

II.F.13

Atom- und Kernphysik

Physik der flitzenden Teilchen – das Zyklotron und andere Beschleuniger in Forschung und Technik

Ein Beitrag von Dr. Teresa Feldmaier



© xenotari/Stock/Getty Images Plus

Große Teilchenbeschleuniger wie der LHC am CERN faszinieren durch ihre gigantischen Ausmaße und die verheißungsvolle Forschung, die an ihnen betrieben wird. Auf der Suche nach neuen Elementarteilchen, aber auch für Materialforschung und Medizin werden schnelle Teilchen benötigt. Neben dem Zyklotron behandelt dieser Beitrag das Synchrotron sowie die Anwendung in Forschung und Technik.

KOMPETENZPROFIL

Klassenstufe:	11/12
Dauer:	4 Unterrichtsstunden (Minimalplan 2)
Kompetenzen:	1. Modellieren und mathematisieren; 2. Chancen und Risiken diskutieren; 3. Erkenntnisse dokumentieren und präsentieren
Thematische Bereiche:	Bewegung geladener Teilchen in homogenen elektrischen und magnetischen Feldern, Anwendung von Teilchenbeschleunigern in Forschung und Technik, Relativistik
Medien:	Grafiken, Mediathek, Taschenrechner, Simulation, Film

Auf einen Blick

Ab = Arbeitsblatt, Tx = Infotext, LEK = Lernerfolgskontrolle

1. Stunde

Thema:	Das klassische Zyklotron
M 1 (Ab)	Das klassische Zyklotron
Benötigt:	<input type="checkbox"/> Taschenrechner <input type="checkbox"/> Zirkel <input type="checkbox"/> Computer <input type="checkbox"/> Internetzugang
M 1a (Ab)	Das Zyklotron zum Einzeichnen



2. Stunde

Thema:	Das Synchrotron
M 2 (Tx, Ab)	Das Synchrotron
Benötigt:	<input type="checkbox"/> Taschenrechner
M 2a (Ab)	Das Synchrotron – Skizze



3.–4. Stunde

Thema:	Teilchenbeschleuniger in Forschung und Technik
M 3 (Ab)	Teilchenbeschleuniger in Forschung und Technik
Benötigt:	<input type="checkbox"/> Computer <input type="checkbox"/> Internetzugang
M 4 (LEK)	Lernerfolgskontrolle

Minimalplan

Bei Zeitmangel lässt sich der Beitrag auf zwei Unterrichtsstunden kürzen, indem das Material **M 3** weggelassen wird. Alternativ ist auch die Kürzung auf drei Unterrichtsstunden denkbar, indem das Material **M 3** durch Kurzfilme (siehe Mediathek) ersetzt und anhand der Lösung **M 3** besprochen wird. Die Nutzung der Lernerfolgskontrolle **M 4** ist in beiden Fällen nur bedingt möglich.

M 1 Das klassische Zyklotron



Beschleunigung im elektrischen Feld

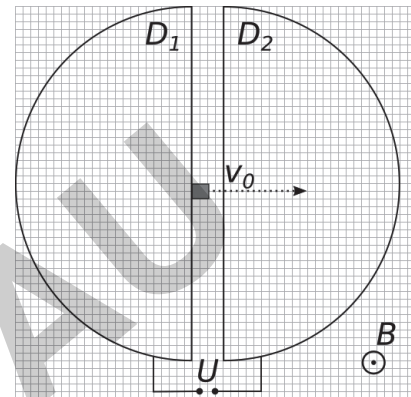
Gegeben seien zwei Metallplatten, die an eine Spannungsquelle angeschlossen sind. In der positiv geladenen Platte ist eine Protonenquelle angebracht, sodass die Protonen zur negativen Platte hin beschleunigt werden.

Aufgaben

1. **Berechnen** Sie, welche Spannung U angelegt werden muss, damit die Protonen die Geschwindigkeit $v = 0,1c$ erreichen. Dabei ist $c = 3 \cdot 10^8$ m/s die Lichtgeschwindigkeit.
2. **Bewerten** Sie die Realisierbarkeit dieser Spannung.

Das klassische Zyklotron

Das klassische Zyklotron besteht aus zwei hohlen halb-kreisförmigen Elektroden, genannt Duanten D_1 und D_2 , welche mit einem kleinen Abstand zueinander positioniert sind. Die Duanten sind an eine Wechselspannung U angeschlossen, welche mit fester Frequenz f ihre Polung ändert, sodass die Teilchen bei jeder Durchquerung des Spalts schneller werden. Zwischen den Duanten befindet sich die Teilchenquelle, aus der die Protonen mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_0 austreten. Die ganze Anordnung liegt in einem homogenen Magnetfeld der Stärke B , welches senkrecht auf der Bewegungsebene der Teilchen steht und diese auf eine Kreisbahn zwingt.



Skizze: Dr. Teresa Feldmaier

Aufgaben

3. Zunächst sei $U = 0$, das heißt, die Duanten sind ungeladen.
 - a) **Berechnen** Sie den Radius r_0 der Protonenbahn im homogenen Magnetfeld $B = 0,2$ T mit der Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 2,7 \cdot 10^5$ m/s.
 - b) **Zeichnen** Sie die Bahnkurve in die Skizze des Zyklotrons **ein**.
4. Nun liegt zwischen den Duanten die Spannung $U = 400$ V an.
 - a) **Leiten** Sie eine Beziehung zwischen dem Bahnradius r und der Zahl der Durchquerungen des Spalts N **her**, wenn die Anfangsgeschwindigkeit der Protonen $v_0 = 0$ ist.
 - b) **Berechnen** Sie die Bahnradien r für $N = 8$ Beschleunigungen und **zeichnen** Sie diese in die Skizze **ein**. **Nehmen** Sie dazu **an**, dass das Magnetfeld nur innerhalb der Duanten wirkt und die Teilchenbahn im Spalt nicht gekrümmt wird. Diese Annahme ist gerechtfertigt, da der Spalt im Vergleich zu den Duanten sehr klein ist.
5. **Überprüfen** Sie Ihre Bahnkurve anhand der Simulation und **verbessern** Sie gegebenenfalls Ihre Ergebnisse.

Zusatzaufgabe

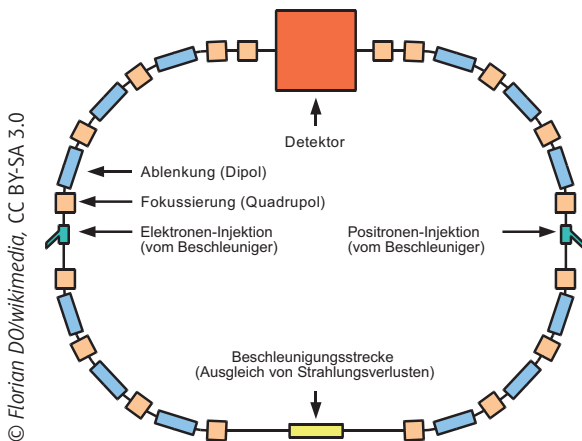
6. **Berechnen** Sie den Durchmesser des Zyklotrons, wenn die Protonen die Geschwindigkeit $v = 0,1 \cdot c$ erreichen sollen.

Das Synchrotron

Große Forschungseinrichtungen arbeiten mit Teilchenbeschleunigern, um die Eigenschaften der Materie zu erforschen. Auf dem Foto ist das Synchrotron des ESRF in Grenoble zu sehen. Dieser Ringbeschleuniger hat einen Umfang von 844 Metern. In solchen Anlagen erreichen die Teilchen nahezu Lichtgeschwindigkeit. Um dies zu erreichen durchlaufen die Teilchen mehrmals hintereinander die gleiche Bahn.



© gui00878/E+Getty Images



Der schematische Aufbau eines Synchrotrons ist in der Abbildung zu sehen. Es besteht aus geraden Beschleunigungsstrecken (gelb), mehreren Ablenk- (blau) und Fokussierungsmagneten (braun). Die vorbeschleunigten Teilchen werden über Injektoren (grün) in den Ring gebracht und am Detektor (orange) registriert. Beim Im-Kreis-Fliegen strahlen die Teilchen die sogenannte Synchrotronstrahlung ab, verlieren dabei an Energie und müssen zum Ausgleich wieder beschleunigt werden.

Bewegen sich Teilchen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit, so nimmt ihre Masse zu. Dieser relativistische Effekt muss beim Betrieb des Synchrotrons berücksichtigt werden.

Wiederholung: Das Zyklotron

1. **Berechnen** Sie die sogenannte Zyklotronfrequenz f , mit der die Wechselspannung U betrieben werden muss, damit die Teilchen immer beim Durchqueren des Spalts schneller werden.
2. **Erläutern** Sie, welche Folgen die relativistische Massenzunahme für das Zyklotron hat. Wie kann dieses Problem behoben werden? **Begründen** Sie Ihre Antwort.

Das Synchrotron

3. **Begründen** Sie, warum das Synchrotron im Gegensatz zum Zyklotron für hohe Teilchenenergien besser geeignet ist.
4. **Erläutern** Sie, was für die Magnetfelder und für die Wechselspannung im Synchrotron gelten muss, wenn die Teilchen bei zunehmender Geschwindigkeit die gleiche Bahn durchlaufen.

Diskussion

5. **Besprechen** Sie Ihre Ergebnisse zunächst im Zweier- und dann in Vierergruppen. **Ergänzen** und **korrigieren** Sie gegebenenfalls Ihre Ergebnisse.



Hinweise (M 2)

Einstieg

Der Einstieg in die zweite Stunde gelingt mit einer kurzen Wiederholung des Zyklotrons in Form einer der Simulationen oder einer Grafik. Da in **M 1** der Radius der Teilchenbahn berechnet wurde, können die Schülerinnen und Schüler schätzen, wie groß ihrer Meinung nach ein Zyklotron sein muss, um ausreichende Teilchengeschwindigkeiten (ungefähr $0,1 \cdot c$) zu erreichen. Anstatt einer Auflösung wird ein Bild eines Synchrotrons gezeigt, wie in **M 2** oder auf einer geeigneten Internetseite, um die Schülerinnen und Schüler mit den realen Dimensionen zu konfrontieren und Fragen nach dem Warum zu wecken.

Erarbeitungsphase

Ziel der zweiten Unterrichtsstunde ist die kritische Auseinandersetzung mit der Funktionsweise des Synchrotrons und den Unterschieden zum Zyklotron. Die Schülerinnen und Schüler sollen anhand von **M 2** zuerst selbstständig, dann in wachsender Gruppengröße die Fragen beantworten. Durch die wachsende Gruppe werden die Schülerinnen und Schüler mit den Ideen ihrer Lerngruppe konfrontiert und üben so den wissenschaftlichen Diskurs.

Lösungen (M 2)

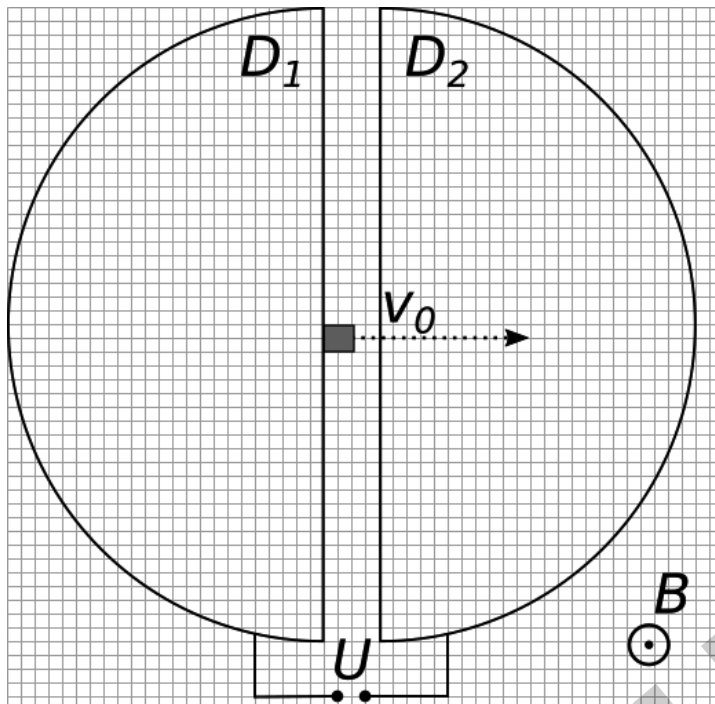
1. Die Zeit, die das Teilchen zum Durchlaufen eines Duanten benötigt, ergibt sich aus $t = r \cdot \pi / v$, da das Teilchen sich innerhalb des Duanten mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Nach Einsetzen des Radius $r = m \cdot v / (e \cdot B)$ ergibt sich $t = m \cdot \pi / (e \cdot B)$ und man erkennt, dass die Verweildauer im Duanten unabhängig von der Spannung und dem Radius der Teilchenbahn ist. Die Zeit t entspricht gerade der halben Periodendauer der Wechselspannung, somit gilt für die Zyklotronfrequenz

$$f = \frac{1}{2 \cdot t} = \frac{e \cdot B}{2 \cdot m \cdot \pi} = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 0,2 \text{ T}}{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \pi} = 3,1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{s}}$$

2. Nimmt die Masse der Teilchen zu, so nimmt auch die Zyklotronfrequenz zu. Letztere stimmt dann nicht mehr mit der Frequenz der Wechselspannung überein und die Polung der Duanten passt nicht mehr zur Teilchenbahn. Beim Durchqueren des Spalts werden die Teilchen teils gebremst anstatt beschleunigt. Im sogenannten Synchro-Zyklotron wird die Umpolungsfrequenz an die Geschwindigkeit und damit an die Masse der Teilchen angepasst. Dies ermöglicht weiterhin eine optimale Beschleunigung.
3. Trotz Einsatz eines Synchro-Zyklotrons erreichen die Teilchen nicht die Geschwindigkeiten, die in Synchrotrons erreicht werden können. Grund dafür sind die Magnete des Zyklotrons, welche für hohe Geschwindigkeiten Durchmesser von mehreren Metern besitzen und trotzdem ein homogenes Feld erzeugen müssen. Dies ist technisch sehr anspruchsvoll und zudem extrem teuer. Im Synchrotron werden mehr, aber kleinere Magnete benötigt.
4. Die Stärke des Magnetfelds muss an die Geschwindigkeit der Teilchen angepasst werden, da Radius, Magnetfeld und Geschwindigkeit zusammenhängen: $r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B}$ (siehe **M 1**). Die Wechselspannung zur Beschleunigung muss aufgrund der relativistischen Massenzunahme ebenfalls an die Geschwindigkeit angepasst werden, damit die Teilchen beim Durchfliegen der Beschleunigungsstrecke schneller werden.

Das Zyklotron zum Einzeichnen

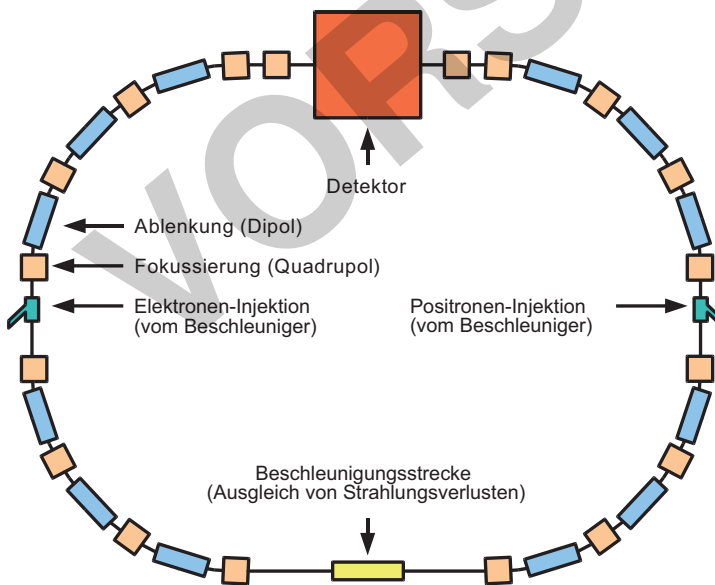
M 1a



Skizze: Dr. Teresa Feldmaier

Das Synchrotron – Skizze

M 2a



© Florian DO/wikimedia, CC BY-SA 3.0

© RAABE 2021

M 3

Teilchenbeschleuniger in Forschung und Technik



Aufgabe 1

Recherchieren Sie im Internet zu einem der folgenden Themen und **bearbeiten** Sie dabei die zugehörigen Aufgaben.

CERN und DESY – die großen Forschungseinrichtungen

- **Beschreiben** Sie kurz die beiden Einrichtungen. **Nennen** Sie die dort aufgebauten Teilchenbeschleuniger und die Ziele, die mit ihnen verfolgt werden.
- Die großen Beschleunigeranlagen bestehen in Realität nicht nur aus Magneten und elektrischen Feldern. **Erläutern** Sie, welche Bauteile zur Forschung noch benötigt werden.
- Das nächste große Zukunftsprojekt der Teilchenphysik ist der internationale Linearcollider ILC. **Erklären** Sie, warum dieser eine Ergänzung zu den aktuellen Beschleunigern darstellt und welche Ziele er verfolgen soll.

Teilchenphysik

- Das grundlegende Modell der Teilchenphysik ist das Standardmodell der Elementarteilchen. **Erläutern** Sie kurz, was das Standardmodell beschreibt und wozu für die Forschung Teilchenbeschleuniger benötigt werden. **Erklären** Sie, was die Forscher herausfinden wollen.
- **Nennen** Sie Forschungseinrichtungen, an denen Kollisionsexperimente durchgeführt werden.
- **Erklären** Sie, was der Physiknobelpreis von 2013 mit Teilchenbeschleunigern zu tun hat.

Synchrotronstrahlung

- **Erläutern** Sie, was Synchrotronstrahlung ist und wie sie entsteht.
- Im Zusammenhang mit Synchrotronstrahlung spricht man oft von Speicherringen. **Erklären** Sie den Begriff des Speicherrings. **Stellen** Sie dar, welche Magnete genutzt werden, und **beschreiben** Sie deren Wirkungsweise.
- **Nennen** Sie Anwendungen und Ziele der Forschung mit Synchrotronstrahlung.

Aufgabe 2

Präsentieren Sie Ihre Ergebnisse im Plenum.

Lernerfolgskontrolle

M 4

Kreuzen Sie die richtigen Antworten **an**. Mindestens eine der drei Antworten ist richtig.

- Im klassischen Zyklotron
 - ist die Zyklotronfrequenz konstant.
 - hängt der Bahnradius nicht von der Stärke des Magnetfeldes ab.
 - gilt der Energieerhaltungssatz nicht.
- Der Abstand der Bahnradien im klassischen Zyklotron
 - ist für alle Geschwindigkeiten konstant.
 - nimmt für steigende Geschwindigkeiten zu.
 - nimmt für steigende Geschwindigkeiten ab.
- Wird das Zyklotron (Magnetfeld zeigt aus der Zeichenebene heraus, Anfangsgeschwindigkeit nach rechts) mit negativen Teilchen betrieben, die schwerer als Protonen sind, so
 - läuft die Spiralbahn gegen den Uhrzeigersinn.
 - sind die Bahnradien größer.
 - verringert sich die Zyklotronfrequenz.
- Ein Synchrotron kann betrieben werden mit
 - beliebigen Teilchen.
 - Elektronen und Protonen.
 - Atomkernen.
- Bei relativistischen Geschwindigkeiten
 - nimmt die Masse der Teilchen zu.
 - stimmt die Zyklotronfrequenz nicht mehr mit der Wechselspannungsfrequenz des Zyklotrons überein.
 - können die Teilchen nur mit Synchrotronstrahlung weiter beschleunigt werden.
- Das CERN ist ein großes Forschungsinstitut für Teilchenforschung.
 - Um Synchrotronstrahlung zu erhalten, müssen Teilchen hoher Geschwindigkeit kollidieren.
 - Der Higgs-Mechanismus und das damit verbundene Higgs-Teilchen sind verantwortlich für die Masse der Materie.
 - Der LHC hat einen Durchmesser von mehreren Kilometern.
- Ein Speicherring
 - ist ein Vorbeschleuniger für Synchrotrone.
 - arbeitet ohne Wechselspannung.
 - hat zum Ziel, Synchrotronstrahlung zu produzieren.
- Synchrotronstrahlung
 - besteht aus sehr schnellen Elektronen.
 - ist nützlich, um Proteine zu untersuchen.
 - liegt im Röntgenbereich.