



Kapitel 08

Mikrotron



1.1 Das klassische Mikrotron

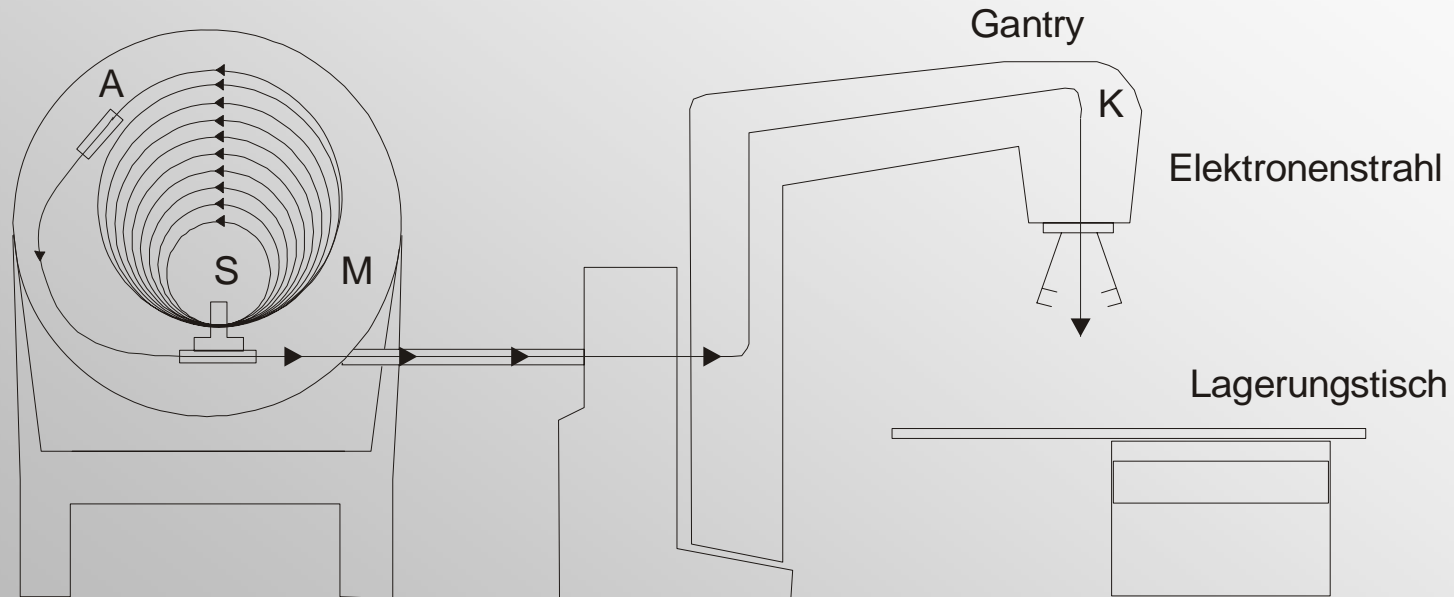
- Hochfrequenz-Kreisbeschleuniger für Elektronen
- Elektronen in einem homogenen, zeitlich konstanten Magnetfeld auf Kreisbahnen
- **Aber:** Radien wachsen mit zunehmender Energie und zunehmenden Impuls → **ähnlich Zyklotron**
- Energiequelle für die Elektronen = einzelner Hohlraumresonator, → **ähnlich einem Resonanzraum bei einer Linearbeschleunigersektion**
- Der Hohlraumresonator wird **bei jedem Umlauf** im Magnetfeld einmal durchlaufen und **erhöht dabei die Energie der Elektronen um einen konstanten Betrag**



Energiegewinn

- Beschleunigung der Elektronen nur dann, wenn Umlaufzeit und Hochfrequenzphase im richtigen Verhältnis zueinander stehen
- D.h. Elektronen phasenrichtig zum Zeitpunkt der gewählten Beschleunigungsfeldstärke auf den Hochfrequenzresonator treffen (= Resonanzbedingung)
- Mikrotrons werden oft so ausgelegt, dass der Energiegewinn der Elektronen pro Umlauf gerade eine Ruheenergie (511 keV) beträgt.
- Der Energiegewinn nach n Umläufen beträgt dann das n -fache der Ruheenergie, also $n \times 511 \text{ keV}$.

22 MeV-Kreismikrotron für medizinische Anwendungen



- M: homogenes Magnetfeld
- S: Beschleunigungsspalt
- A: Auslenkungsstrahlrohr zur lokalen Abschirmung des Magnetfeldes
- S: Strahlerkopf



- Der Polschuhdurchmesser des Führungsmagneten hängt von der gewünschten maximalen Elektronenenergie ab und beträgt typisch 1 bis 2 Meter.
- Das Magnetfeld selbst muss auf der gesamten Polfläche wegen der Resonanzbedingung auf wenige Zehntel Promille homogen sein, was sich natürlich auf die Kosten für den Magneten auswirkt
- Um den Elektronenstrahl mit der richtigen Energie aus der Umlaufbahn auszulenken, wird ein bewegliches Ablenkrohr aus Stahl in das Magnetfeld gebracht, welches das Magnetfeld lokal abschirmt
- Mit ihm kann ein einzelner Elektronenstrahl „ausgefädelt“ werden



- Die Elektronenquelle (Kanone), die Beschleunigungsstruktur, das Ablenkrohr und alle Elektronenbahnen befinden sich in einer gemeinsamen Hochvakuumkammer.
- Wegen der scharfen Resonanzbedingung haben die im Mikrotron erzeugten und beschleunigten Elektronen eine relativ geringe Energieunschärfe (z. B. nur ~30 keV bei einem kommerziellen, medizinischen 22 MeV-Mikrotron, d.h. $\sim 10^{-3}$)
- Für medizinische Anwendungen ist es prinzipiell sogar möglich, mehrere Behandlungsplätze von einer einzigen Beschleunigeranlage versorgen zu lassen.



8.2 Resonanzbedingungen beim Mikrotron

- Für den **Bahnradius** geladener Teilchen in homogenen Magnetfeldern gilt allgemein:

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \Leftrightarrow r = \frac{mv}{qB}$$

- Die **Kreisfrequenz** ω ist gegeben durch:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

- Mit $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ ergibt sich somit für die **Umlaufzeit** des Elektrons im konstanten Magnetfeld:

$$\tau = \frac{2\pi m}{qB}$$

- Vgl. zu Zyklotron: τ , ω konstant solange Masse konstant.



- Relativistische **Elektronen** bewegen sich mit **nahezu konstanter Geschwindigkeit c** . → **Beschleunigung geht in Massenzuwachs**, und bewirkt so **Erhöhung des Bahnradius**. Die Umlaufzeit nimmt daher wegen der konstanten Geschwindigkeit zu.
- Wird die **kinetische Energie des Elektrons** bei jedem Umlauf gerade um eine Ruheenergie erhöht, so beträgt die Gesamtenergie nach **n Umläufen**

$$E_n = E_0 + T_n = E_0 + nE_0 = (n + 1) \times E_0 \gamma$$

- Für die Teilchenmasse gilt beim n -ten Umlauf:

$$m_n = m_0 \gamma = m_0 (n + 1)$$

- Und daher folgt für die Umlaufzeit:

$$\tau_n = (n + 1) \frac{2\pi m_0}{qB} = (n + 1) \tau_0$$



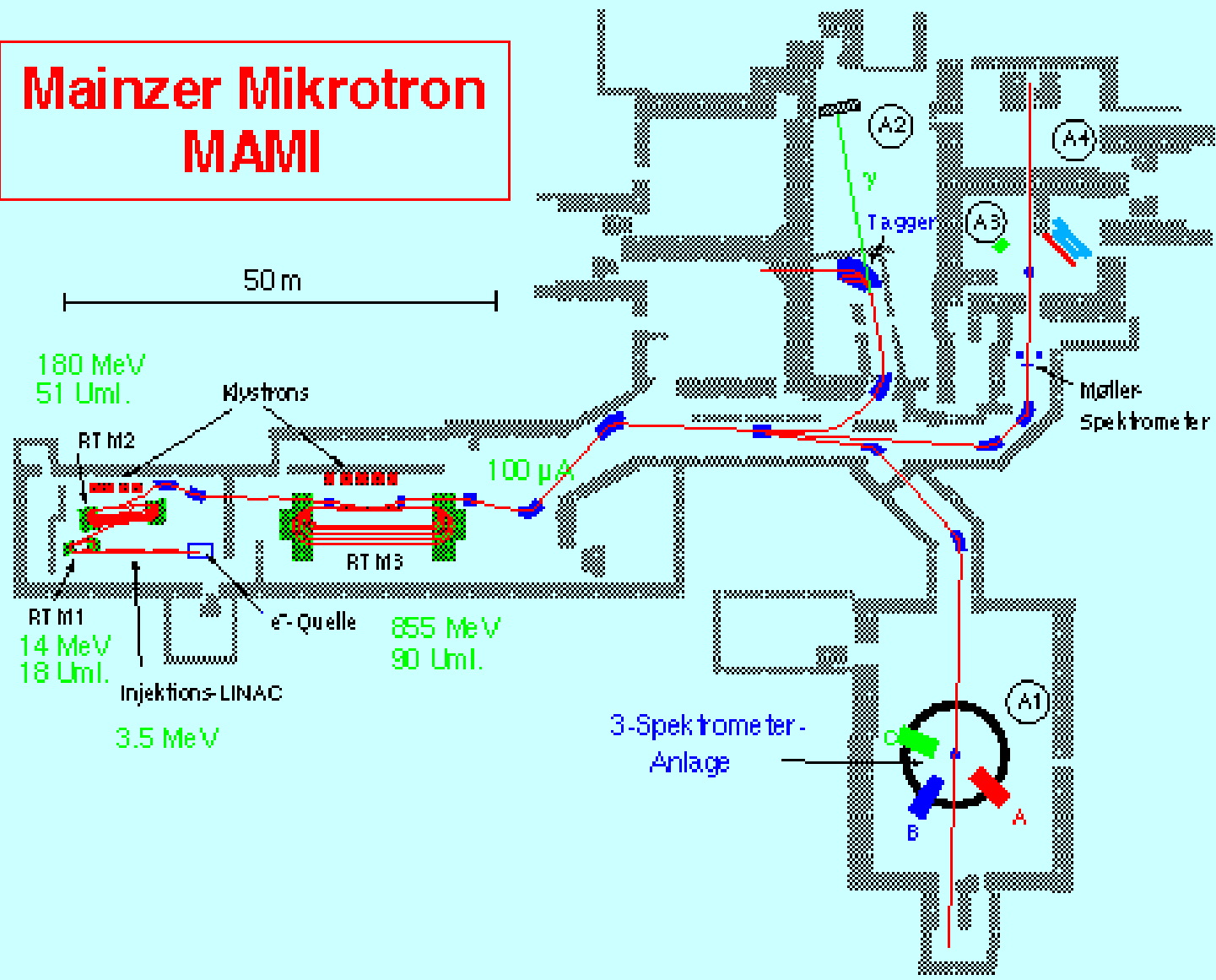
- Nach jeder Passage der Beschleunigungsstrecke mit die Umlaufzeit der Elektronen um 1 RF Periode zu.
- Um die Umlaufzeit exakt auf die Phasen der beschleunigten Hochfrequenz abzustimmen, muss lediglich das **Magnetfeld B** entsprechend gewählt werden.
- Teilchen ist immer relativistisch (Microtron Prinzip so wie Zyklotron aber Verwendung **nur im relativistischen Bereich**).



Mikrotron – Race Track Mikrotron

- „gewöhnlichen Mikrotrons“ Endenergie der Elektronen auf maximal 25 MeV (0,5 MeV/Umlauf ~50 Umläufe)
- Geringes Magnetfeld → Bahndurchmesser rasch sehr groß
- Frage: → höhere Energien?
- Antwort: → „Rennbahn“-Mikrotron (race track microtron, meist einfach nur Mikrotron genannt)
 - klassische Mikrotron wird aufgetrennt und in den Zwischenraum ein **Linearbeschleuniger** eingebaut
 - → viel höherer Energiegewinn pro Umlauf
 - 1999: größte dieser Art, das MAMI (Mainz Mikrotron), ist für Energien **bis 850 MeV**

Mainzer Mikrotron MAMI





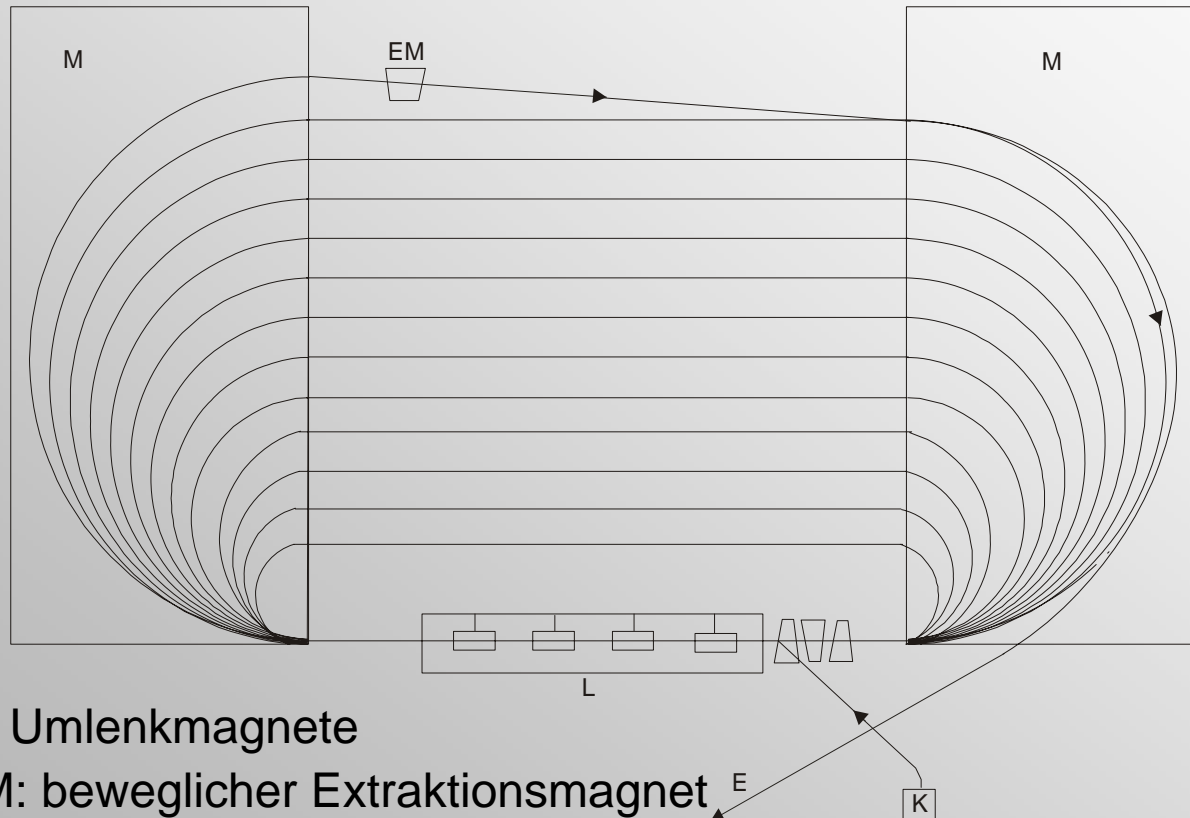
8.3 Das "race-track" Mikrotron

- Wegen des relativ niedrigen Magnetfeldes steigt der Bahndurchmesser rasch auf sehr große Werte an.
- Maximal erreichbaren Energien beim **klassischen Mikrotron bei 20 – 25 MeV**
- → „**race-track-microtron**“. Dabei wird der Magnet zur Erzeugung des **Magnetführungsfeldes für die beschleunigten Elektronen in zwei Halbmagnete aufgeteilt, die räumlich voneinander getrennt aufgestellt werden (Vgl. Dees des Zyklotrons).**
- Der Raum zwischen den beiden Magneten ist magnetfeldfrei. Die Elektronen legen dann in diesem **Zwischenraum geradlinige Bahnen** zurück.

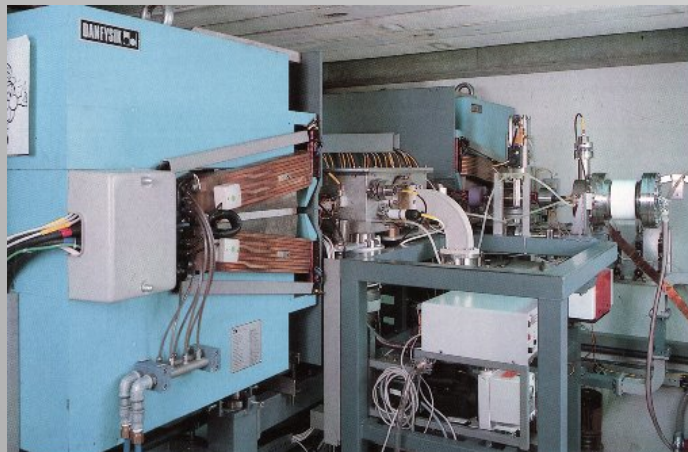
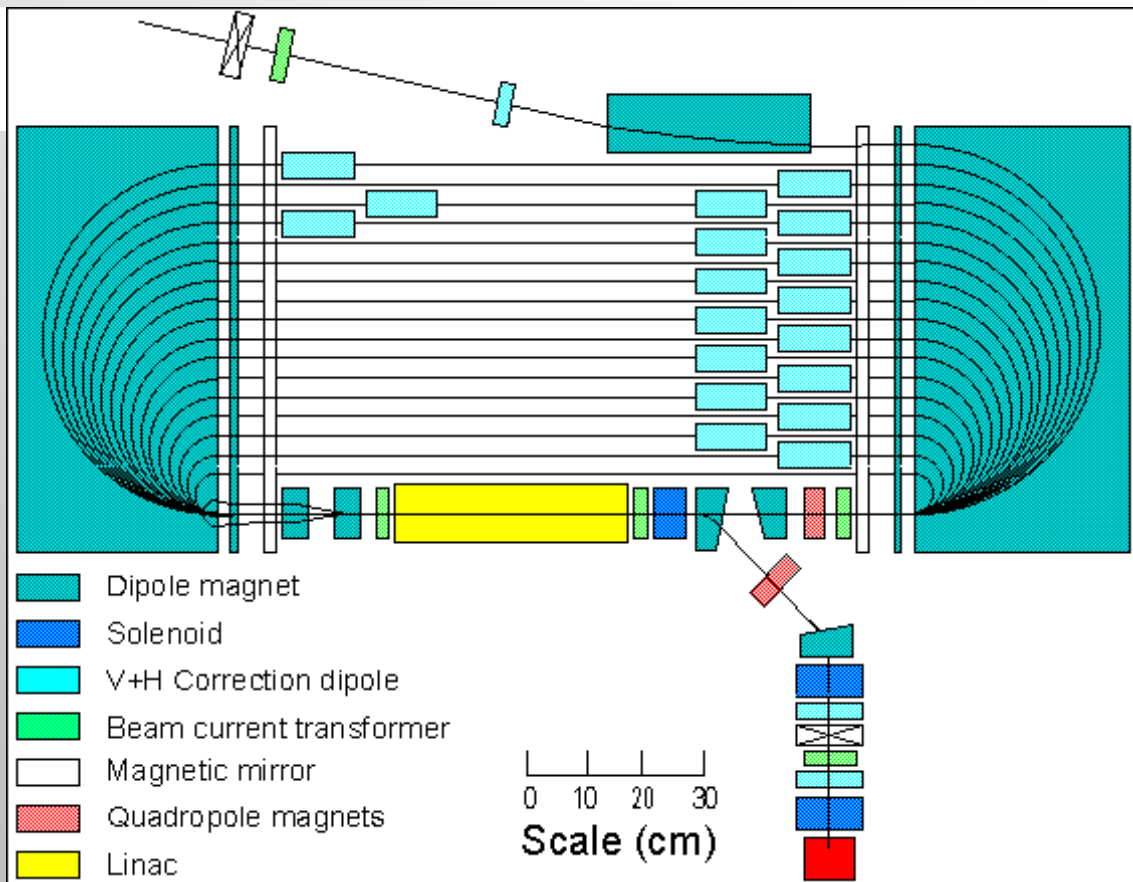


- Der freie Platz zwischen den beiden Magnethälften ermöglicht die Unterbringung größerer Beschleunigerstrukturen
- Statt eines einzelnen Hohlraumresonators wie beim Kreismikrotron kann zum Beispiel eine komplette Hochfrequenz-Beschleunigersektion verwendet werden, wie sie sonst bei Elektronen-Linearbeschleunigern verwendet wird
- Elektronenenergien bis zu mehreren 100 MeV
- hohen Energieschärfe → Umlaufbahnen für Elektronen verschiedener Energie sind wegen der Resonanzbedingung eindeutig räumlich getrennt
- Strahlextraktion mit einem beweglichen Magneten → Strahlenbündel ausgelenkt

race-track-Mikrotron mit LINAC-Sektion



- M: Umlenkmagnete
- EM: beweglicher Extraktionsmagnet
- K: Elektronenkanone
- L: LINAC-Sektion
- E: Elektronenstrahl



Maximum energy	100 MeV
Number of turns	19
Energy gain/turn	5.3 MeV
Pulse current	10 mA
RF frequency	2.9986 GHz
Pulse width	1 microsecond
Max repetition frequency	10 Hz
Energy spread	0.1 MeV
Emittance	0.1 mm mrad
Dipole field	1.13 T

ASTRID is a 100 MeV Race-Track
 Microtron (RTM) / MAXLAB in Lund,
 Sweden



8.4 Anwendungen des Mikrotrons

- hohe Strahlqualität
- hohen Energieauflösung → gute Eignung für Elektronenstreuexperimente
- Medizin → Strahlentherapie
- hohen Energieschärfe → besonders günstige Elektronendosisverteilungen
- Aber: hohen Magnetkosten und sehr aufwendige großvolumigen Vakuumkammer
- Industrie → Radiographie und zur Erzeugung von Strahlschäden in Festkörpern