

An welche Stichwörter von der letzten Vorlesung können Sie sich noch erinnern?

Ideale und reale Spannungsquellen

Kirchhoffsche Regeln

Parallelschaltung und Reihenschaltungen von Widerständen

Amperemeter und Voltmeter

RC-Kreise $\tau = RC$

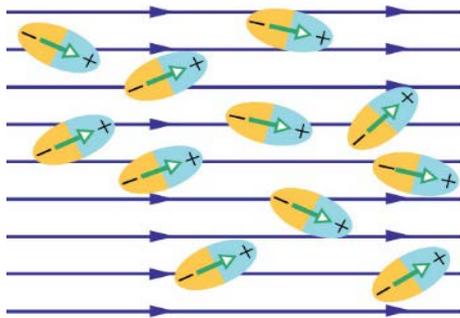
25. Magnetfelder

25.1 Das Magnetfeld

Ein elektrisch geladener Gegenstand erzeugt ein Vektorfeld, das elektrische Feld \mathbf{E} , in allen Punkten des Raums.

Ganz entsprechend erzeugt ein Magnet in allen Punkten des ihn umgebenden Raums ein Vektorfeld, das Magnetfeld \mathbf{B} .

Elektromagnete bestehen aus stromdurchflossenen Drahtspulen. Die Stärke des erzeugten Magnetfelds wird in diesem Fall von der Stärke des durch die Spule fließenden Stroms bestimmt



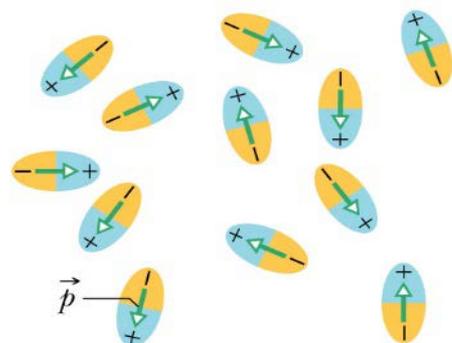
Permanentmagnete benötigen keinen *makroskopischen* elektrischen Strom, um ein Magnetfeld zu erzeugen

Mikroskopische Ströme werden von Elementarteilchen, beispielsweise die Elektronen, erzeugt.

In Permanentmagneten können die Magnetfelder der Elektronen zusammenwirken und ein makroskopisches Magnetfeld erzeugen.

In anderen Materialien löschen sich die Magnetfelder der Elektronen gegenseitig aus, sodass im Raum um ein Stück des Materials kein Magnetfeld besteht.

Bewegt sich ein geladenes Teilchen in einem Magnetfeld, so wirkt eine Kraft auf das Teilchen.

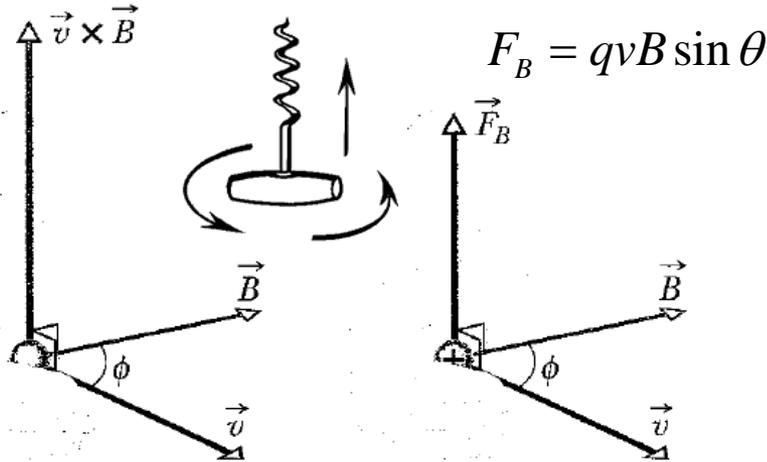


25.2 Definition von B

Man definiert das Magnetfeld B über die Kraft F_B , die auf ein geladenes Probesteilchen wirkt, wenn es sich in einem Magnetfeld bewegt.

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

die Lorentz-Kraft



Diese magnetische Kraft ist null, wenn entweder die Ladung des Teilchens null ist, oder das Teilchen sich in Ruhe befindet, oder wenn die Vektoren v und B entweder parallel ($\theta = 0^\circ$) oder antiparallel ($\theta = 180^\circ$) zueinander orientiert sind.

Die Kraft wird dagegen maximal, wenn die beiden Vektoren senkrecht zueinander sind.

Die SI-Einheit des Magnetfelds B ist Newton pro Coulomb und Meter pro Sekunde und heißt Tesla (T):

$$1T = \frac{1N}{1C \cdot 1m/s}$$

Typische Größenordnungen einiger Magnetfelder

An der Oberfläche eines Neutronensterns	10^8 T
In der Nähe eines großen Elektromagneten	1,5 T
In der Nähe eines kleinen Stabmagneten	10^{-2} T
An der Erdoberfläche	10^{-4} T
Im interstellaren Raum	10^{-10} T
Kleinster Wert in einem magnetisch abgeschirmten Raum	10^{-14} T

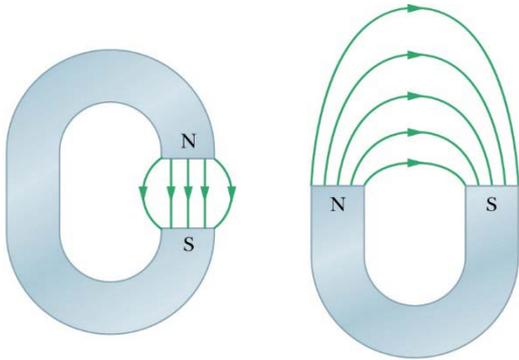
Eine frühere Einheit für B (keine SI-Einheit) ist das noch immer häufig verwendete Gauß (G):

$$1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauß}$$

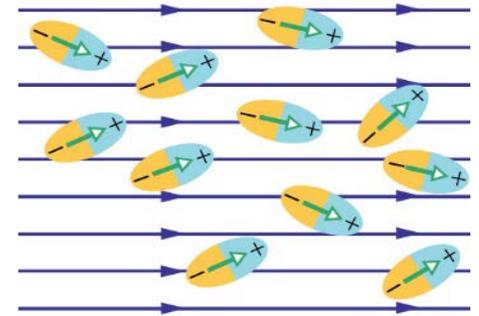
Magnetische Feldlinien

Der Verlauf von Magnetfeldern wird durch Feldlinien anschaulich dargestellt:

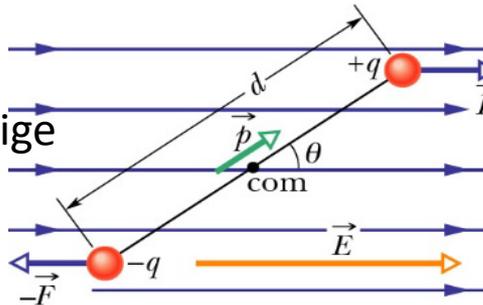
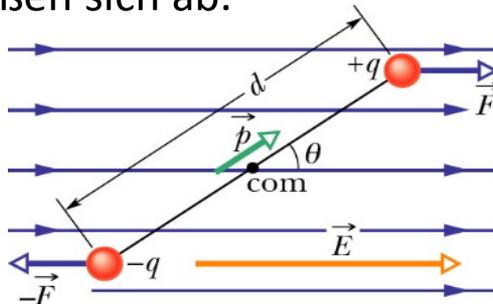
- (1) Die Richtung des Felds B ist in jedem Raumpunkt gegeben durch die Richtung der Tangente an die Feldlinie, die durch diesen Punkt verläuft.
- (2) Der lokale Abstand der Feldlinien ist proportional zum Betrag des Felds B in diesem Raumbereich: Das Feld ist um so stärker, je dichter die Feldlinien liegen.



Was bedeutet N oder S?



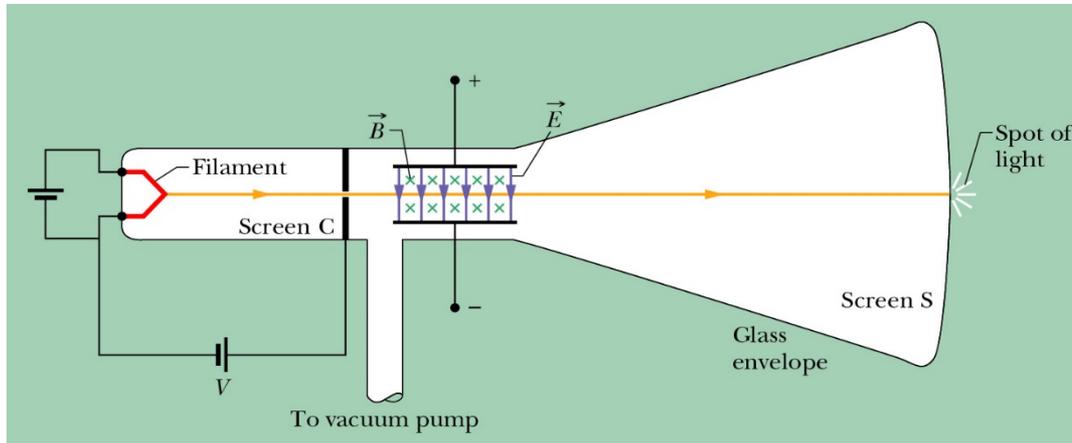
Ungleichnamige Magnetpole ziehen einander an, gleichnamige stoßen sich ab.



Die Erde hat ein Magnetfeld, das im Kern des Planeten erzeugt wird.

Auf der Oberfläche der Erde kann man dieses Feld leicht durch einen *Kompass* nachweisen.

25.3 Gekreuzte Felder: Die Entdeckung des Elektrons



Sowohl ein elektrisches Feld E als auch ein Magnetfeld B können eine Kraft auf ein geladenes Teilchen ausüben. Überlagert man beide Feldarten senkrecht zueinander, so spricht man von gekreuzten Feldern.

Kathodenstrahlröhre - die experimentelle Anordnung, mit der J. J. Thomson im Jahr 1897 (Cambridge University) das Elektron entdeckte.

Der Elektronenstrahl durchquert einen Raumbereich mit gekreuzten Feldern E und B und trifft auf den Leuchtschirm S , wo er einen kleinen Lichtfleck erzeugt.

Bei konstantem Wert von E regelte man die Stärke des Magnetfelds B so ein, dass der Lichtfleck sich nicht bewegt (der Elektronenstrahl breitet sich geradeaus)

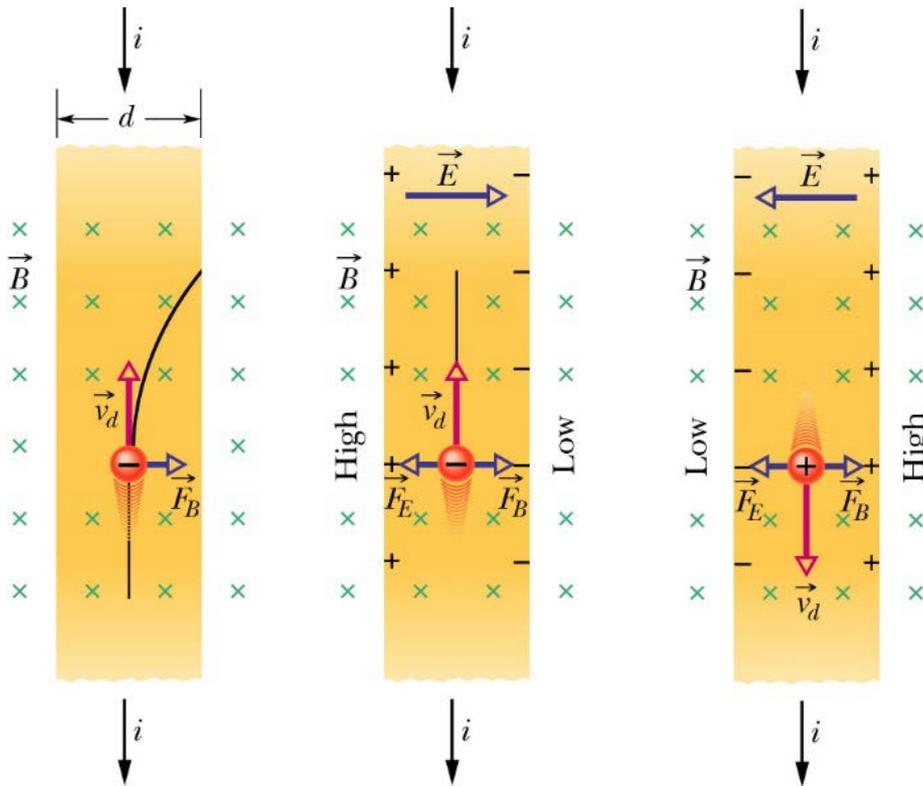
$$F_B = F_E \Rightarrow qvB = qE \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

$$ma = qE \quad a = \frac{q}{m} E$$

Wenn man dann nur die elektrische Feld schaltet und die Trajektorie verfolgt, kann man die Beschleunigung bestimmen (freier Wurf $R \propto v^2/g$)

Die Anordnung der gekreuzten Felder gestattet die *Messung des Verhältnisses q/m* für Teilchen, die sich durch diese Feldanordnung bewegen.

25.4 Gekreuzte Felder: Der Hall-Effekt



$$v_D = \frac{J}{nq} \Rightarrow V_H = \frac{J}{nq} Bd = \frac{i}{td} \frac{Bd}{nq} = \frac{iB}{nqt}$$

t ist die Dicke des Leiters

Die Leitungselektronen, die in einem Leiter driften, werden auch durch ein Magnetfeld abgelenkt - der Hall-Effekt (E.H. Hall, 1879).

Dieses Phänomen gestattet es zu entscheiden, ob die Ladungsträger in einem Leiter positiv oder negativ geladen sind und die Ladungsträgerkonzentration in einem Leiter zu messen.

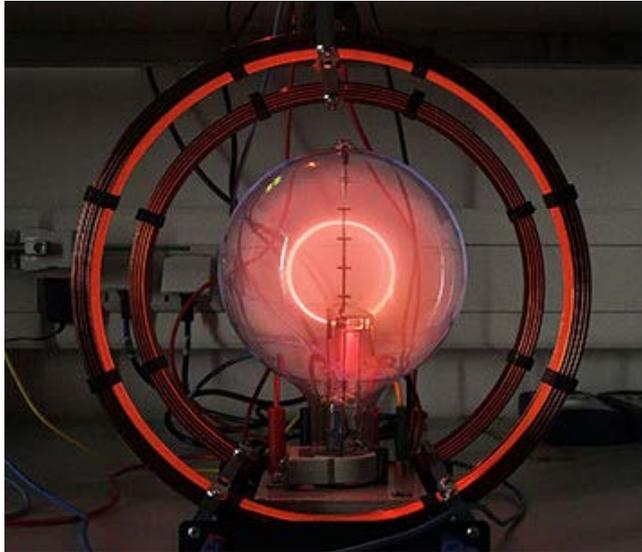
$$F_B = F_E \Rightarrow v_D B = E$$

Die Hall-Spannung $V_H = Ed = v_D Bd$

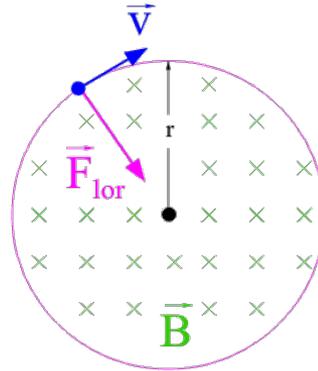
$$\Rightarrow R_H = \frac{V_H}{i} = \frac{B}{nqt} \quad R_{Ohm} = \frac{m}{nq^2 \tau} \frac{ld}{t}$$

R_H ist der Hall-Widerstand

25.5 Geladene Teilchen auf einer Kreisbahn



Wir wollen die Parameter der kreisförmigen Bewegung der Elektronen im Magnetfeld bestimmen - oder allgemeiner der Bahnkurve eines beliebigen Teilchens mit der Ladung q und der Masse m , das sich mit einer Geschwindigkeit v senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld B bewegt.



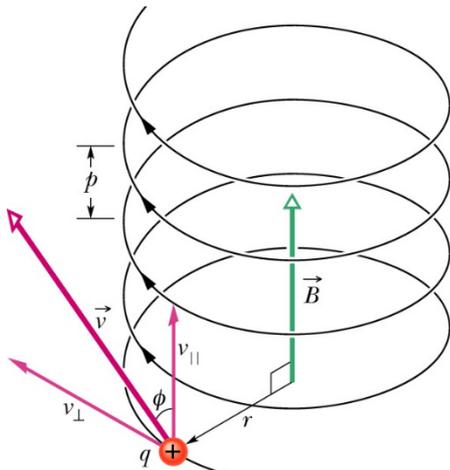
$$F = F_B = qvB = ma = m \frac{v^2}{r}$$

Der Radius:

$$r = \frac{mv}{qB}$$

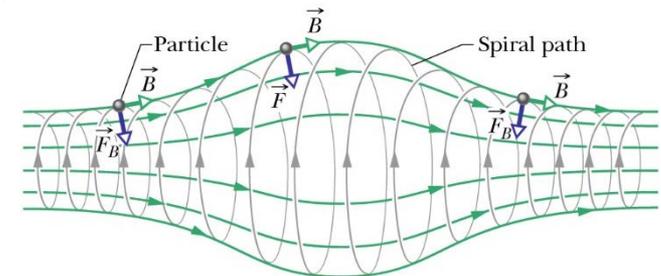
Die Frequenz: $f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{qB}{2\pi m}$

Schraubenbahnen

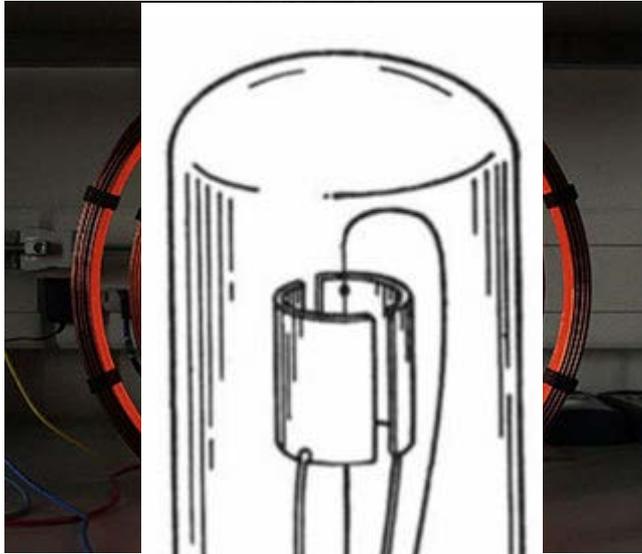


Hat die Geschwindigkeit des Teilchens eine Komponente parallel zu dem als homogen angenommenen Magnetfeld, so bewegt es sich auf einer Schraubenbahn (Helix) um die Richtung des Feldvektors.

$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

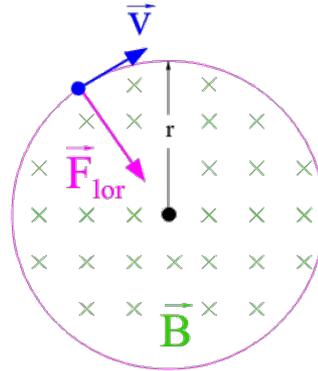


25.5 Geladene Teilchen auf einer Kreisbahn



Schr

Wir wollen die Parameter der kreisförmigen Bewegung der Elektronen im Magnetfeld bestimmen - oder allgemeiner der Bahnkurve eines beliebigen Teilchens mit der Ladung q und der Masse m , das sich mit einer Geschwindigkeit v senkrecht zu einem homogenen Magnetfeld B bewegt.



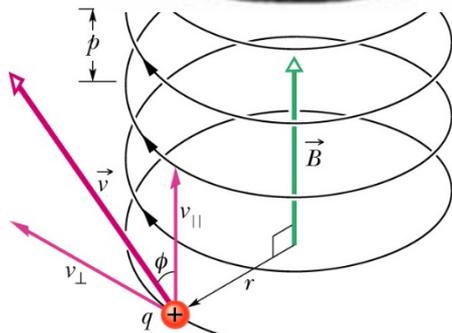
$$F = F_B = qvB = ma = m \frac{v^2}{r}$$

Der Radius:

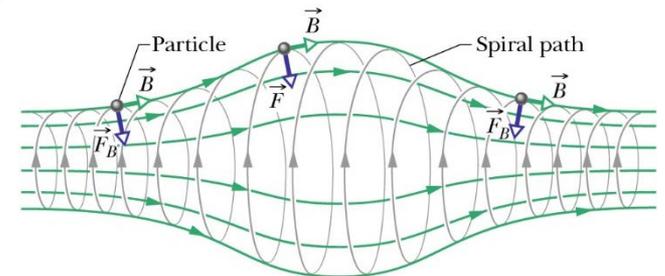
$$r = \frac{mv}{qB}$$

Die Frequenz: $f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r} = \frac{qB}{2\pi m}$

Hat die Geschwindigkeit des Teilchens eine Komponente parallel zu dem als homogen angenommenen Magnetfeld, so bewegt es sich auf einer Schraubenbahn (Helix) um die Richtung des Feldvektors.



$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

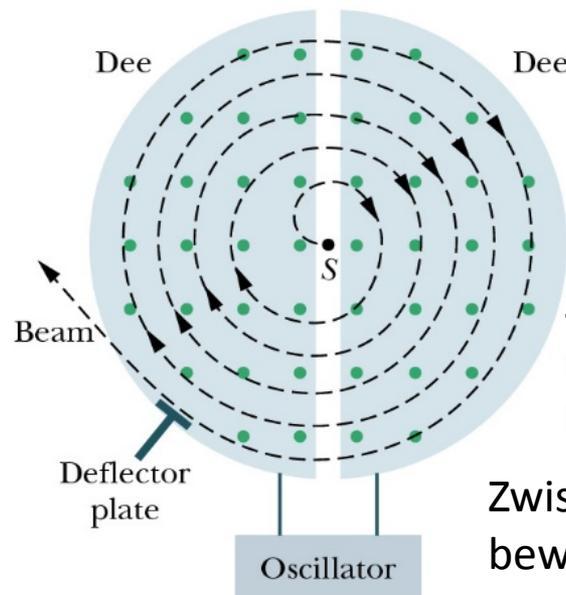


25.6 Zyklotron und Synchrotron

Um viele physikalische Frage zu beantworten, braucht man einen Strahl energiereicher, geladener Teilchen, beispielsweise Protonen, der man auf einen Festkörper treffen lässt.

Wie verleiht man einem Proton erforderliche hohe Energie?

Das Zyklotron



Zwei D-förmigen Elektroden (Dees) sind Teil eines elektrischen Schwingkreises (Oszillators), der die elektrische Potenzialdifferenz zwischen ihnen periodisch umkehrt. Damit ändert auch das elektrische Feld im Bereich zwischen den beiden Elektroden periodisch seine Richtung.

Sobald ein Elektron sich im Inneren der Elektrode befindet, ist es durch die metallenen Wände von elektrischen Feldern (nicht von magnetischen Feld!) abgeschirmt:

Zwischen den Elektroden wird das Teilchen beschleunigt und bewegt sich in den Hohlraum hinein.

Wenn die Frequenz des Oszillators sich mit der Umlauffrequenz des Teilchens übereinstimmt, setzt sich dieser Prozess fort, bis das Proton, dessen Bahnradius mit seiner Energie stetig zunimmt, die maximale Energie erreicht.

Das Synchrotron

$$f = \frac{qB}{2\pi m(v)}$$

Die Unabhängigkeit der Umlauffrequenz eines geladenen Teilchens in einem Magnetfeld von seiner Geschwindigkeit ist nur dann gewährleistet, wenn diese Geschwindigkeit wesentlich geringer ist als die Lichtgeschwindigkeit.

Im Protonensynchrotron hat man beide Probleme gelöst: Das Magnetfeld und die Frequenz des Schwingkreises sind nicht mehr konstant wie bei einem konventionellen Zyklotron, sondern sie werden während eines Beschleunigungszyklus kontrolliert und kontinuierlich verändert. Man erreicht dadurch, dass (1) die Umlauffrequenz der Protonen jederzeit mit der Frequenz des beschleunigenden Felds synchron bleibt, sowie (2), dass die Teilchen auf einer Kreisbahn umlaufen.



Ein Synchrotron besteht aus einzelnen Ablenkmagneten und dazwischen angebrachten Beschleunigungsstrecken, in denen die Teilchenbahn gerade ist. Die Teilchenbahn ist nicht spiralartig wie beim Zyklotron, sondern verläuft vom Beginn bis zum Ende des Beschleunigungsvorgangs als geschlossener Ring. Das Feld der Ablenkmagnete kann daher nicht wie das Magnetfeld im Zyklotron zeitlich konstant bleiben, sondern muss während der Beschleunigung jedes Teilchenpakets proportional zum anwachsenden Teilchengeschwindigkeit erhöht werden.