
Kräfte und Bewegungsgleichungen

Analogie mit dem waagerechten Wurf

Geschwindigkeit und Winkel

Übungen und Aufgaben

Elektronen im B-Feld (Kathodenstrahlröhre)



Magnetfeld zweier Helmholtzspulen

Aufbau und Experiment

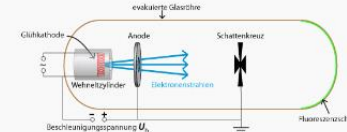
e/m-Bestimmung

Schraubenbahnen

Anwendungen

Übungen und Aufgaben

Schattenkreuzröhre



geradlinige Ausbreitung

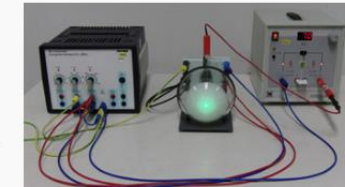
Aufladung des Kreuzes

Drehung im axialen B-Feld

Linseffekt im homogenen Feld

magnetische Elektronenlinse (Elektronenoptik)

Elektronenbeugung



phänomenbasierter Zugang

Bragg-Bedingung

de Broglie Wellenlänge

1. oder 2. Beugungsordnung?

Ebenenabstand von Graphit

Übungen

Lehrerinfos



Einsatz im Unterricht

Experimente "pur"

Technische Anforderungen

Veröffentlichungen

Kontakt / Changelog

Rechtliches

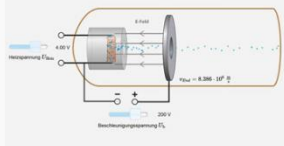
<https://virtuelle-experimente.de>

Drei Fragen an Sie

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Bewegung von Elektronen im E- und B-Feld

Elektronenkanone (Längsfeld)



Aufbau
Simulation
Berechnung der Endgeschwindigkeit (klassisch)
relativistische Berechnung
Vergleich klassisch vs. relativistisch
Übungen und Aufgaben

Elektronenablenkröhre (Querfeld)



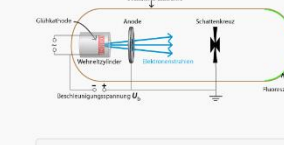
Aufbau und Hypothesen
Experimentelle Herangehensweise
Kräfte und Bewegungsgleichungen
Analogie mit dem waagerechten Wurf
Geschwindigkeit und Winkel
Übungen und Aufgaben

Elektronen im B-Feld (Kathodenstrahlröhre)



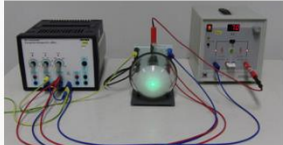
Magnetfeld zweier Helmholtzspulen
Aufbau und Experiment
e/m-Bestimmung
Schraubenbahnen
Anwendungen
Übungen und Aufgaben

Schattenkreuzröhre



geradlinige Ausbreitung
Aufladung des Kreuzes
Drehung im axialen B-Feld
Linseffekt im homogenen Feld
magnetische Elektronenlinse (Elektronenoptik)

Elektronenbeugung



phänomenbasierter Zugang
Bragg-Bedingung
de Broglie Wellenlänge
1. oder 2. Beugungsordnung?
Ebenenabstand von Graphit
Übungen

Lehrerinfos



Einsatz im Unterricht
Experimente "pur"
Technische Anforderungen
Veröffentlichungen
Kontakt / Changelog
Rechtliches

1. Kennen Sie die Lernumgebung bereits?

<https://virtuelle-experimente.de>

Drei Fragen an Sie

LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Bewegung von Elektronen im E- und B-Feld

Elektronenkanone (Längsfeld)

Aufbau
Simulation
Berechnung der Endgeschwindigkeit (klassisch)
relativistische Berechnung
Vergleich klassisch vs. relativistisch
Übungen und Aufgaben

Elektronenablenkröhre (Querfeld)

Aufbau und Hypothesen
Experimentelle Herangehensweise
Kräfte und Bewegungsgleichungen
Analogie mit dem waagerechten Wurf
Geschwindigkeit und Winkel
Übungen und Aufgaben

Elektronen im B-Feld (Kathodenstrahlröhre)

Magnetfeld zweier Helmholtzspulen
Aufbau und Experiment
e/m-Bestimmung
Schraubenbahnen
Anwendungen
Übungen und Aufgaben

Schattenkreuzröhre

geradlinige Ausbreitung
Aufladung des Kreuzes
Drehung im axialen B-Feld
Linseffekt im homogenen Feld
magnetische Elektronenlinse (Elektronenoptik)

Elektronenbeugung

phänomenbasierter Zugang
Bragg-Bedingung
de Broglie Wellenlänge
1. oder 2. Beugungsordnung?
Ebenenabstand von Graphit
Übungen

Lehrerinfos

Einsatz im Unterricht
Experimente "pur"
Technische Anforderungen
Veröffentlichungen
Kontakt / Changelog
Rechtliches

2. Haben Sie die Lernumgebung bereits im Unterricht genutzt?

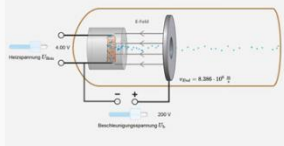
<https://virtuelle-experimente.de>

Drei Fragen an Sie

LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN

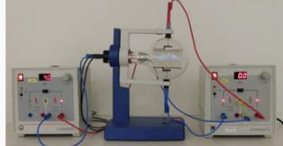
Bewegung von Elektronen im E- und B-Feld

Elektronenkanone (Längsfeld)



Aufbau
Simulation
Berechnung der Endgeschwindigkeit (klassisch)
relativistische Berechnung
Vergleich klassisch vs. relativistisch
Übungen und Aufgaben

Elektronenablenkröhre (Querfeld)



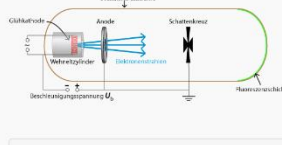
Aufbau und Hypothesen
Experimentelle Herangehensweise
Kräfte und Bewegungsgleichungen
Analogie mit dem waagerechten Wurf
Geschwindigkeit und Winkel
Übungen und Aufgaben

Elektronen im B-Feld (Kathodenstrahlröhre)



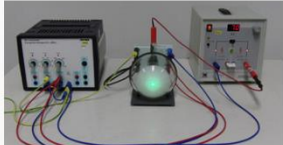
Magnetfeld zweier Helmholtzspulen
Aufbau und Experiment
e/m-Bestimmung
Schraubenbahnen
Anwendungen
Übungen und Aufgaben

Schattenkreuzröhre



geradlinige Ausbreitung
Aufladung des Kreuzes
Drehung im axialen B-Feld
Linseffekt im homogenen Feld
magnetische Elektronenlinse (Elektronenoptik)

Elektronenbeugung



phänomenbasierter Zugang
Bragg-Bedingung
de Broglie Wellenlänge
1. oder 2. Beugungsordnung?
Ebenenabstand von Graphit
Übungen

Lehrerinfos



Einsatz im Unterricht
Experimente "pur"
Technische Anforderungen
Veröffentlichungen
Kontakt / Changelog
Rechtliches

3. Haben Sie die Lernumgebung im Distanzunterricht genutzt?

<https://virtuelle-experimente.de>

Die zentrale Idee

*Alle Schüler*innen sollen sich möglichst selbstständig die Inhalte mit Hilfe der Experimente erarbeiten können und dabei verschiedene naturwissenschaftliche Arbeitsweisen und kritisches Denken trainieren.*

Elektronenkanone

- Simulation
- Klassische Rechnung
- Relativistische Betrachtung
- Interaktive Aufgaben (H5P)

klassisch

relativistisch

Übungen

Simulation einer Elektronenkanone

Erkunde mit der Simulation den Einfluss der Heizspannung und der Beschleunigungsspannung auf den Elektronenstrahl.

4.00 V
Heizspannung U_{Heiz}

E-Feld

300 V
Beschleunigungsspannung U_b

$v_{\text{End}} = 1.027 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

weiter

Die Elektronenablenkröhre

- Bilder des typischen Schulversuchs
- Hypothesen auswählen und prüfen
- Abhängigkeiten bestimmen
- Kräftebetrachtung durchführen
- Interaktive Aufgaben (H5P)

Navigation: **Hypothesen** Experiment Kräftebetrachtung Wurfanalogie Bahn hinter Kondensator Übungen

Prüfe und bewerte deine Hypothesen mit dem Experiment.

- Je größer U_p , desto größer die Ablenkung ☒ ☐
- Je kleiner U_b , desto größer die Ablenkung ☒ ☐

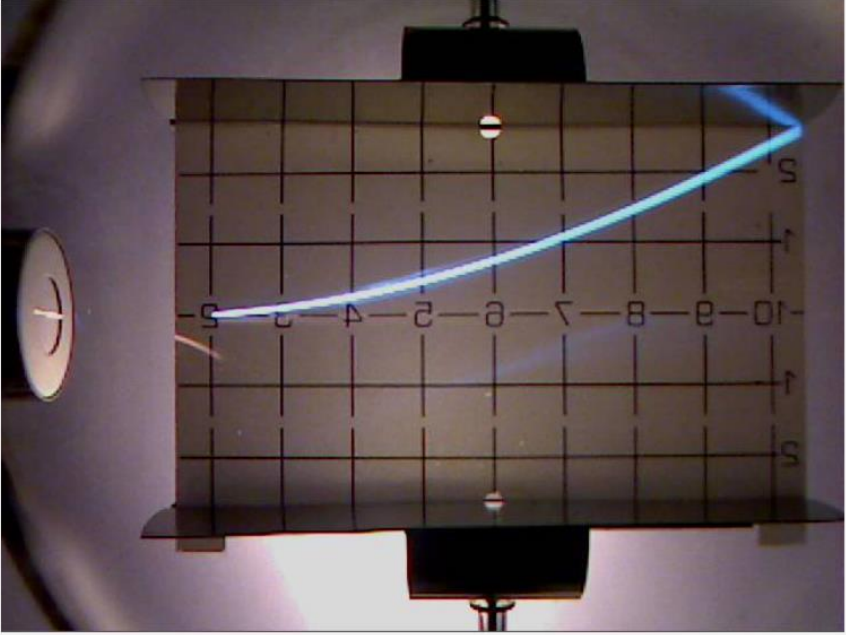
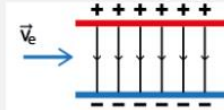
[check](#)

Steuerung:

Beschleunigungsspannung U_b 3.50 kV

Plattenspannung U_p 2.40 kV

Schematische Darstellung:



(cc) BY-ND-ND

Die Kathodenstrahlröhre

- Bilder des typischen Schulversuchs
- Hypothesen auswählen und prüfen
- e/m Bestimmung
- Anwendungen
- Interaktive Aufgaben (H5P)

Aufgabe:

Bestimme mithilfe des Experimentes e/m .

Fülle dazu für verschiedene Beschleunigungsspannungen U_b bzw. Spulenströme I die unten vorgegebene Tabelle aus und ermittle so den gesuchten Wert.

Steuerung:

Beschleunigungsspannung U_b
in der Elektronenkanone:

$U_b = 225 \text{ V}$

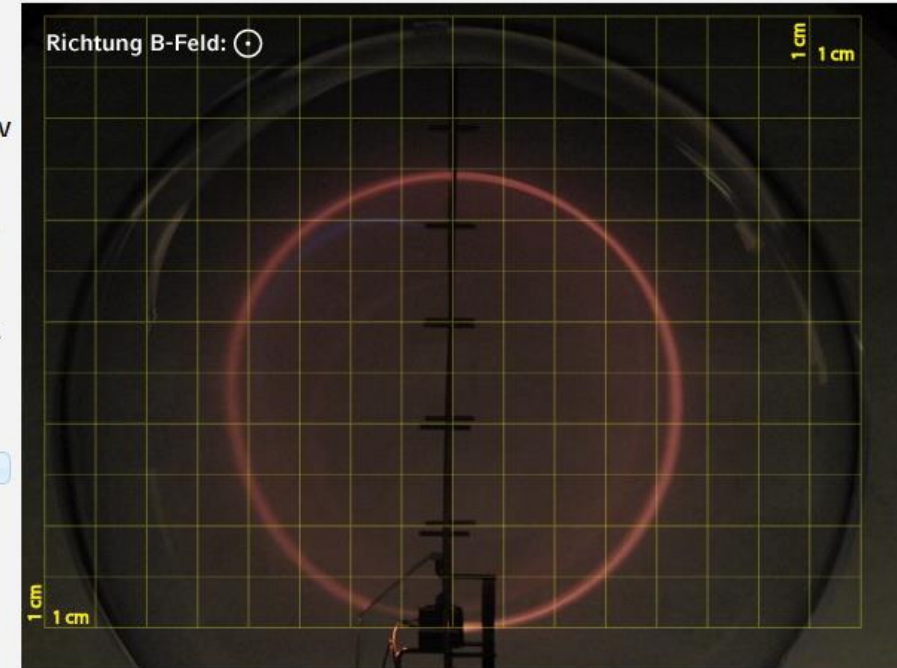
$$\Rightarrow v_0 = 8.895 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Der Spulenstrom I verursacht das
Magnetfeld B , das die Elektronen
zentripetal beschleunigt:

$I = 1.50 \text{ A}$

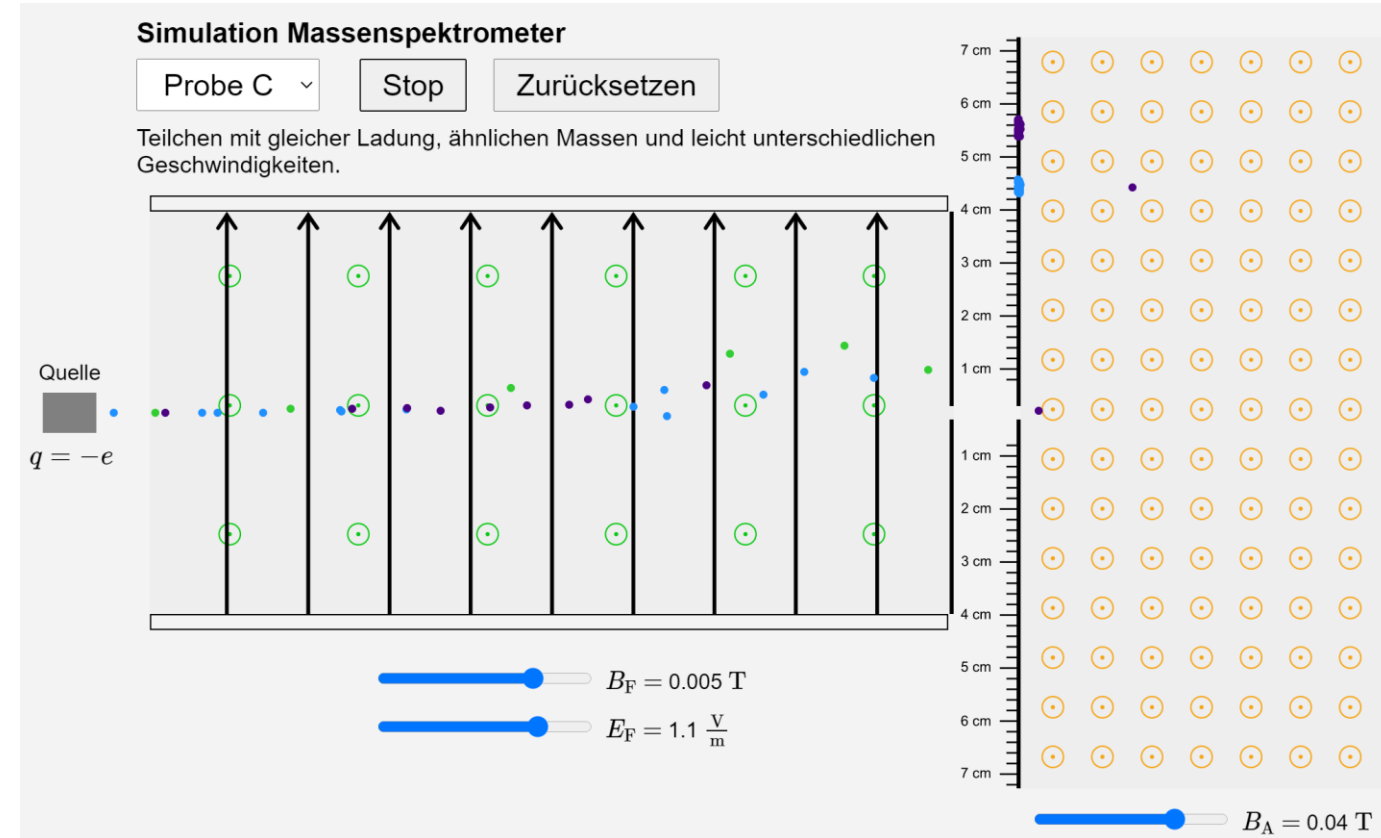
$$\Rightarrow B = 1.12 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

Messkreis ein/aus



Anwendung: Massenspektrometer

- Simulation
- Modellhafte Darstellung
- Kontext: Dopingprobe



Die Elektronenbeugungsröhre

- Bilder des typischen Schulversuchs
- De-Broglie Wellenlänge
- 2. Beugungsordnung?
- Digitale Messhilfe
- Computergestützte Rechnung

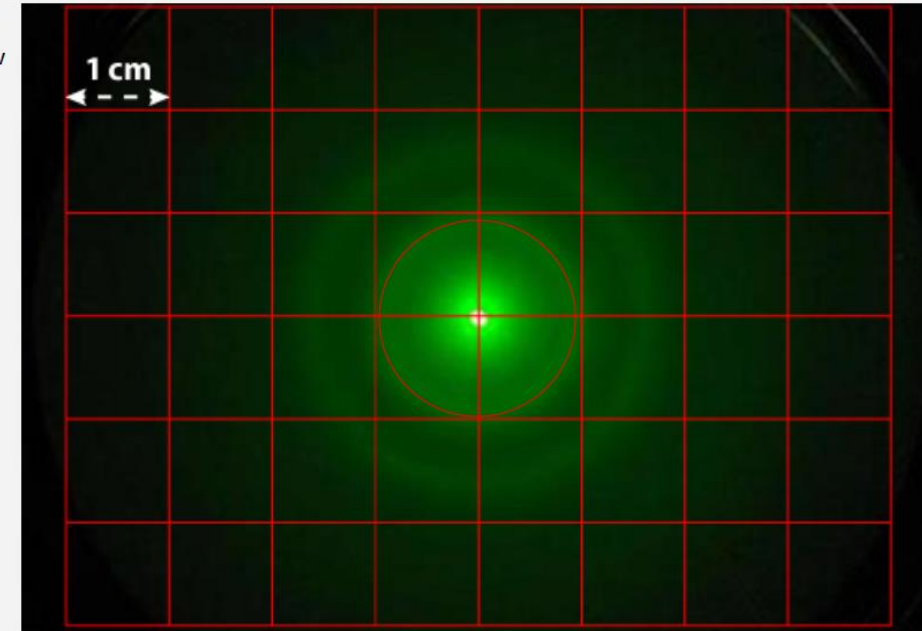
Aufgabe: Überprüfe die Hypothese von de Broglie.

Vergleiche dazu mit Hilfe der Messtabelle die von de Broglie erwartete Wellenlänge $\lambda_{\text{de Broglie}} = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m_e \cdot e \cdot U_b}}$ mit der Wellenlänge

$\lambda_{\text{Experiment}} = 2 \cdot d \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{r}{L - R + \sqrt{R^2 - r^2}}\right)\right)$, die der innere Interferenzring im Experiment liefert.

Größen: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$; $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; $d = 2,13 \cdot 10^{-10} \text{ m}$; $L = 12,7 \text{ cm}$; $R = 6,35 \text{ cm}$

Beschleunigungsspannung U_b
 6.0 kV
 Radius des Kreises r
 0.95 cm



Spannung U_b	$\lambda_{\text{de-Broglie}}$	Radius r_{innen}	$\lambda_{\text{Experiment}}$
6 kV	$1,58 \cdot 10^{-11} \text{ m}$	0,95 cm	$1,60 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
kV		cm	
kV		cm	

Alternative Experimentiergelegenheiten

Interaktive Bildschirmexperimente (FU Berlin):

- Elektronenablenkröhre: <https://tetfolio.fu-berlin.de/web/339958>
- Kathodenstrahlröhre: <https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1290591>
- Elektronenbeugung: <https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1127857>

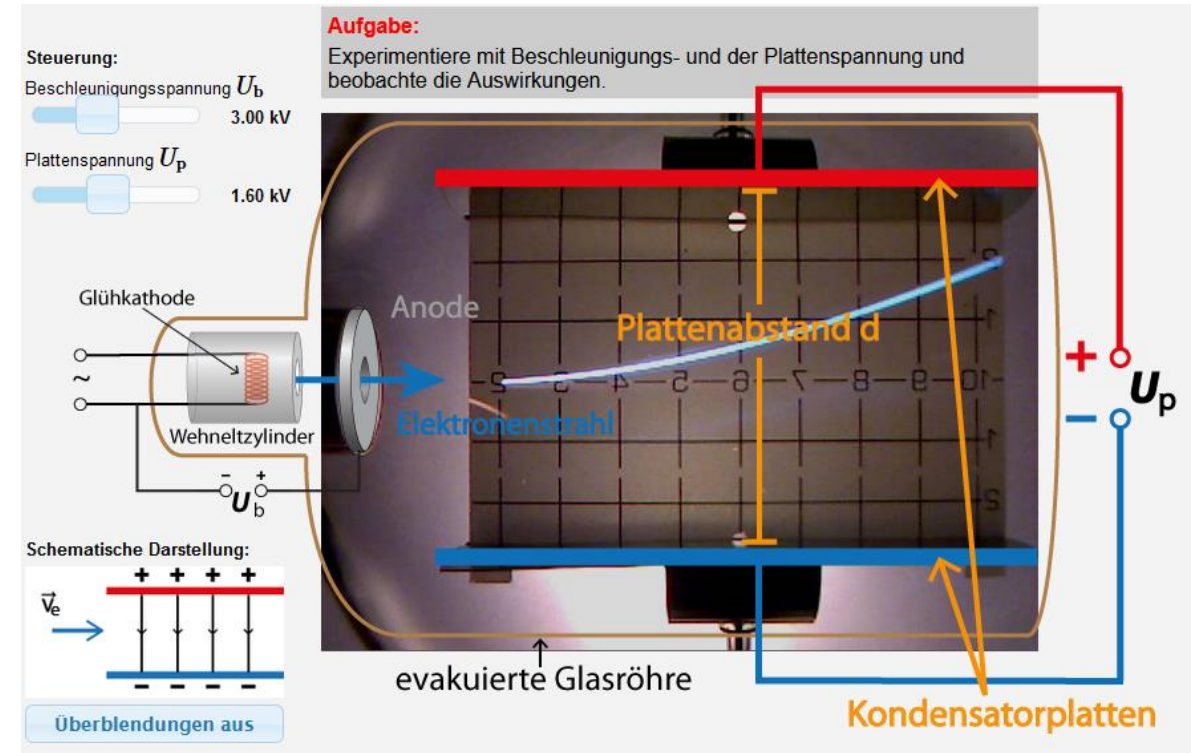
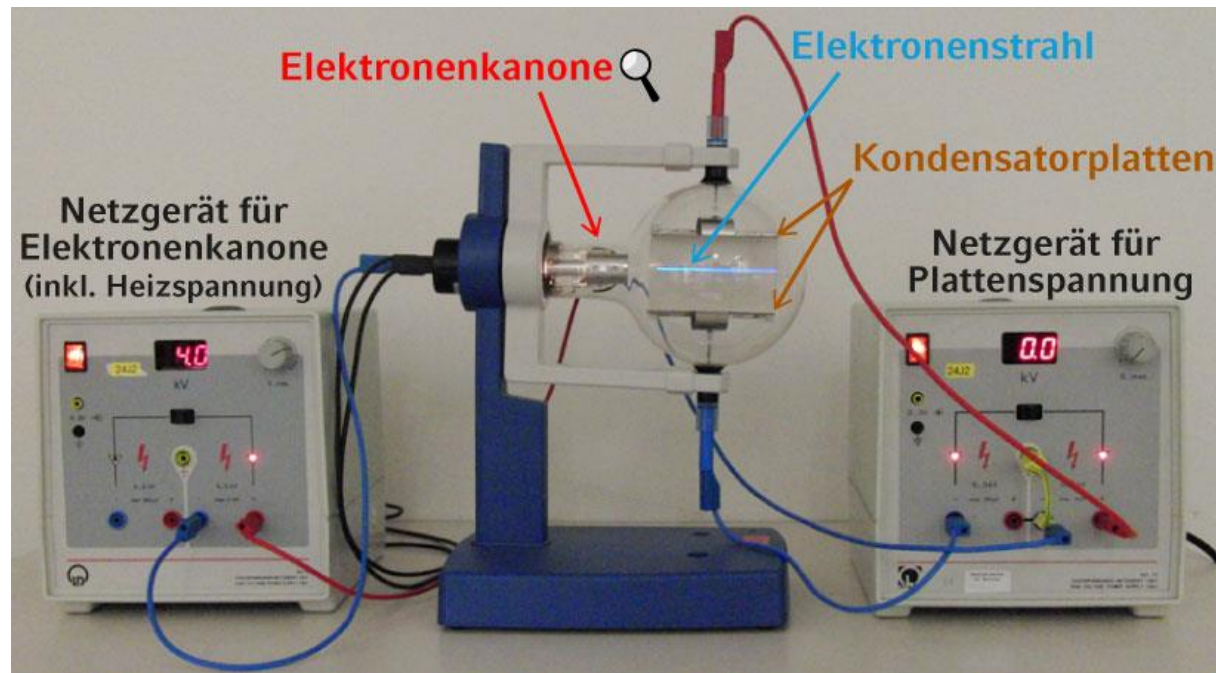
Simulationen

- LEIFIphysik (www.leifiphysik.de)
- Matthias Borchardt (<http://www.mabo-physik.de/>)

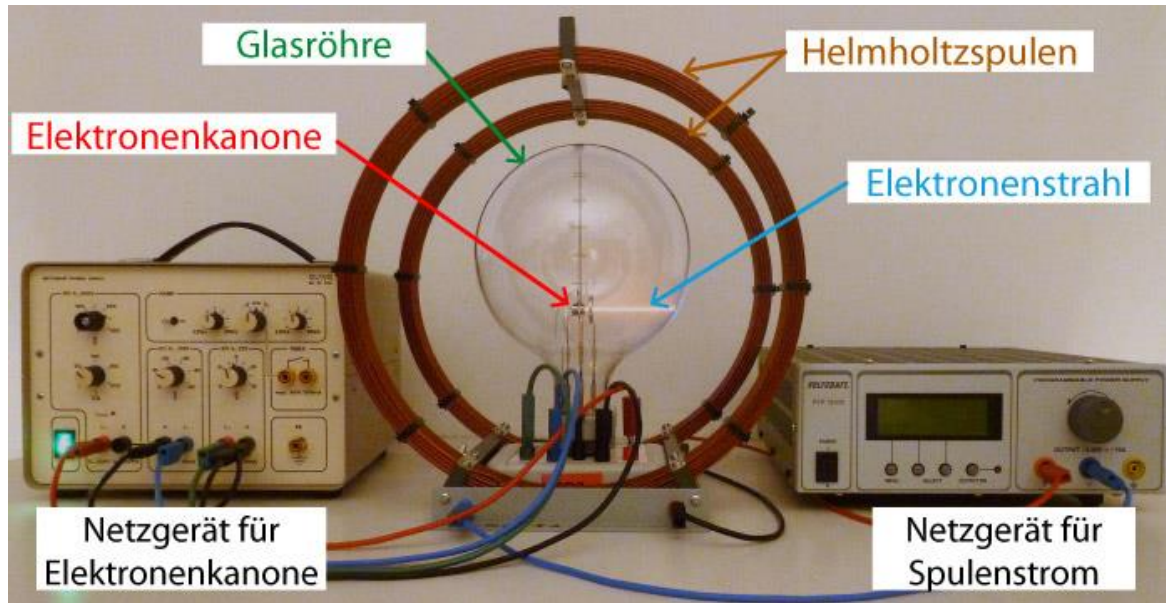
Kombination von real und digital

- Einfache Anschlussfähigkeit an Realexperimente
- Vereinfachung einer quantitativen Auswertung
- Individualisierung des Lernprozesses
- Verknüpfung von verschiedenen Anschauungsebenen
- Vergleich von Theorie und Realexperiment (kritisches Denken)

Anschlussfähigkeit an Realexperimente



Anschlussfähigkeit an Realexperimente

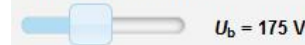


Aufgabe:

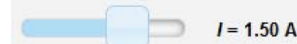
Experimentiere mit Beschleunigungsspannung und Spulenstrom und beobachte die Auswirkungen.

Steuerung:

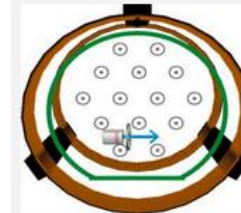
Beschleunigungsspannung U_b
in der Elektronenkanone:



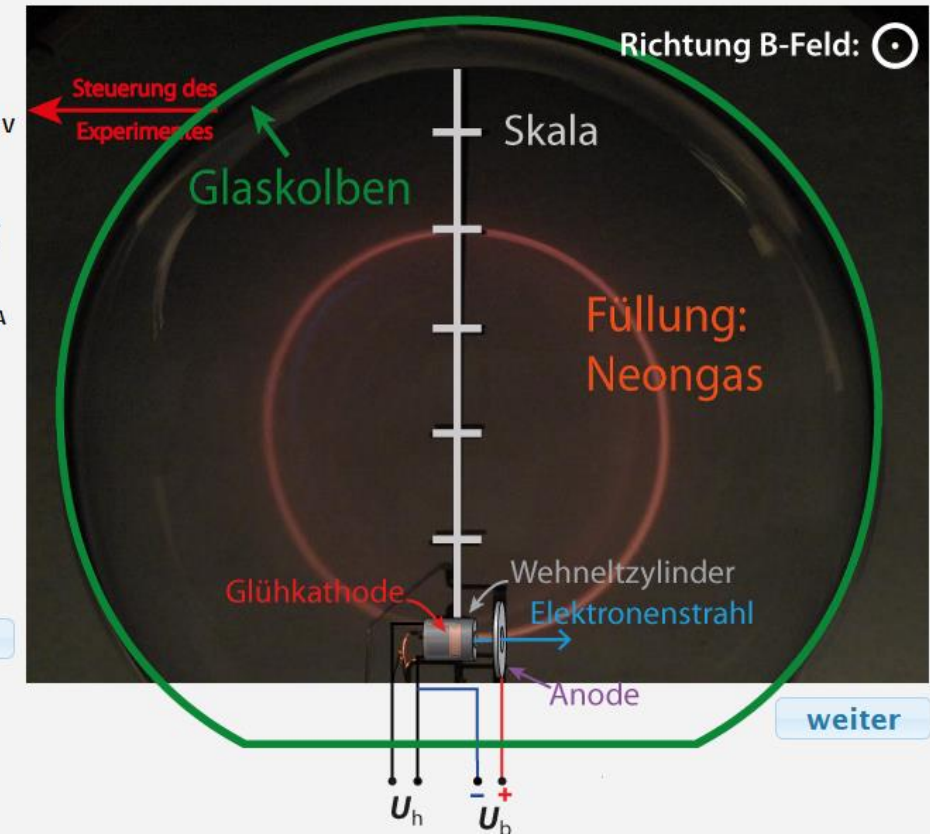
Der Spulenstrom I verursacht das
Magnetfeld B , das die Elektronen
zentripetal beschleunigt:



schematische Darstellung:



Überblendungen aus



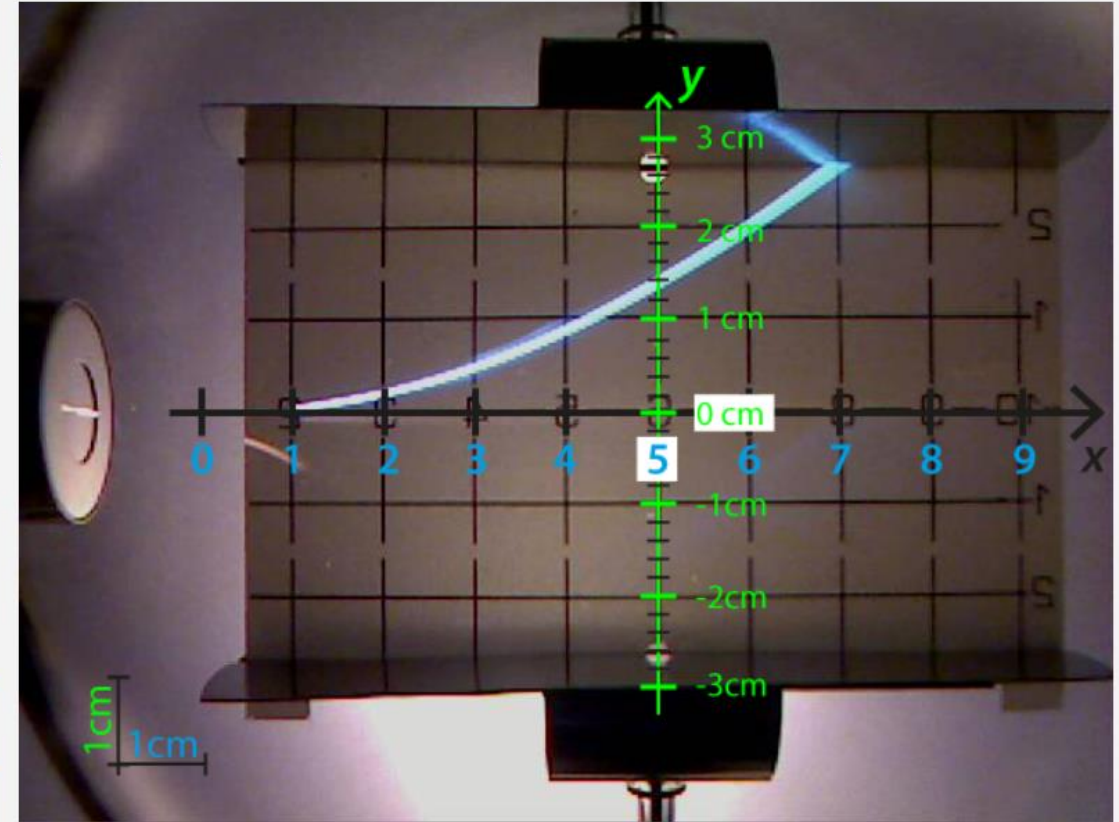
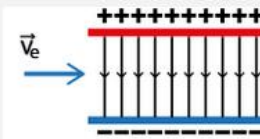
weiter

Vereinfachung quantitativer Auswertung

- Einfaches Aufnehmen realer Messdaten
- Berechnungen erfolgen automatisiert
- Ergebnisprüfung möglich

Steuerung:
Beschleunigungsspannung U_b
3.50 kV
Plattenspannung U_p

Schematische Darstellung:

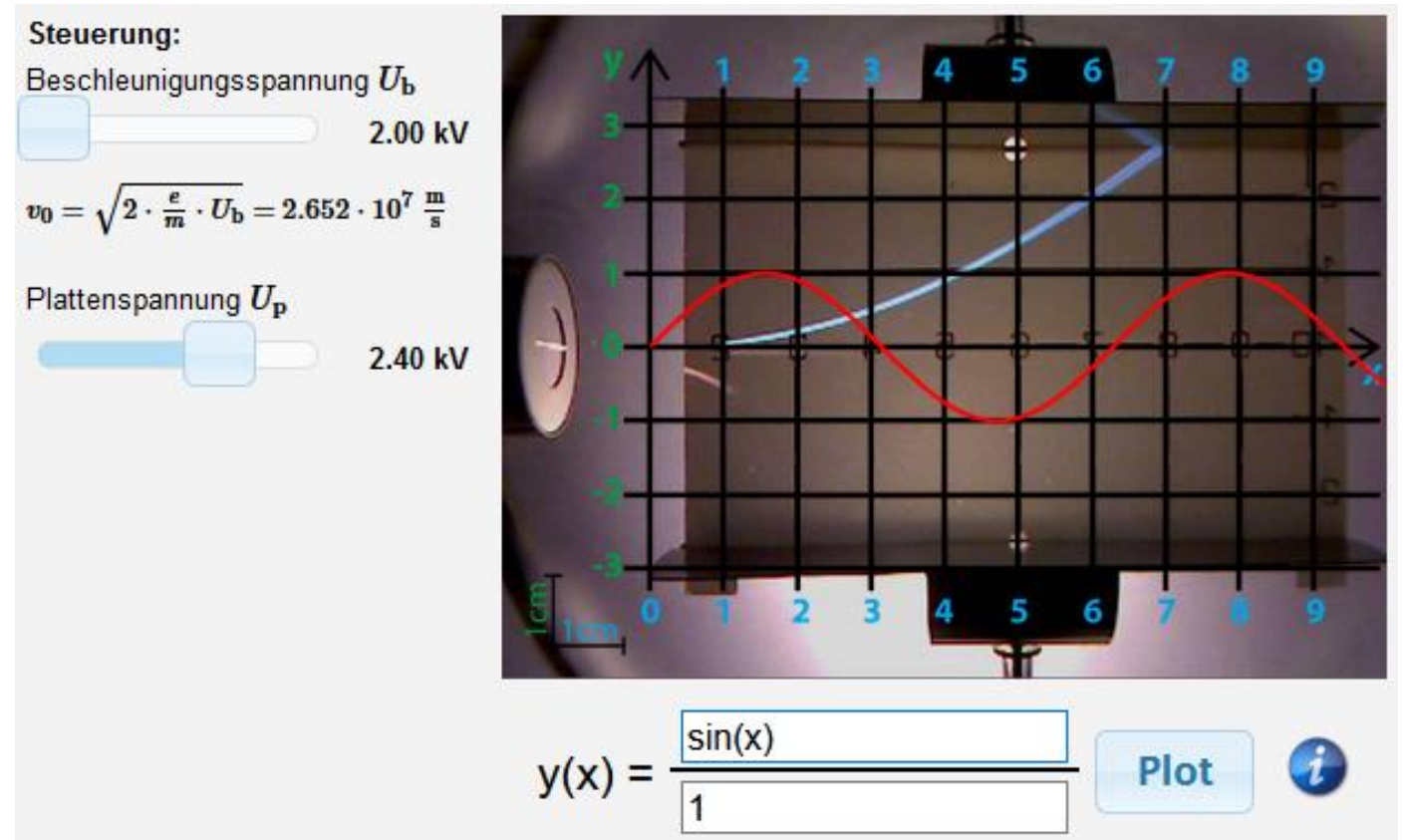


Plattenspannung	0,8 kV	1,6 kV	2,4 kV	3,2 kV	4,0 kV
Ablenkung bei $x = 5$ cm	0,25 cm	0,5 cm	0,8 cm	1,05 cm	1,4 cm
$\frac{\text{Ablenkung bei } x = 5 \text{ cm}}{\text{Plattenspannung } U_p} \text{ in } \frac{\text{cm}}{\text{kV}}$	0.313	0.313	0.333	0.328	0.350

[check](#)

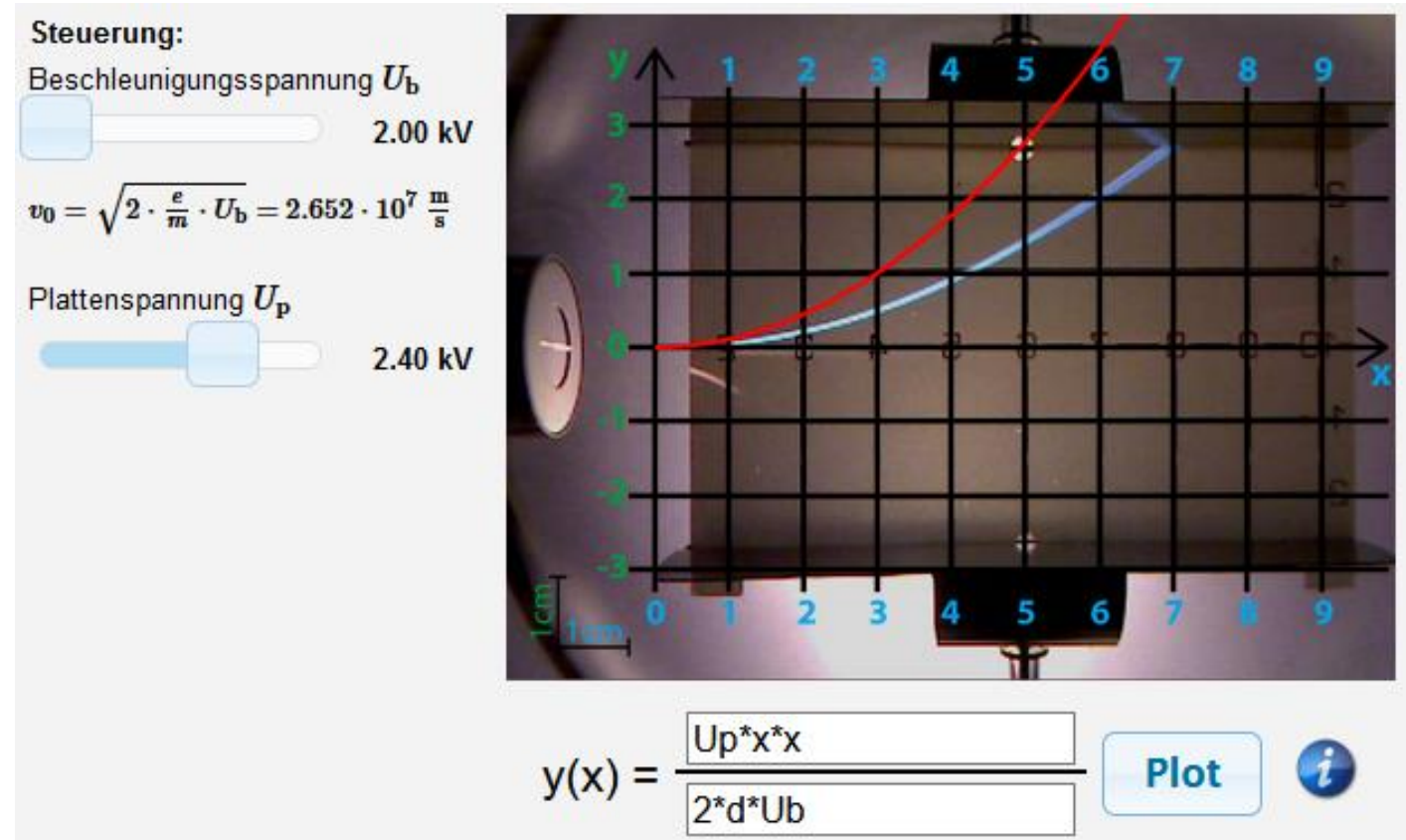
Vereinfachung quantitativer Auswertung

- Abgleich eigener Lösung mit dem Experiment



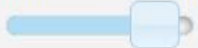
Vereinfachung quantitativer Auswertung

- Abgleich eigener Lösung mit dem Experiment



Vereinfachung quantitativer Auswertung

- Messkreis erleichtert genaues Ablesen
- Berechnungen erfolgen automatisiert
- Ergebnisprüfung möglich
- Vergleich Theorie und Praxis wird angeregt

Steuerung:
 Beschleunigungsspannung U_b in der Elektronenkanone:
 $U_b = 250 \text{ V}$
 $\Rightarrow v_0 = 9.376 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Der Spulenstrom I verursacht das Magnetfeld B , das die Elektronen zentripetal beschleunigt:
 $I = 1.50 \text{ A}$
 $\Rightarrow B = 1.12 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

Messkreis ein/aus

Radius des Messkreises
 3.6 cm

Richtung B-Feld: 

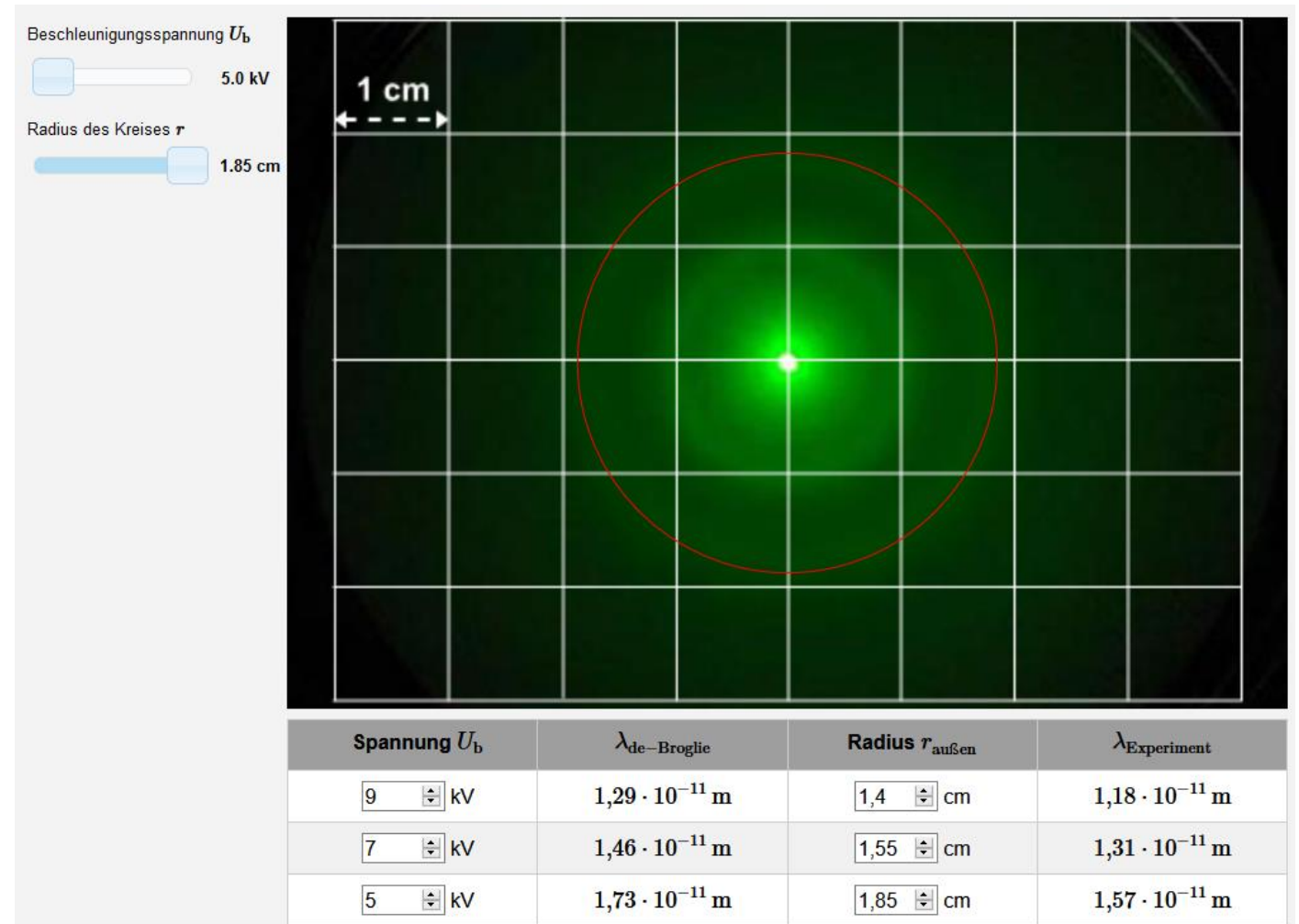


U_b in V	$\Rightarrow v_0$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Spulenstrom I in A	$\Rightarrow B$ in T	Radius r in cm	$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_b}{(B \cdot r)^2} \text{ in } \frac{\text{C}}{\text{kg}}$
175 	$7.845 \cdot 10^6$	1,5 	$1.12 \cdot 10^{-3}$	4 	$1.75 \cdot 10^{11}$
250 	$9.376 \cdot 10^6$	1,5 	$1.12 \cdot 10^{-3}$	4,7 	$1.78 \cdot 10^{11}$
250 	$9.376 \cdot 10^6$	2,5 	$1.87 \cdot 10^{-3}$	2,8 	$1.79 \cdot 10^{11}$
0 	0	0 	0	0 	—
0 	0	0 	0	0 	—

check

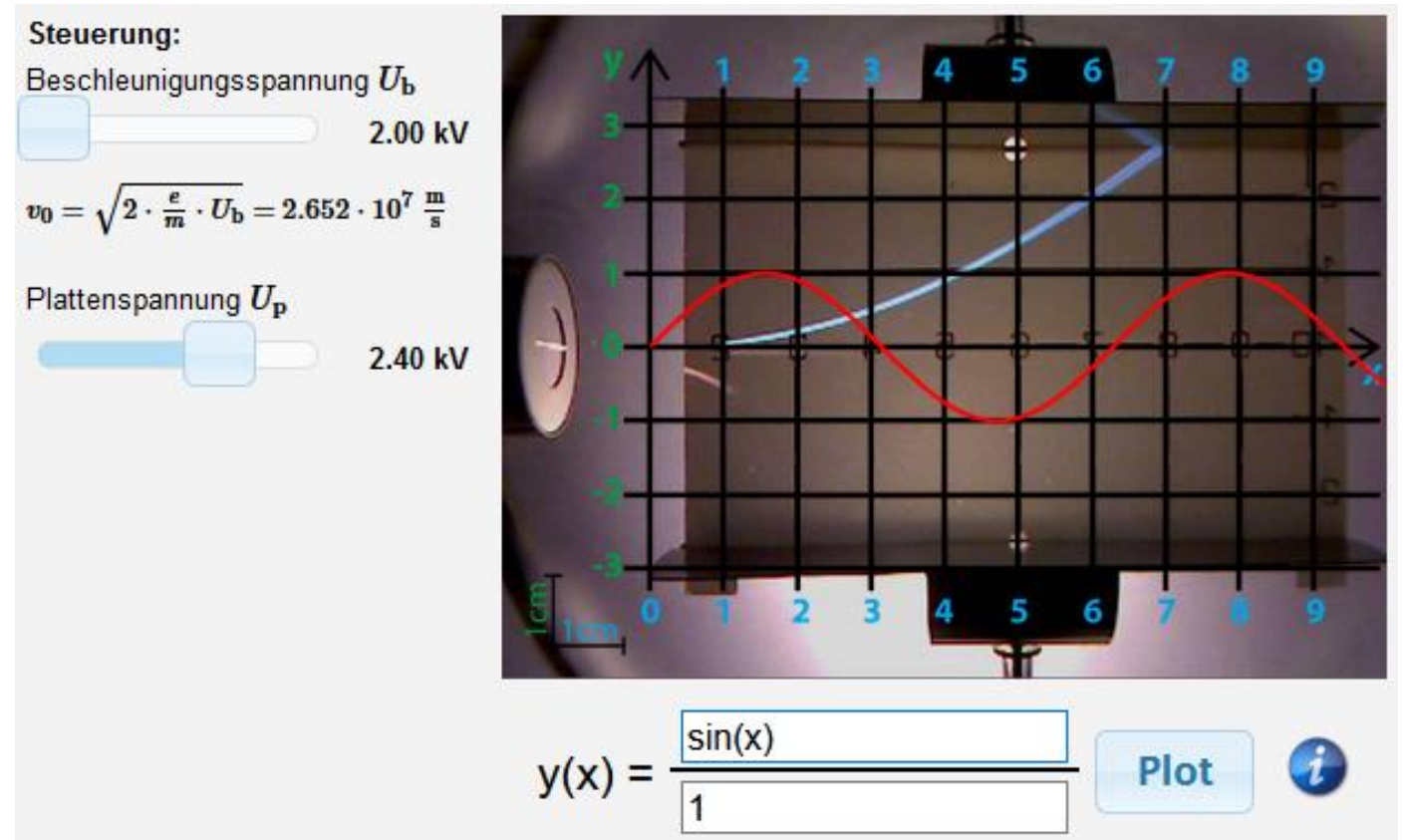
Vereinfachung quantitativer Auswertung

- Messkreis erleichtert genaues Ablesen
- Berechnungen erfolgen automatisiert
- Prüfen von nicht zutreffenden Hypothesen



Individualisierung des Lernprozesses

- Feedback bei jedem Aufgabenschritt



Individualisierung des Lernprozesses

- Feedback bei jedem Aufgabenschritt

Steuerung:
 Beschleunigungsspannung U_b
 in der Elektronenkanone:

$U_b = 250 \text{ V}$
 $\Rightarrow v_0 = 9.376 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Der Spulenstrom I verursacht das
 Magnetfeld B , das die Elektronen
 zentripetal beschleunigt:

$I = 1.75 \text{ A}$
 $\Rightarrow B = 1.31 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

Radius des Messkreises

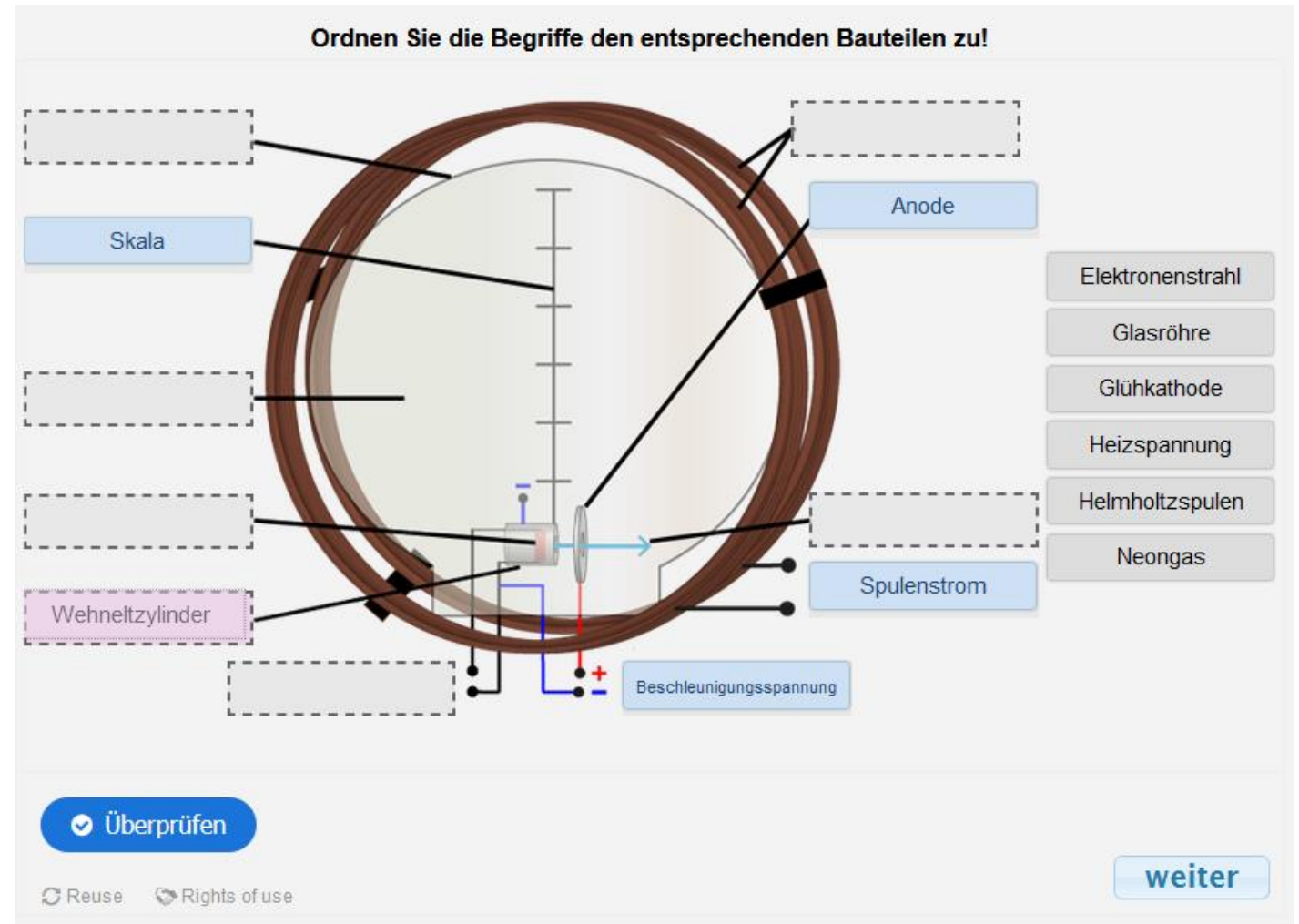
3.4 cm

Richtung B-Feld: $\odot$

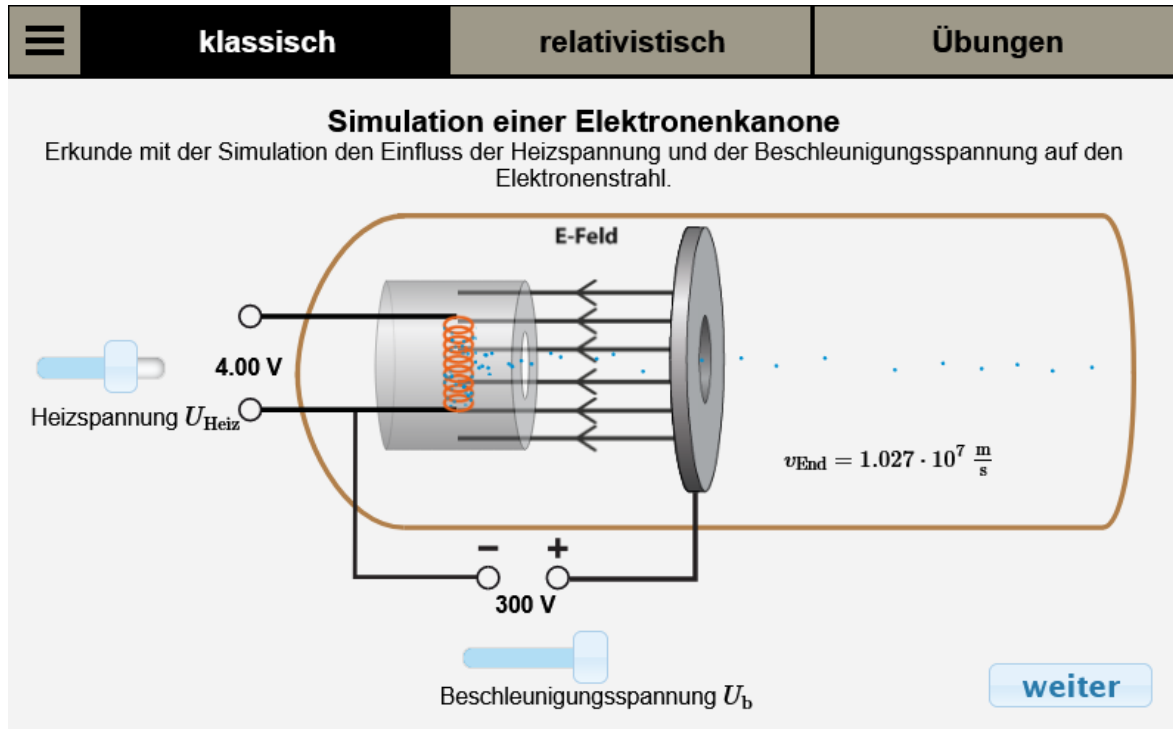
U_b in V	$\Rightarrow v_0$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Spulenstrom I in A	$\Rightarrow B$ in T	Radius r in cm	$\frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_b}{(B \cdot r)^2}$ in $\frac{\text{C}}{\text{kg}}$
175	$7.845 \cdot 10^6$	1,75	$1.31 \cdot 10^{-3}$	3,4	$1.76 \cdot 10^{11}$
250	$9.376 \cdot 10^6$	1,75	$1.31 \cdot 10^{-3}$	3,4	$2.11 \cdot 10^{11}$
0	0	0	0	0	—
0	0	0	0	0	—
0	0	0	0	0	—

Individualisierung des Lernprozesses

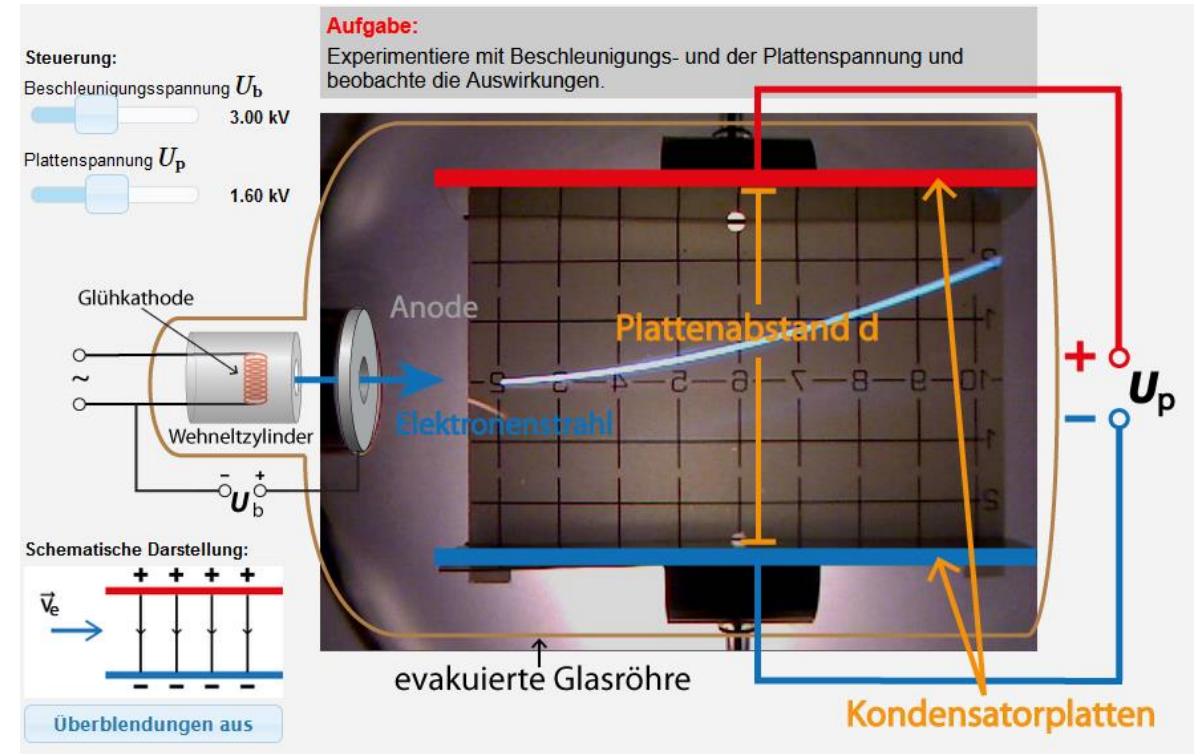
- Feedback bei jedem Aufgabenschritt
- H5P-Aufgaben können in Moodle kopiert werden



Verknüpfung von verschiedenen Anschauungsebenen



Modellhafte Teilchendarstellung



Reale Darstellung kombiniert mit digitalen Einblendungen

+ mathematische Anschauungsebene

Vergleich von Theorie und Praxis

- Besonders mit Blick auf den zunehmenden Einsatz von Simulationen nötig
- Schult kritisches Denken und Hinterfragen

Steuerung:

Beschleunigungsspannung U_b

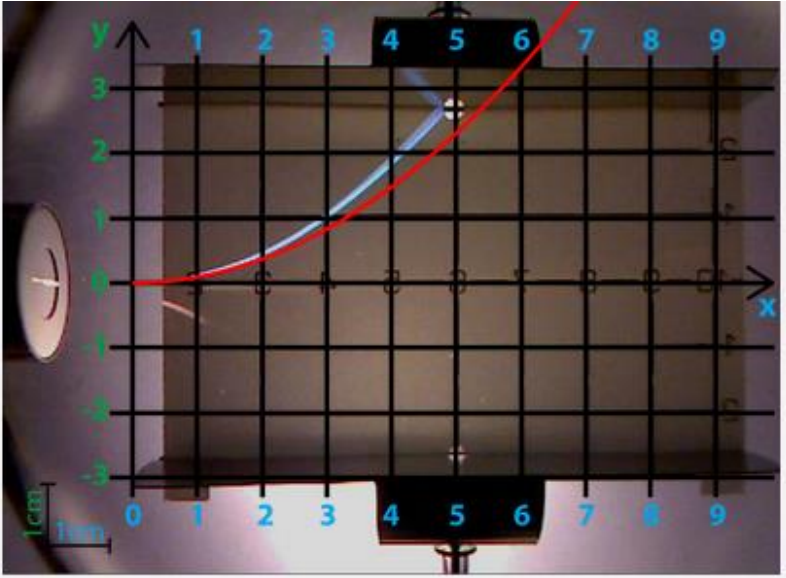
2.00 kV

$v_0 = \sqrt{2 \cdot \frac{e}{m} \cdot U_b} = 2.652 \cdot 10^7 \frac{m}{s}$

Plattenspannung U_p

4.00 kV

$E = \frac{U_p}{d} = 7.41 \cdot 10^4 \frac{V}{m}$



$$y(x) = \frac{1}{4 \cdot d} \cdot \frac{U_p}{U_b} \cdot x^2$$

Ursache für die Abweichung	Deine Meinung		Lösung
	ist Ursache	ist nicht Ursache	
nicht vollständig homogenes E-Feld	☒	☐	
Einfluss des Erdmagnetfeldes	☒	☐	
klassische anstatt relativistische Rechnung	☒	☐	
Einfluss der Gravitation	☒	☐	

Real und digital im Unterricht

- Keinesfalls Ersatz des Realexperimentes
- Erweiterung der Möglichkeiten
 - „Flipped Experiment“
 - Lernen durch Lehren
 - Erklärungen im Screencast
 - Entwicklung von eigenen Aufgaben
- Schritt weg vom reinen Rechenkalkül mit Formeln

„Flipped Experiment“

- Schüler*innen erarbeiten sich die zentralen Aspekte vorab zu Hause mit der Umgebung
- Im Unterricht wird geübt und vertieft (mit dem Realexperiment oder der Umgebung)

Vorteile:

- Reale, aber lösbare Problemstellungen (z.B. Aufbau)
- Schüler*innen bestimmen den Messprozess
- Fachlich vertieftes Unterrichtsgespräch

Lernen durch Lehren (Jean-Pol Martin)

- 1-2 Schüler*innen übernehmen nach Vorbereitung mit der Lernumgebung die Rolle der Lehrkraft
- „Lehrerwechsel“ bei verschiedenen Experimenten

Vorteile:

- Intensive Auseinandersetzung mit den Inhalten
- Reale Experimentiererfahrungen
- Selbstwirksamkeitserfahrung
- Schüler*innengerechte Erklärungen?

Erklärungen im Screencast

- Schüler*innen erstellen kommentierte Bildschirmaufnahme eines Experimentierabschnittes

Vorteile:

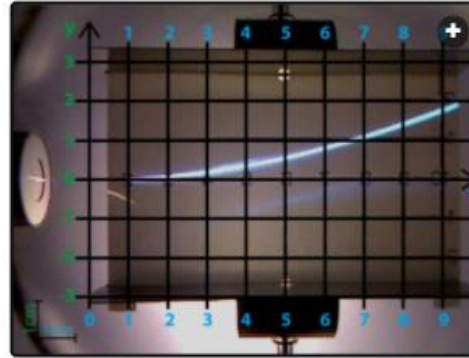
- Schüler*innen müssen ihr Handeln verbalisieren
- Verdeutlicht Verständnisprobleme

Tipps zur Umsetzung:

- XBOX Game Bar in Windows ( +G)
- In iOS systemseitig integriert

Erstellen von interaktiven Aufgaben mit H5P

- „Zwingt“ Schüler*innen zu einem neuen Blickwinkel
- Unterstützt Schüler*innen bei der Prüfungsvorbereitung
- Umgebung bietet viele nutzbare Bilder
- **Herausforderung:** Fachliche Tiefe + kreative Aufgaben



Wie groß muss die Beschleunigungsspannung U_b gewählt werden, damit sich bei einer Kondensatorspannung von $U_p = 2,0 \text{ kV}$ das gezeigte Bild einstellt?

☐ $U_b = 4,0 \text{ kV}$

☐ $U_b = 2,5 \text{ kV}$

☐ $U_b = 2,0 \text{ kV}$

☐ $U_b = 3,0 \text{ kV}$

✓ Überprüfen

Thematisierung von Fehlerrechnung

Einsatz der Kathodenstrahlröhre an der University of Notre Dame zum Vergleich unterschiedlicher Verfahren der Fehlerrechnung

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot r} \quad \text{bzw.} \quad \frac{e}{m} = \frac{2 \cdot U_b}{(B \cdot r)^2}$$

Seien Sie kritisch!

- Sieht etwas unschön aus?
- Fehlt inhaltlich etwas?
- Könnte man irgendwo anders vorgehen?
- Haben Sie noch eine passende Aufgabe, die dem Angebot noch fehlt?



Geben Sie Feedback!

Fragen? Fragen? Fragen?



@webphysik



<https://youtube.com/c/webphysik>