

Kapitel 1

Motivation

Zur Beschleunigung von Ionen werden heutzutage fast ausschließlich Hochfrequenzresonatoren verwendet. Ionen mit einer Geschwindigkeit im Bereich von 1 – 20% der Lichtgeschwindigkeit (dies entspricht einer Teilchenenergie von 0.05 – 19.3 MeV/u) können sehr effektiv mit *IH-Resonatoren* beschleunigt werden [1, 2]. Die Abkürzung IH steht dabei für *Interdigitale H-Mode Struktur*. Hierbei handelt es sich um kreiszylindrische Resonatoren, in denen der TE₁₁ Mode angeregt wird. Durch das Einbringen von Driftröhren wird das Feldbild des TE-Modes im Bereich der Strahlachse derart modifiziert, dass longitudinale elektrische Feldkomponenten auftreten, die zur Beschleunigung der Ionen verwendet werden. Auf Grund der hohen Ruheenergie der Ionen und den daraus resultierenden niedrigen Geschwindigkeiten (bezogen auf die Lichtgeschwindigkeit) liegen die verwendeten Frequenzen dabei typischerweise im Bereich von 100 – 500 MHz. Zur Steigerung der Effizienz einer Beschleunigeranlage ist der Energiegewinn pro Längeneinheit von großer Bedeutung: Einerseits hängt die longitudinale Fokussierungskraft von der Feldstärkekomponente in dieser Richtung ab und muss mit dem Strahlstrom gesteigert werden; andererseits steigen die Investitions- und Betriebskosten mit der Länge der Anlage. Um einen Energiegewinn ΔW für einen Ionenstrahl mit dem Strom I_s und der Ladung q in einer Kavität mit der Länge L_{res} zu erreichen, muss nach [3] die Hochfrequenzleistung

$$P = \underbrace{\frac{U^2}{Z_{\text{eff}} L_{\text{Res}} \cos^2 \varphi_s}}_{\text{Resonatorverluste}} + \underbrace{U \cdot I_s}_{\text{Strahlleistung}}, \quad \Delta W = qU$$

zur Verfügung gestellt werden. Die Größe U steht hierbei für die effektiv durchlaufene Spannung, φ_s bezeichnet die Phase des Sollteilchens und Z_{eff} die *effektive Shuntimpedanz* [3]. Der Ionenstrahlstrom I_s wurde in den letzten Jahren gesteigert und liegt teilweise über 100 mA. Somit wird bei einer Beschleunigungsspannung von z.B. $U = 10$ MV eine Leistung von über 1 MW benötigt. In Abhängigkeit von der Arbeitsfrequenz der Beschleunigerstrukturen stehen verschiedene Typen von Hochfrequenzgeneratoren zur Verfügung. In Abbildung 1.1 sind die Frequenzbereiche sowie die erzielbaren Ausgangsleistungen für konventionelle Röhren, Klystroden sowie Klystren dargestellt [2]. Alle drei genannten Hochfrequenzgeneratoren basieren auf

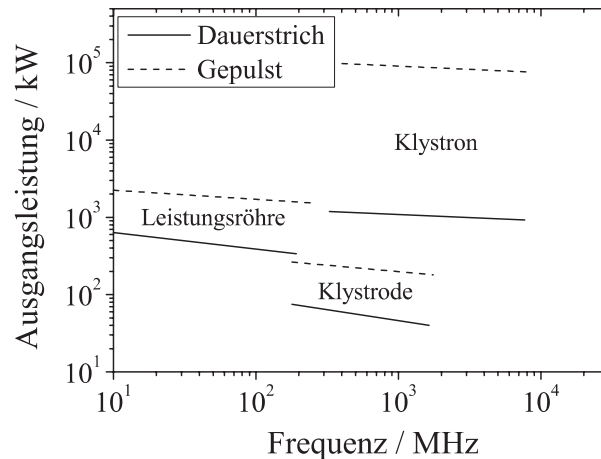


Abbildung 1.1: Frequenzbereich und erzielbare Ausgangsleistung für verschiedene Hochfrequenzgeneratoren nach [2].

dem Einsatz von Elektronenstrahlen, allerdings unterscheiden sie sich in der zur Einprägung der Zeitstruktur verwendeten Methode und daher auch in dem abdeckbaren Frequenzbereich.

In Leistungsröhren (z.B. Trioden, Tetroden etc.) wird der Elektronenstrahl mittels eines direkt vor der Kathode platzierten Gitters gesteuert. Dabei ist es unvermeidlich, dass Elektronen auf das Gitter treffen und dort zu erheblichen thermischen Belastungen führen. Durch die Verwendung von konzentrischen Zylindern für Kathode, Gitter und Anode, wie z.B. in der Leistungsröhre TH 525 von Thales [4] realisiert, sind Ausgangsleistungen von 2 MW im gepulsten Betrieb erzielbar. Die maximale Arbeitsfrequenz dieser Röhren ist durch die Kapazität zwischen Gitter und Kathode sowie durch Laufzeiteffekte der Elektronen auf etwa 300 MHz limitiert [5].

In Klystronen wird das Prinzip der Geschwindigkeitsmodulation zur Realisierung der Zeitstruktur in einem axialen rotationssymmetrischen Elektronenstrahl angewendet. Durch Wechselwirkung der Elektronen mit resonanten Feldern in mehreren Kavitäten des Klystrons wird eine Geschwindigkeitsmodulation innerhalb des Elektronenstrahls erzielt. Nach dem Durchqueren einer Driftstrecke resultiert diese Geschwindigkeitsmodulation in einer Dichtemodulation, welche zur Formierung von einzelnen Ladungspaketen, sogenannten Bunchen, führt. Der zeitliche Abstand dieser Ladungspakete entspricht dabei genau der Periodendauer der Eigenfrequenz des Auskoppelkreises, so dass ein maximaler Energietransfer zwischen den Elektronen und dem Hochfrequenzfeld erzielt wird. Neben den Abmessungen der benötigten Resonatoren ist die minimale Baulänge eines Klystrons von der benötigten Driftstrecke und somit von seiner Arbeitsfrequenz abhängig. In Abbildung 1.2 ist dieser Zusammenhang für verschiedene Frequenzen und Leistungen veranschaulicht [6]. Hochleistungsklystronen werden daher meist für Frequenzen oberhalb 500 MHz eingesetzt. Die Klystrode stellt eine Kombination aus Tetrode und Klystron dar. Zur Steuerung eines axialen rotationssymmetrischen Elektronenstrahls wird ein direkt vor der Kathode platziertes Gitter verwendet. Auf diese Weise lässt sich eine einfache

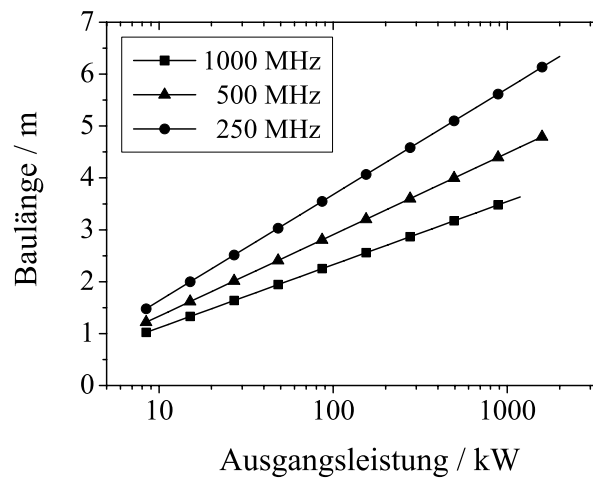


Abbildung 1.2: *Baulänge von Klystron in Abhängigkeit von ihrer Frequenz und Ausgangsleistung nach [6].*

Formierung der Ladungspakete auf engem Raum erzielen, die benötigten Baulängen fallen daher deutlich geringer im Vergleich zum Klystron aus. Zur Auskopplung der Hochfrequenzleistung wird, analog zum Klystron, ein Resonator verwendet. Die maximale Ausgangsleistung der Klystroden ist durch die Belastbarkeit des Gitters limitiert und liegt deutlich unter denen von Klystron und konventioneller Röhre. Ein alternatives Konzept zur Realisierung eines Hochfrequenzleistungsgenerators für den Bereich von 150-300 MHz wurde in [7] vorgeschlagen. Die Strahldynamik innerhalb des Generators wird in dieser Arbeit detailliert untersucht. Die wesentlichen Merkmale des Konzeptes sind hierbei

- Erzeugung eines axialen rotationssymmetrischen Elektronenstrahls in einer konventionellen Kanone
- Verwendung eines axialen Solenoidfeldes zur Kompensation der Raumladungskräfte
- Einprägung der Zeitstruktur durch eine extern angesteuerte Ablenkeinheit, die eine zeitabhängige transversale Ablage des Elektronenstrahls bewirkt. Strahlanteile mit großen Ablagen werden zu einem Kollektor geleitet, während die auf der Strahlachse verbleibenden Teilchen zur Anregung des Auskoppelresonator nutzbar sind.
- Rückgewinnung der Energie der abgelenkten Elektronen in einem Einstufenkollektor
- Direkte Ankoppelung des Elektronenstrahls an den zur Beschleunigung der Ionen verwendeten Resonatormode. Dazu wird der selbe Koppelmechanismus verwendet, auf dem die Ausgangskreise von Klystron basieren.

Der schematische Aufbau eines solchen Generators ist in Abbildung 1.3 dargestellt, seine wesentlichen Eckdaten sind in Tabelle 1.1 zusammengefasst.

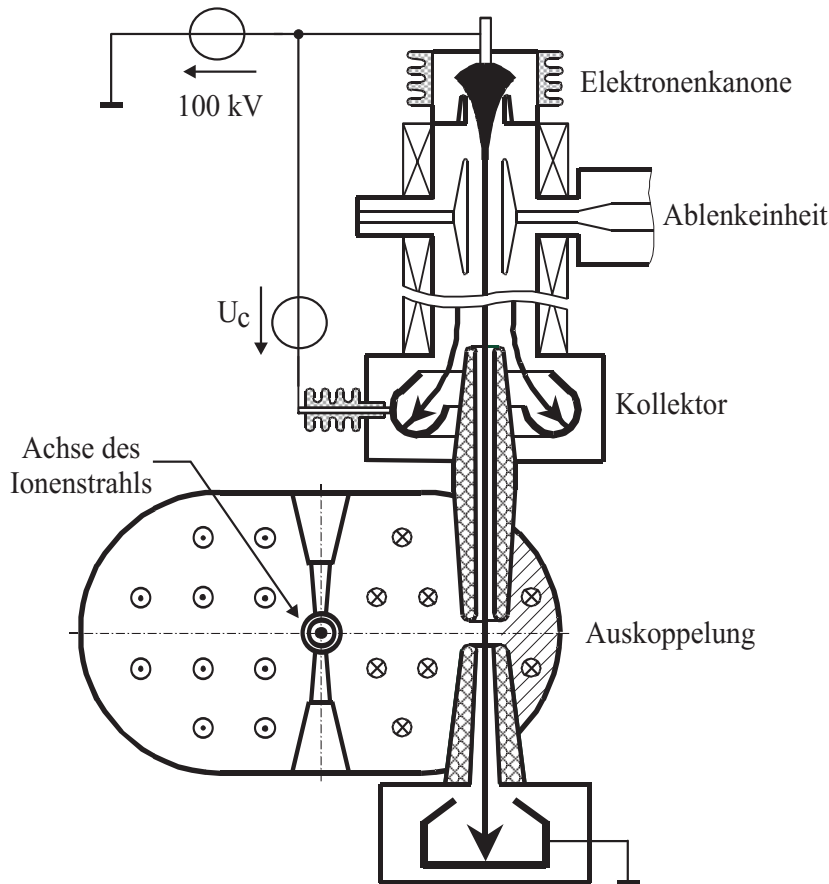


Abbildung 1.3: Schematischer Aufbau des alternativen Generators nach [7].

Frequenzbereich	150 - 300 MHz
Ausgangsleistung	≥ 1.5 MW
Pulsdauer	$500 \mu\text{s} - 1$ ms
Pulsrate	≤ 10 Hz

Tabelle 1.1: Eckdaten des Hochfrequenzgenerators

Die Anregung von Kavitäten zur Beschleunigung von relativistischen Elektronen durch einen Treiberstrahl („Wakefield-Beschleuniger“) wurde in den 80er Jahren am DESY untersucht [11, 12]. Dabei wurden die durch einen Hohlstrahl am Rand der Kavitäten erzeugten transienten elektrischen Felder auf die Achse des zu beschleunigenden Elektronenstrahls transformiert. Im Gegensatz dazu basiert das hier vorgestellte Konzept auf der direkten Kopplung eines gepulsten Elektronenstrahls an die elektrischen Felder einer TE-Stehwellenstruktur, die zur Beschleunigung von

schweren Ionen verwendet wird. Die Vorteile dieser Methode zur Hochfrequenzerzeugung sind

- Kompakter Aufbau mit geringen Abmessungen
- Der Generator selbst besitzt keine resonanten Bauelemente und kann somit einen weiten Frequenzbereich abdecken
- Durch die direkte Kopplung an den Resonator des Ionenbeschleunigers besteht kein Bedarf an Einkoppelschleifen, Leitungen und Anpassgliedern zur Übertragung der Hochfrequenzleistung zu den Beschleunigungskavitäten

Besonders der letzte Punkt stellt im Vergleich zu konventionellen Generatoren eine erhebliche Vereinfachung dar (siehe Abbildung 1.4).

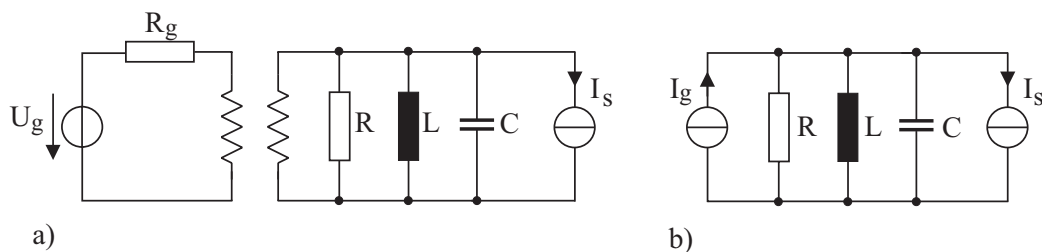


Abbildung 1.4: Ersatzschaltbilder des Resonators zur Beschleunigung der Ionen. Der Strom I_s repräsentiert hierbei den Ionenstrahl. a) Konventioneller Generator mit Leitung und Koppelschleife. b) Direkte Koppelung des Elektronenstrahls an den Resonatormode.

In der vorliegenden Arbeit werden die einzelnen Baugruppen (Elektronenkanone, Ablenkeinheit, Strahlkollektor sowie die Ankoppelung an den IH-Resonator des Verstärkers im Detail und bezüglich der elektrischen Eigenschaften und Strahldynamik optimiert. Dabei wurde eine Ausgangsleistung von 1 MW zu Grunde gelegt, um den Bau eines Prototyps nicht unnötig zu erschweren. Die maximale Ausgangsleistung kann in weiteren Entwicklungsstufen durch Variation der Elektronenstrahlparameter gesteigert werden.

Die komplexe Wechselwirkung zwischen den elektromagnetischen Feldern und dem Elektronenstrahl ist einer analytischen Beschreibung nur bedingt zugänglich. Aus diesem Grund wurden die einzelnen Baugruppen des Verstärkers detailliert mit Hilfe des dreidimensionalen Simulationspaketes MAFIA untersucht. Das diesem Programm zu Grunde liegende numerische Verfahren zur Lösung der Maxwell'schen Gleichungen wird im folgenden Kapitel in seinen wesentlichen Grundzügen behandelt, dabei wird auch auf die für die Untersuchung des Verstärkers wesentliche Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen und den elektromagnetischen Feldern eingegangen.