



Vorlesungsaufbau

- Grundlagen und Überblick
 - Der Teilchenbeschleuniger als Forschungsinstrument und als technisch-medizinisches Gerät
 - Haupttypen und Anwendungen

- Technische Aspekte
 - Elektronen- und Ionenquellen
 - Elektrostatische Beschleuniger
 - Linearbeschleuniger
 - Betatron
 - Zyklotron
 - Synchrotron
 - Starke Fokussierung
 - Ausgeführte Maschinen
 - Speicherringe "colliding beam" Experimente

- Beispiele für moderne Synchrotronanwendungen



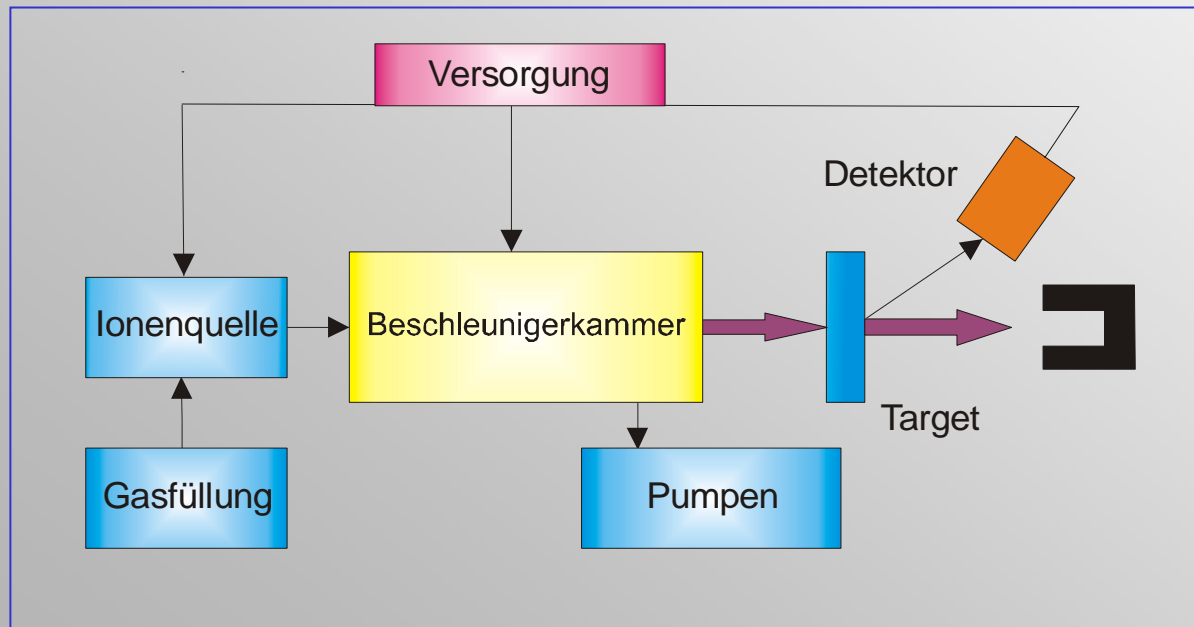
Vorlesungstermine

- 3 Blöcke jeweils Do, Fr.
- Do: 15:30-18:00, FH, Sem134 (9/11, 16/11, 11/01)
- Fr: 08:30-10:00, FH, Sem134 (10/11, 17/11, 12/01)
- Fr: 15:30-18:00, FH, Sem134A (10/11, 17/11, 12/01)



Kapitel 04

Elektronen und Ionenquellen





Anforderungen

- Kompakte Form (oft integriert im Beschleuniger)
- Zusätzliche Funktion der Vorbeschleunigung (Energien keV - 100 keV Bereich)
- Anforderungen:
 - hohe Strahlintensität
 - kleine Winkeldivergenz (d.h. geringe transversale Aufweitung = geringe Strahlemittanz)
 - hohe Stabilität
 - Betriebssicherheit (schwer zugänglich)
 - (für gepulste Quellen → hohe Teilchenzahl / Puls)



4.1 Elektronenquellen

- Freie Elektronen → Glühkathode (Wolframdraht, Durchmesser ca. 1 mm)
- Temperatur $> 2500\text{ K}$ → Strom $\sim 1\text{ A}$ auf einer Fläche $\sim 1\text{ cm}^2$
- Durchschnittliche Betriebsdauer $\sim 4000\text{ h}$

- Wenn Kathodentemperatur 3000 K → Kathodenstrom etwa 20-facher Wert
- Mittlere Betriebsdauer eines solchen Drahtes sinkt drastisch auf etwa 20 h
- Ausbeute vs. Lebensdauer und Wartungsaufwand



4.1.1 Elektronenerzeugung

- Freie Elektronen können aus Metallen, Elektronenhalbleitern und Gasentladungen gewonnen werden





Glühkathoden

- Festkörper/Metall: Leitungselektronen frei beweglich
- Zuführung der Austrittsarbeit W_A
- → Austritt aus dem Festkörper
- Austrittsarbeit: Zufuhr thermischer, kinetischer, elektromagnetischer oder elektrostatischer Energie
- Man unterscheidet:
 - thermische, Sekundäremissions-, Photo- und Feldemissions-Kathoden
- Thermische Kathoden = Glühkathoden (zahlenmäßig größtes Einsatzgebiet im Beschleunigerbau)



Richardson-Gleichung

- Der von einer Glühkathode emittierte Elektronenstrom J_e setzt sich nach der Richardson-Gleichung wie folgt zusammen:

$$J_e = AFT^2 e^{-\frac{W_A}{kT}}$$

- J_e Elektronenstrom
- A Richardson Konstante
- F Kathodenoberfläche
- T Kathodentemperatur
- W_A Austrittsarbeit
- k Boltzmann Konstante
 - T möglichst hoch, W_A möglichst klein



Emissionsstromdichte / Elektronenausbeute

- Verhältnis Elektronenstrom J_e zu Kathodenoberfläche $F =$
Emissionsstromdichte j_e
- Verhältnis Emissionsstrom zu Heizleistung =
Elektronenausbeute \rightarrow Wirkungsgrad
- Aus Richardson-Gleichung \rightarrow Zusammenhang zwischen
Kathodentemperatur und Emissionsstrom bzw. -dichte



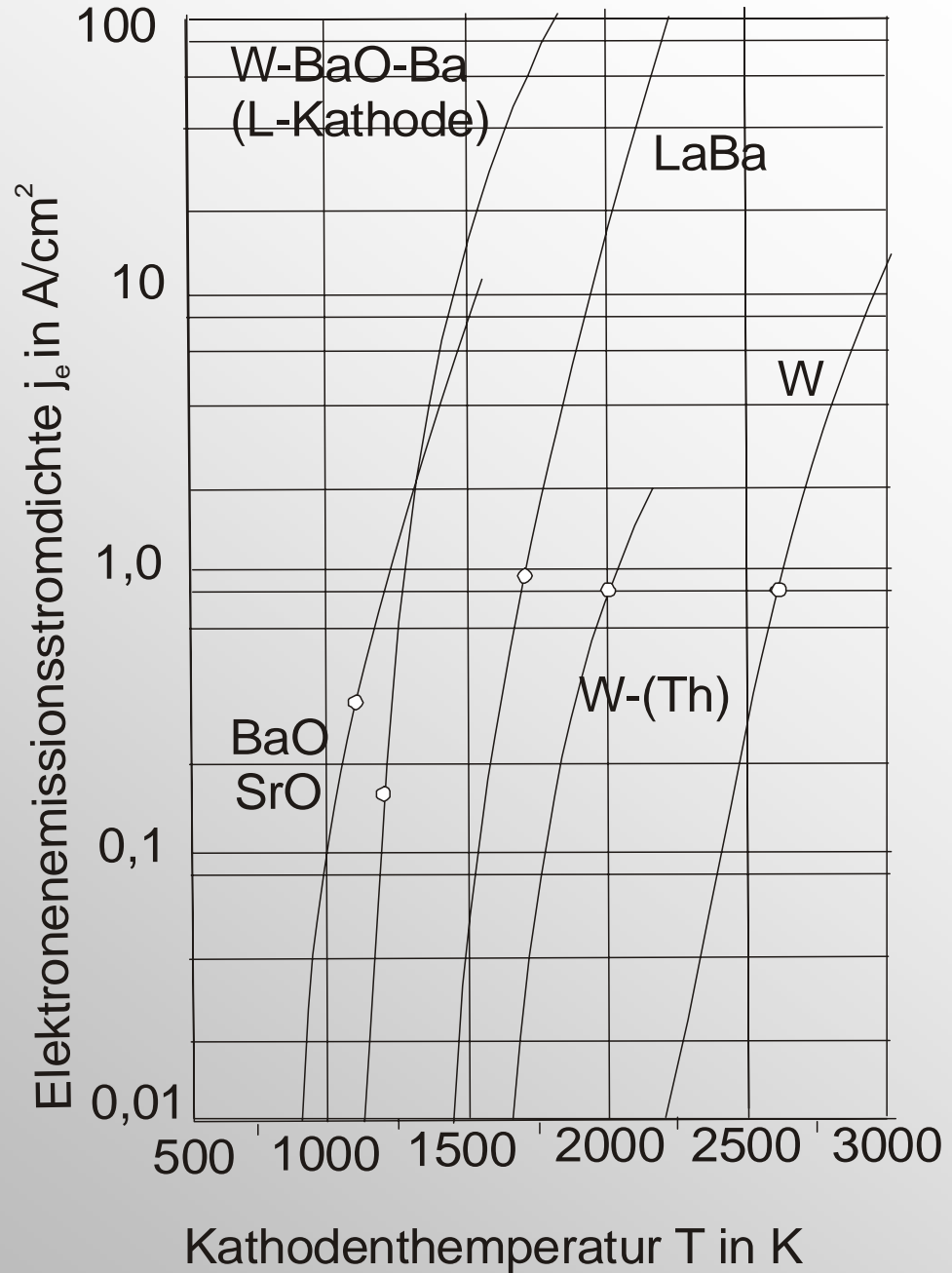
Zusammenhang zwischen Kathodentemperatur und Emissionsstrom bzw. -dichte

| Kathodentyp | Arbeits-temp. T [K] | Austrittsarbeit W_A [eV] | Richardson Konstante A [A/cm ² grd ²] | Emissionsstromdichte j_e [A/cm ²] | Lebensdauer t [h] |
|---------------------------------|---------------------|----------------------------|--|---|-------------------|
| Wolfram, rein | 2600 | 4,53 | 60 | 0,84 | 10 000 |
| Tantal, rein | 2400 | 4,13 | 37 | 0,45 | 10 000 |
| Wolfram, thoriert | 2000 | 2,84 | 3 | 0,82 | 5 000 |
| L-Kathode (Wo-Ba) | 1200 | 2,13 | 100 | 0,16 | 1 000 |
| Sinterkathode Wo-Bariumaluminat | 1200 | 1,72 | 3 | 0,26 | 1 000 |
| Barium-Strontiumoxyd | 1100 | 1,00 | 0,01 | 0,32 | 5 000 |
| Lanthanborid | 1700 | 2,66 | 25 | 0,95 | 500 |





Emissionsdaten von Glühkathoden





Kathodenmaterialien

- **Reinmetallkathoden**
 - hohe Arbeitstemperaturen, niedrige Energieausbeute wegen hohem Heizstrom, z. B.: Wolfram, Tantal
- **Metalle mit adsorbierter Fremdschicht**
 - Trägermaterial meist Wolfram
 - Beispiele für Schichtmetalle: Barium, Thorium, Cäsium
 - Mehrfachschichtkathodenträgermaterial: Sauerstoff-Alkali- oder Erdalkalimetalle
- **Chemische Verbindungen (Halbleiter)**
 - Glühkathoden, z.B.: reine Oxide, meist allerdings Oxidgemische: BaO-SrO, LaB₆, aber auch Nitrid-, Sulfid-Karbid- und Halogenid-Kathoden; niedrige Austrittsarbeit, extrem kleine Richardson-Konstante



4.1.2 Elektronenstrahlerzeugung

- Elektronen von der Kathode in Richtung Anode, Abstand d , Extraktionsspannung U
- Ein **scharf gebündelter Elektronenstrahl** ist Voraussetzung für einen **hohen Richtstrahlwert**, der die **elektro-optischen Fokussierung** beschreibt und definiert ist als das **Verhältnis der Emissionsstromdichte j_e zum Raumwinkel Ω**

$$\Theta = \frac{j_e}{\Omega} \text{ Richtstrahlwert}$$



Sättigungsstromdichte

- Örtliche und zeitlich Verteilung der Raumladung beeinflusst die Strahlerzeugung
- Coulomb-Abstoßung der Elektronen im Strahlbündel führt zur
 - Strahlverbreiterung, und damit zur Verringerung des Richtstrahlwertes
 - Begrenzung der Stromdichte
- Aus dem Langmuirschen Raumladungsgesetz folgt die Sättigungsstromdichte (2 parallel Platten):

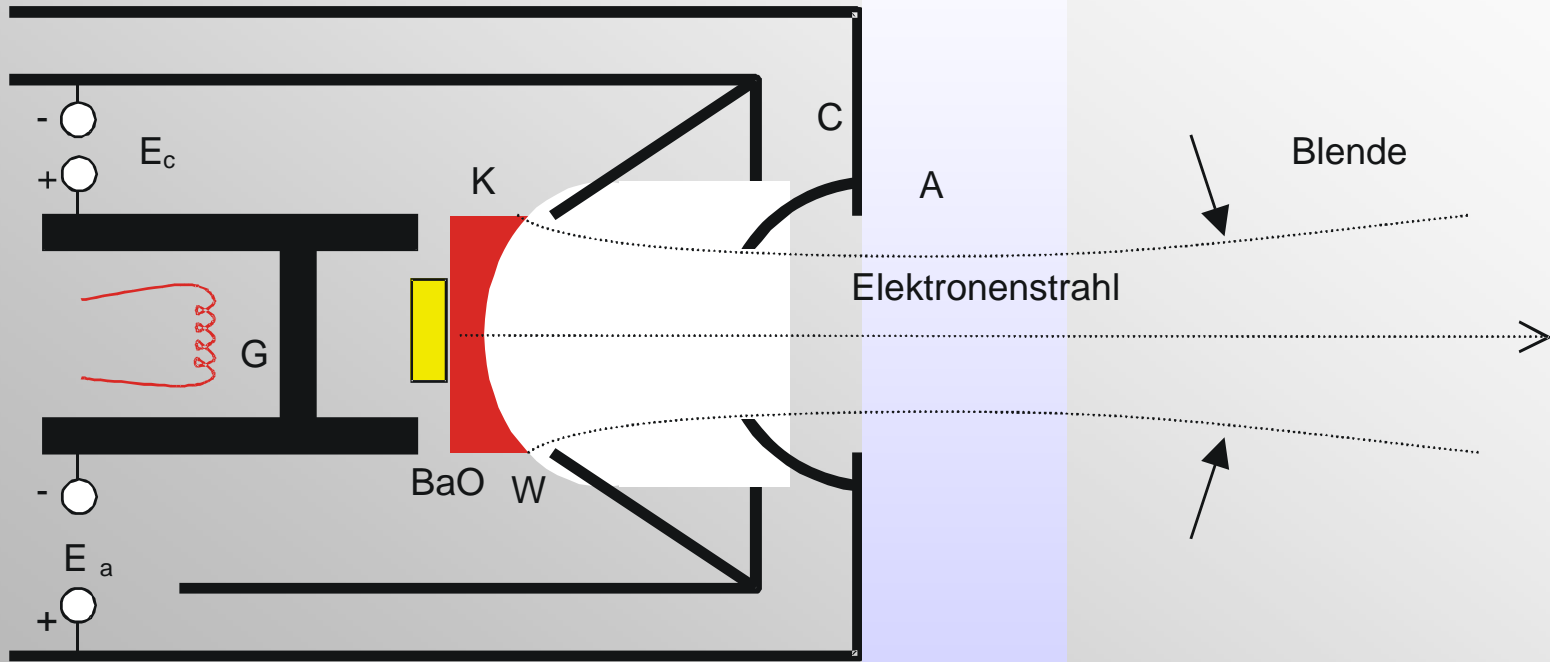
$$j_{e,s} = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{2 \frac{e_0}{m_e} \frac{U^{3/2}}{d^2}}$$



Pierce-Systeme

- Zur Erzeugung besonders hoher Stromdichten
- Spezielle Baumform der Anode A und der Steuerungselektrode C → Äquipotentialflächen kompensieren Raumladungseffekte
- Technisch realisiert mit Kathode K mit einer hohlspiegelartig gekrümmten Emissionsfläche

Pierce Elektronenquelle in einem Linearbeschleuniger



G – Kathodenheizer, K – Kathode, A – Anode, C – Kontrollelektrode, E_a – Anodenspannung, E_c – Kontrollspannung, W – hohlspiegelartige Emissionsfläche



Pierce - Gun

- Wolframkathoden, indirekt geheizte oder „oxid“ Kathoden
- Heizdraht ist umgeben von einem Rohr mit Metalloxidbeschichtung (Barium, Strontium)
- Vorteil der Oxidkathoden:
 - niedrige Elektronenemissionstemperatur (ca. 1000 K niedriger als bei konventionellen Wo-Kathoden) → gute Lebensdauer
 - Hoher Strahlstrom von einigen Ampere
 - Winkeldivergenz von $5 - 10^\circ$ (abhängig von Konstruktion und Öffnungsgeometrie)



4.2 Ionenquellen

- Meist leichte, einatomige, einfach geladene, positive Ionen (H^+ , D^+ , T^+ , He^+ , ...)
- Selten: schwerere, mehrfach geladene Ionen
- Anforderungen:
 - hohe Stromstärke
 - kleine Strahlapparatur (= hohe Richtstrahlwerte bei gleichzeitig geringem Substanzverbrauch, gute Gasökonomie)
 - große Ionenausbeute
 - geringe Verunreinigung der zu beschleunigenden Ionen
 - lange Lebensdauer
 - Betriebssicherheit
 - zeitliche Konstanz
 - Justierbarkeit von außen
 - leichte Auswechselbarkeit



Man unterscheidet:

- Erzeugungs-,
- Beschleunigungs- und
- Fokussierungsprozess



4.2.1 Ionenerzeugung

- **Feststoffionen**
- Metall- oder Halbleiterionen
 - **Verdampfen:** Feststoff wird verdampft, anschließend wird das Gas ionisiert
 - **Beschuss mit hochenergetischen Teilchen:** direkte Ionenfreisetzung **aus kalten Metall- oder Halbleiteroberflächen**; es kommt zur Ausbildung von positivem oder negativem **zerstäubtem Material**





- **Gasionen**

- Ionen aus Gasen können durch **Einstrahlung von genügend kurzwelligem Licht**, durch Stossprozesse oder thermisch erzeugt werden:

- **Photoionisation**

- ... tritt auf, wenn ein Atom oder ein Molekül von einem Lichtquant getroffen wird, dessen Energie $h\nu$ größer als die Ionisierungsarbeit W_i des bestrahlten Teilchens ist.

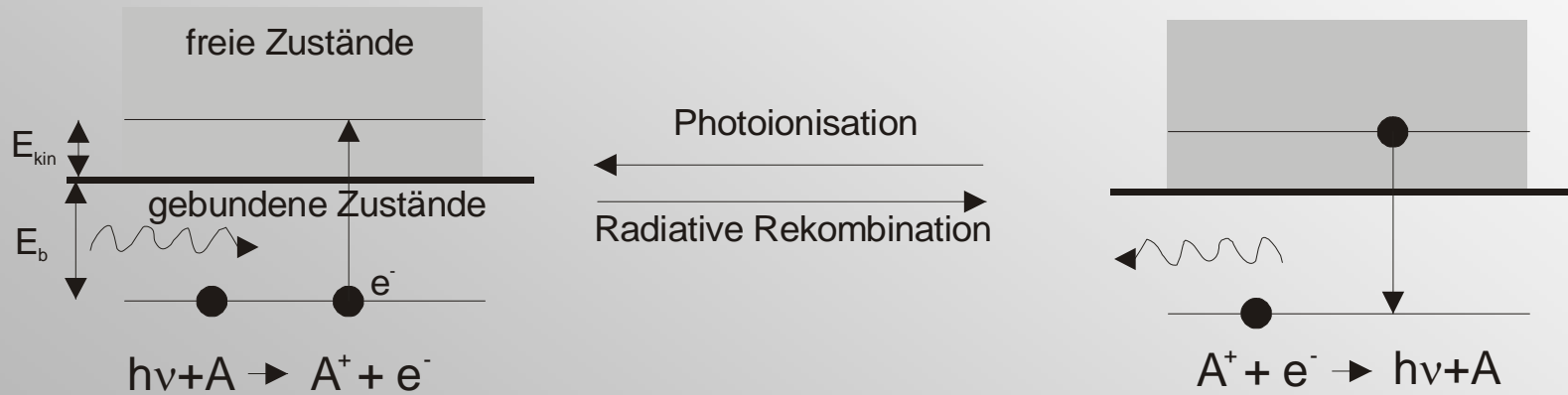
- Grenzwellenlänge:

$$h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \geq W_i$$
$$\lambda_{gr} = \frac{12640 [eV] \cdot \text{\AA}}{W_i}$$

- Umkehrprozess, die radiative Rekombination, führt zu einer Verringerung der Ionenzahl
 - Ein **freies Elektron** wird in einen gebundenen Zustand eines **Ions eingefangen** und um die Energie- und Impulserhaltung zu erfüllen, muss dabei ein Photon frei werden, welches die Überschussenergie „wegträgt“.



Photoionisation und radiative Rekombination

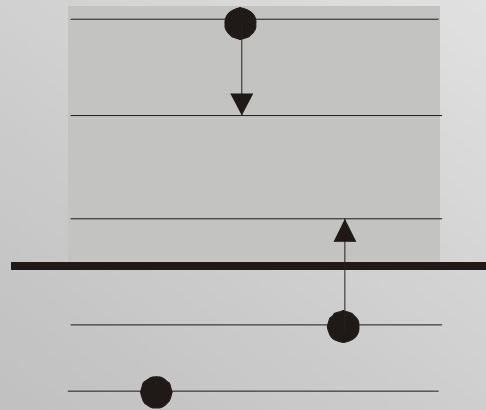




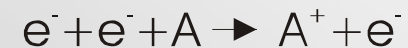
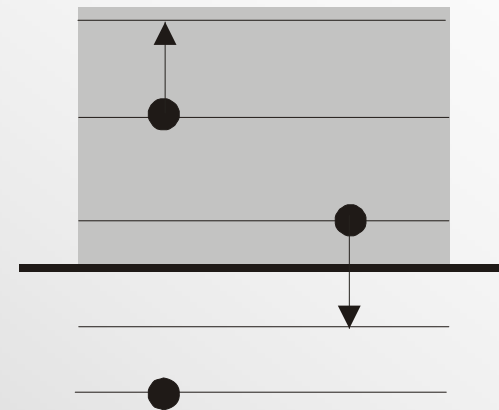
Stoßionisation

- Stoßprozesse (bei Beschuss mit energiereichen Teilchen, beim Stromdurchgang durch ein Gas oder durch Dampf, ...)
- Mit Elektronen Schuss auf Elektronenhülle → Elektronen können herausschlagen werden
- → Elektronenstoßionisation
 - Es entsteht langsames Elektron und ein positives Ion
 - Erhaltung der Energie: die Energie des getroffenen Atoms nimmt um die Ionisationsenergie W_i ab.

Elektronenstoßionisation - Dreikörper Rekombination

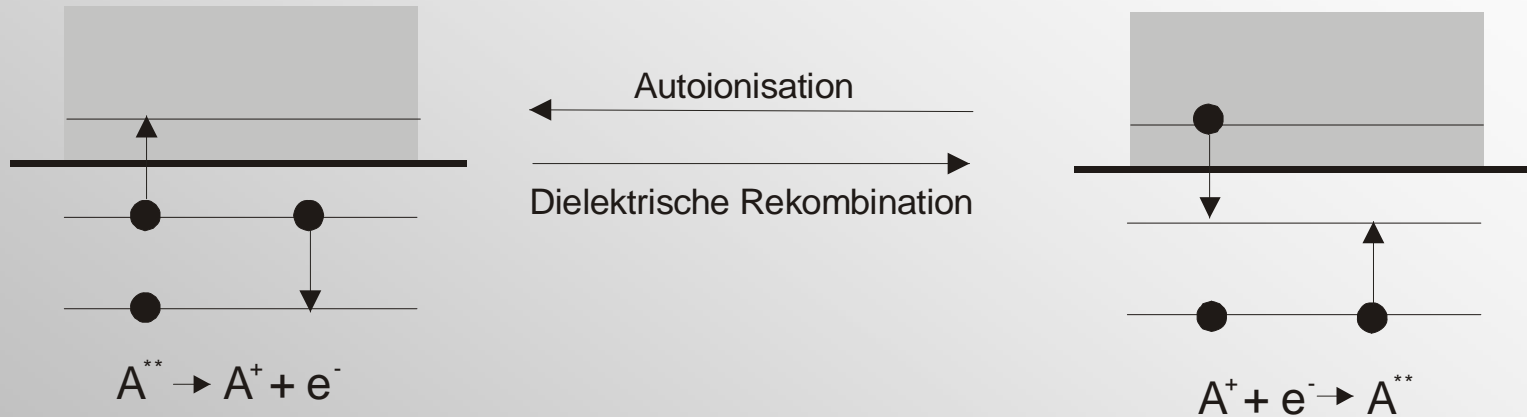


Elektronenstoßionisation
 ← Dreikörper-Rekombination



- Elektronenstoßionisation
 - Es entsteht langsames Elektron und ein positives Ion
 - Erhaltung der Energie: die Energie des getroffenen Atoms nimmt um die Ionisationsenergie W_i ab.
- Da bei der Dreikörper-Rekombination gleichzeitig zwei freie Elektronen anwesend sein müssen, ist sie nur in dichten Plasmen von Bedeutung.

Autoionisation – dielektrische Rekombination



- Wenn mehr als ein Elektron in einem Atom angeregt ist, kann es zur **Autoionisation** kommen, sofern die gesamte Anregungsenergie größer als die Ionisierungsarbeit ist.
- Bei der **dielektrischen Rekombination** wird ein freies Elektron eingefangen und die überschüssige Energie wird zur Anregung eines weiteren Elektrons verwendet. Dieser Prozess verringert die Ionendichte.



Thermische Ionisation

- Schnell bewegte neutrale Teilchen vermögen zu ionisieren
- Neutralgasteilchen: Umladungen in hoch erhitzten Gasen oder Dämpfen
- Thermische Energie der Gasteilchen größer als ihre Ionisationsenergie

$$\frac{2}{3}k.T \geq W_i$$

- Gasentladungstypen: selbstständige und unselbstständige Entladungen → Zweck:
 - Aufrechterhaltung der Gasentladung: Fremdionisation (Einwirkungen von außen) oder keine Fremdionisation; bzw. Dunkel-, Townsend-, Korona-, Glimm-, Bogen-, Funken- und Hochfrequenzentladungen (feinere Unterteilung)
 - Charakterisierung nach den Betriebsbedingungen (Gasdruck, Stromstärke,...)
 - Vorgängen im Inneren der Entladung bzw. der Wandungen



4.2.2 Ionenstrahlerzeugung

- Fokussierenden Einheit: Ionen gebündelt und beschleunigt
- Richtstrahlwert Emissionsstromdichte j_e zum Raumwinkel Ω

$$\Theta = \frac{j_i}{\Omega}$$

- Beschleunigung und Fokussierung erfolgt meist durch elektrostatische und magnetostatische Felder
- Feststoffionenquellen gleichen in der Strahlerzeugung und Fokussierung den Elektronenstrahlsystemen
- Anhand des Langmuirschen Raumladungsgesetzes erkennt man, dass bei gleichen Feldverhältnissen die Ionensättigungsdichte wegen der großen Ionenmasse um etwa zwei Größenordnungen kleiner ist als die der Elektronen.



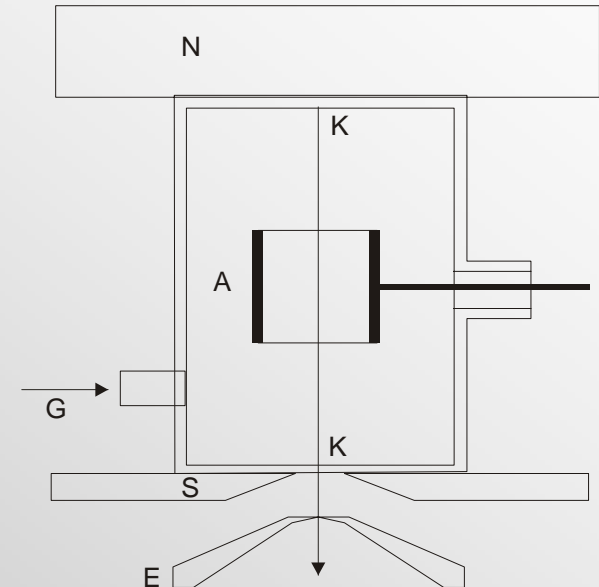
Ionenextraktion

- Oftmals besteht das **Extraktionssystem** aus einer **durchbohrten, negativen „Saugelektrode“**; oder die Ionen werden von einer positiven Gegenelektrode aus der Entladung abgestoßen.
- Wenn die **Ladungsträgerdichte** genügend hoch ist (z. B. selbstständige Entladung), erfolgt der **Aufbau einer positive Raumladungsschicht unmittelbar vor der negativen Saugelektrode**. Die Plasmagrenze (entladungsseitige Grenze der Raumladung) wirkt wie eine ionenemittierende Fläche einer Glühanode.
- Die Saugspannungen können experimentell und theoretisch optimiert werden.
- Danach **elektrische Linse** fokussiert und beschleunigt



4.3 Technische Ausführung von Ionenquellen

- Penning-Ionenquelle
 - Überlagerung von elektrischen und magnetischen Feldern zur Bildung des Plasmas



A: Anode, K: 2 Kathoden,
E: Extraktionselektrode,
G: Gaszufuhr, N: Nordpol, S: Südpol.

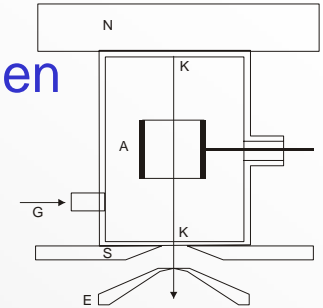
Die Spule und das Magnetjoch zur Erzeugung des axialen Magnetfeldes sind in der Abbildung weggelassen.



- Zwei gegenüberliegenden Kathoden und einer ringförmigen Anode in der Mitte
- Magnetfeld parallel zur Symmetrieachse
- In der Regel ist nur eine der Kathoden eine Glühkathode
- Aus Glühkathode austretenden Elektronen werden durch das elektrische Feld beschleunigt
- Wechselwirkung mit axialen Magnetfeld \rightarrow Elektronen auf kreisförmigen Spiralbahnen
- \rightarrow Erhöhung der effektive Weglänge eines einzelnen Elektrons

- Durch jeden Ionisierungsprozess werden zusätzlich **Sekundärelektronen** freigesetzt, die ebenfalls im elektrischen Feld beschleunigt werden und zur Erhöhung der Elektronenstromdichte beitragen

- Die Gesamtheit der Elektronen pendelt zwischen den beiden Kathoden um das positive Anodenpotential in der Mitte der Quelle hin und her





- Die **Extraktionsöffnung** ist entweder ein **seitlicher Schlitz** im Bereich der Anode **oder** ein **kreisförmiges Loch** in einer der Kathoden.
- **Verwendung:** interne Ionenquelle für **Zyklotron**, wegen des starke axiale Magnetfeldes des Zyklotrons
- **Penning-Ionenquelle** = im englischen **PIG** („Penning Ionisation Gauge“)
- **Typischen Arbeitswerte:**
 - **Druck:** 0,5 – 30 mbar
 - **Magnetfeld:** 0,05 – 1,5 T
 - **Anodenspannung:** 40 – 200 V
 - **Anodenstrom:** 0,5 – 5,0 A
 - **Ionenstrom:** 10 nA – 50 mA



Penning Ion Source



4.3.2 Duoplasmatron-Ionenquelle

(Manfred von Ardenne)

K: Glühkathode

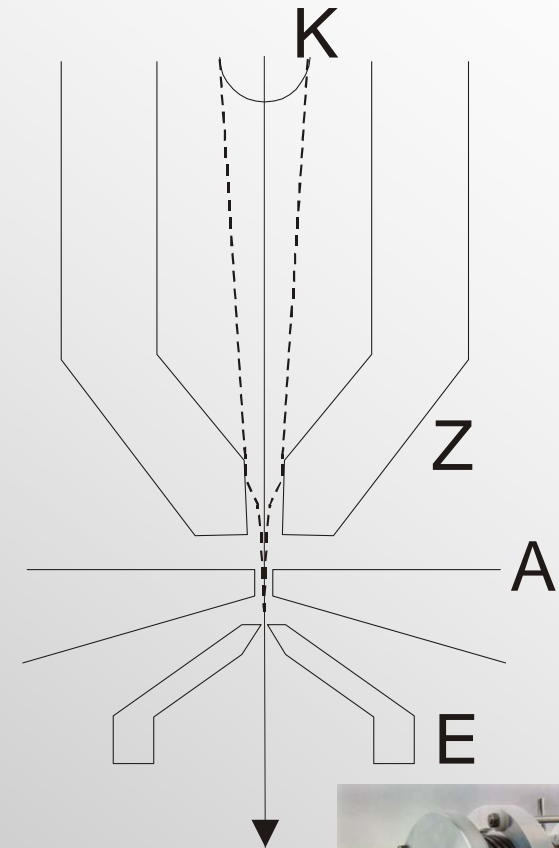
Z: Zwischenelektrode

A: Anode

E: Extraktionselektrode

Durch die **Zwischenelektrode** wird eine **hohe Plasmadichte** an der Extraktionsöffnung der Anode erzeugt.

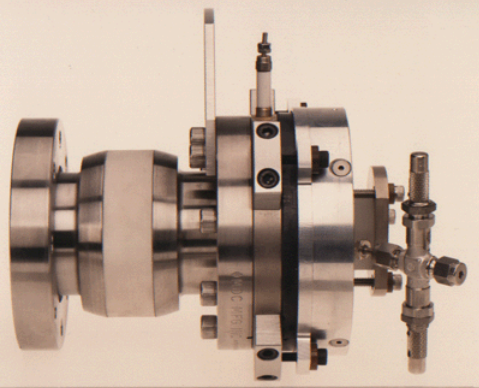
Der Elektromagnet zur Erzeugung des Magnetfeldes zwischen Z und A ist in der Abbildung weggelassen.



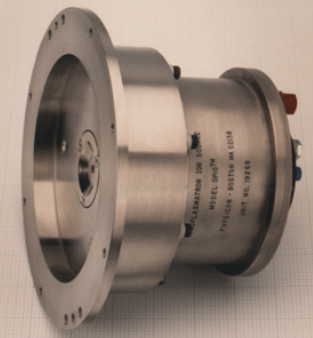
Luftgekühlte einfach
Duoplasmatron-Ionenquelle



Duoplasmatron-Ionenquelle

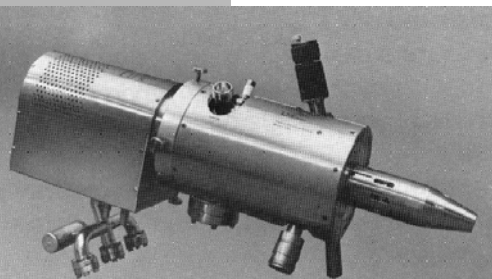
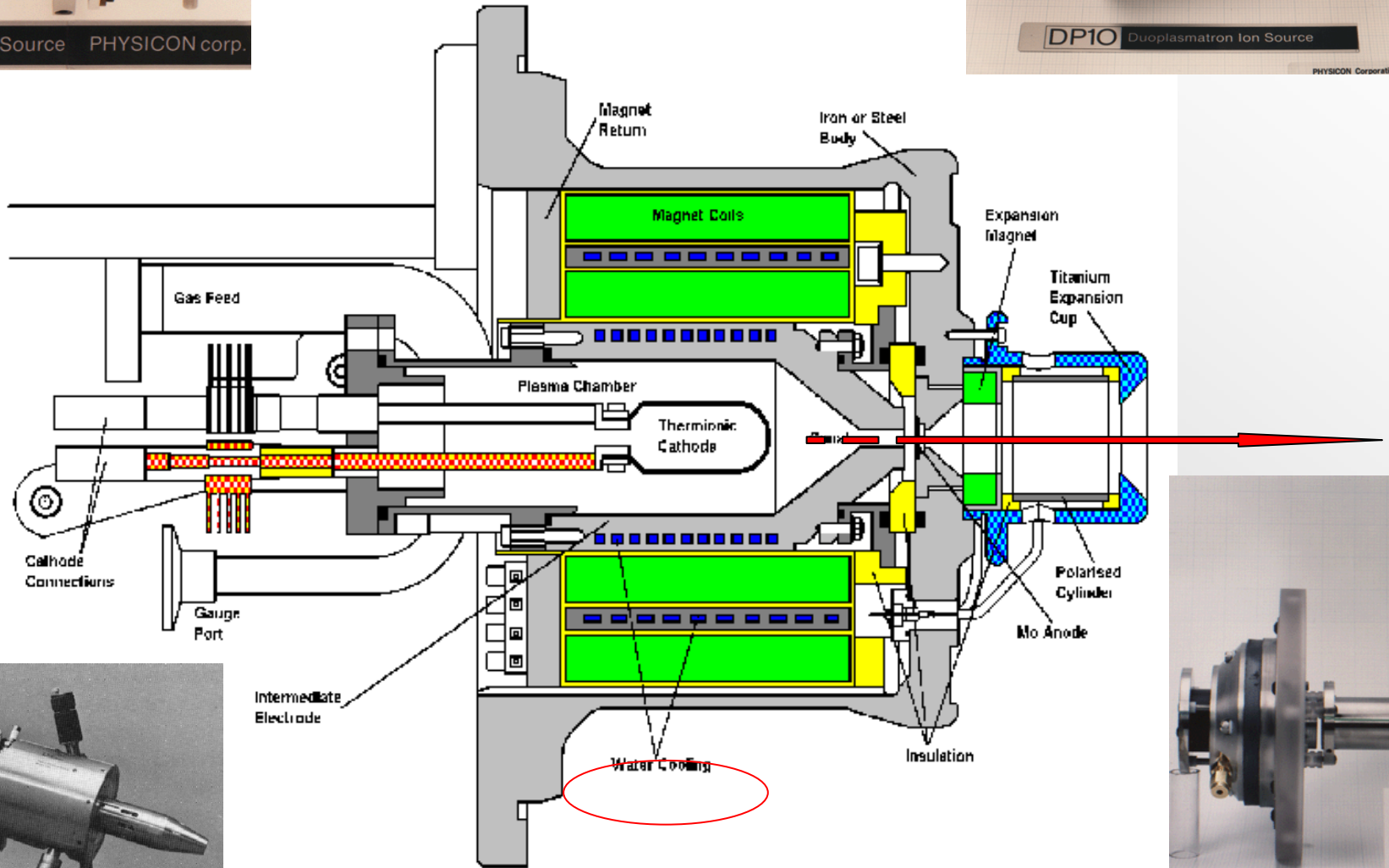


Duoplasmatron Ion Source PHYSICON corp.

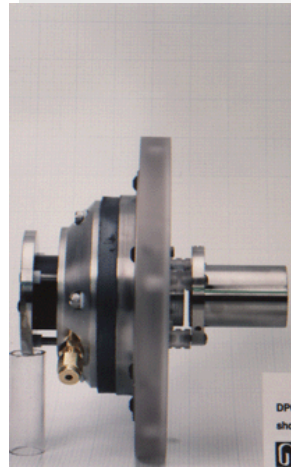


DP10 Duoplasmatron Ion Source

PHYSICON Corporation

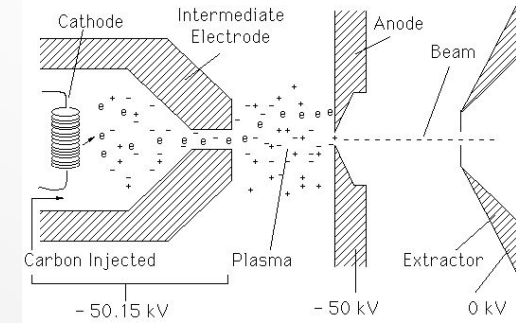


uellen

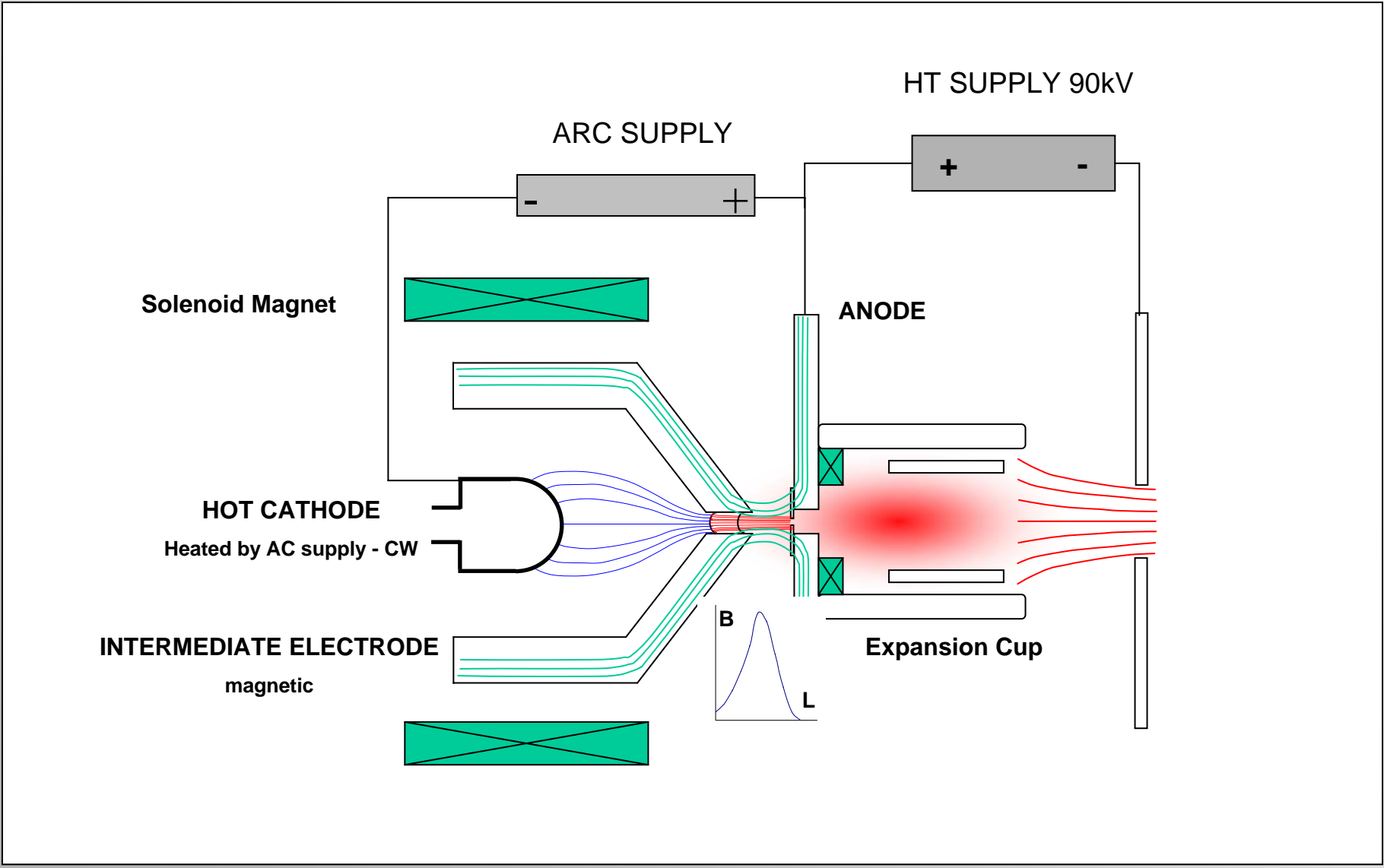


DPQ 10 shown





- Bei der Duoplasmatron-Ionenquelle wird eine **Niedervoltgasentladung** durch eine Zwischenelektrode eingeschnürt
- → Ionendichte in der Nähe der Extraktionsöffnung sehr viel größer als in der Nähe der Kathode
- inhomogenes axiales Magnetfeld zwischen der Zwischenelektrode und der Anode → Erhöhung der Elektronenstromdichte und Plasmadichte
- Wenn man das axiale Magnetfeld abschaltet, wird aus der Duoplasmatron-Ionenquelle eine Unoplasmatron-Ionenquelle.
- Die Vorsilbe „**Duo**“ deutet auf die durch Zwischenelektrode und Magnetfeld hervorgerufene **doppelte Plasmaverdichtung** hin





Betriebsdaten Duoplasmatronionenquelle

- **Typischen Arbeitswerte:**
 - Druck: 15 – 50 mbar
 - Magnetfeld: 0,15 – 0,5 T
 - Anodenspannung: 70 – 200 V
 - Anodenstrom: 0,5 – 5,0 A
 - Ionenstrom: 30 – 1000 mA



4.3.3 HF – Ionenquelle

- Hochfrequenzionenquelle → Produktion von Wasserstoffionen
- Energiezufuhr an Gas (Aufheizen) durch EM Wellen.
- Elektronen schwingen im EM Feld, Stoss mit Gas.
- zum Quellenraum konzentrischen Spule → Erzeugung eines hochfrequenten elektromagnetischen Feldes (25 –30 MHz)
- Extraktionssystem saugt Ionen aus Plasma
 - Extraktionsöffnung: Durchmesser 1 – 2 mm
 - Druck im Gasraum: ~ 1 – 30 mbar
 - HF-Leistung: 60 – 300 W
 - Ionenströme: 0,1 – 1 mA



HF – Ionenquelle

HF: HF-Senderspule (25 – 30 MHz)

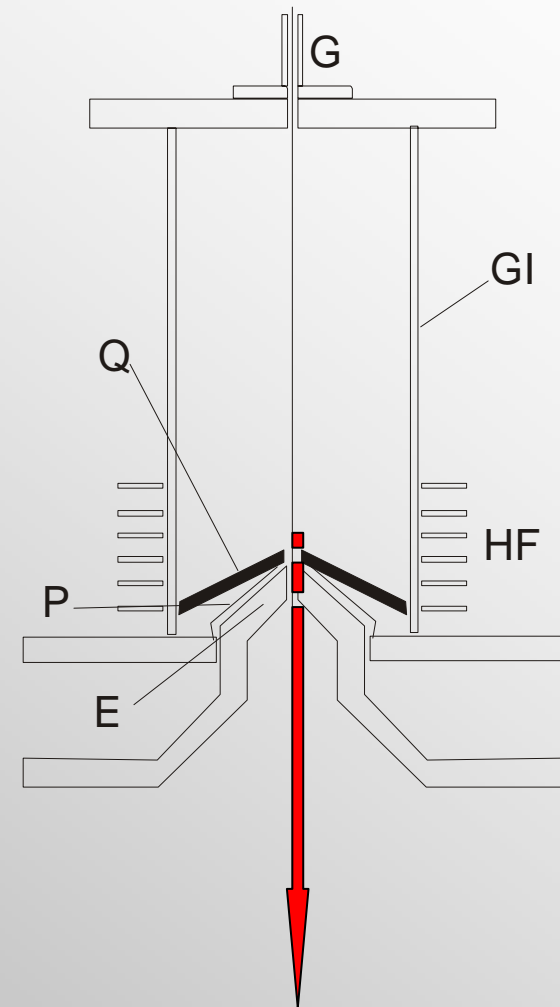
GI: Pyrexglaszylinder

Q: Quarzglasabdeckung

P: Plasmaelektrode

E: Extraktionselektrode

G: Gaszufuhr





4.3.4 ECR – Ionenquelle

- ECR= Electron Cyclotron Resonance zur Produktion hochgeladener Schwerionen
- Idee und erste Prototypen R. Geller / Grenoble
- Zur Ionisierung werden Elektronen mit Hilfe von Mikrowellen unter Ausnutzung der **Elektron-Zyklotron-Resonanz** beschleunigt. Dabei werden Elektronen von dem statischen Magnetfeld der Quelle auf Zyklotronbahnen gehalten.
- Beschleunigung wie in Zyklotron:
 - elektrische Feldkomponenten senkrecht zum lokalen statischen Magnetfeld -> Elektronen auf Kreisbahnen in Plasmakammer



- Die Wellenlänge muss im Vergleich zum Quellenraum klein sein.
- Der Quellenraum wirkt als Resonator, in dem sich viele Elektronschwingungen ausbilden („multimode cavity“).
- Die Elektron-Zyklotron-Resonanz legt in Abhängigkeit vom B-Feld die Frequenz fest:

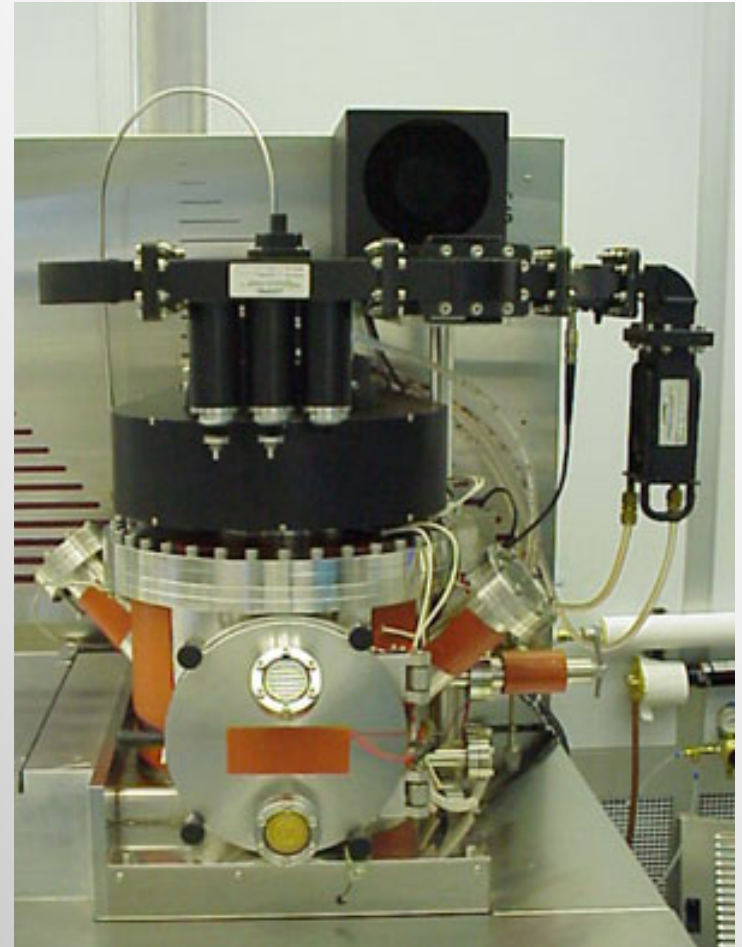
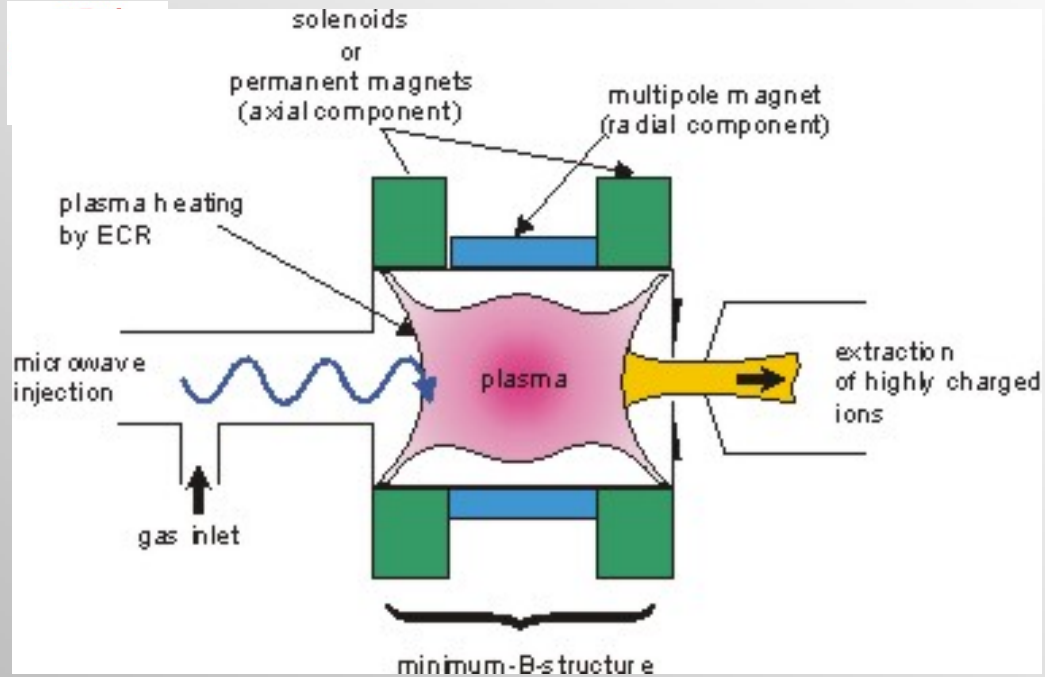
$$mv^2/r = qeB \quad \rightarrow \quad f = \frac{e}{2\pi m} B$$

m Ruhemasse der Elektronen

- Für $f = 5$ GHz erhält man z. B. $B = 0,18$ T.



- Das Plasma (Elektronen und Ionen) wird durch speziell geformte Magnetfelder im Quellenraum eingeschlossen („confinement“)
 - Dadurch kann es zu **vielen Stößen mit Elektronen** kommen und zu höheren Ionisationszuständen (mehrfach positiv geladene Ionen).
- Durch **zwei Spulen wird in longitudinaler Richtung ein axiales Magnetfeld mit einer Mulde erzeugt.**
- In **radialer Richtung** wird der Magnetfeldanstieg durch ein **Sextupolmagnetfeld** erzeugt
- **BSP Mikrowellenleistungen von 100 – 500 W:**
 - $^{16}\text{O}^{6+-}$ und $^{40}\text{Ar}^{10+-}$ -Ionenströme von mehr als 2 μA .
 - bis zu 10 μA für $^{197}\text{Au}^{25+-}$, $^{209}\text{Bi}^{25+-}$ und $^{238}\text{U}^{25+-}$ -Ionen zu erreichen
 - aber auch für die Produktion von Wasserstoffionen und anderen Leichtionen
- **Besonders hohe Strahlqualität, d.h.: kleine Emittanz, hohe Brillanz (Kapitel 4.4) und vor allem hohe Strahlstromstabilität auszeichnen**





4.4 Das Konzept der Emittanz

- Wichtige Gütefaktoren für eine Ionenquelle bzw. für eine Elektronenquelle sind **Emittanz** und **Brillanz**.
- Charakterisierung einer Ionenquelle:
 - maximal erreichbaren Ionenstromdichte
 - Ladungszustandsverteilung
 - Emittanz
 - Brillanz der extrahierten Ionenstrahlen



4.4.1 Emittanz

- Die Emittanz ist ein Maß für die transversale Strahlbündelung
- Ionenstrahl (N Teilchen) charakterisiert durch drei Orts- und drei Impulskoordinaten (kartesisches Koordinatensystem)
- → 6-dimensionalen Phasenraum
- Anstelle der Impulse wird häufig die Winkelverteilung (Divergenz) verwendet. (Nicht kanonisch konjugiert!)
- gesamte Ionenstrahl nimmt also ein bestimmtes Volumen im Phasenraum ein, das nach dem Liouville-Theorem eine Konstante der Bewegung ist

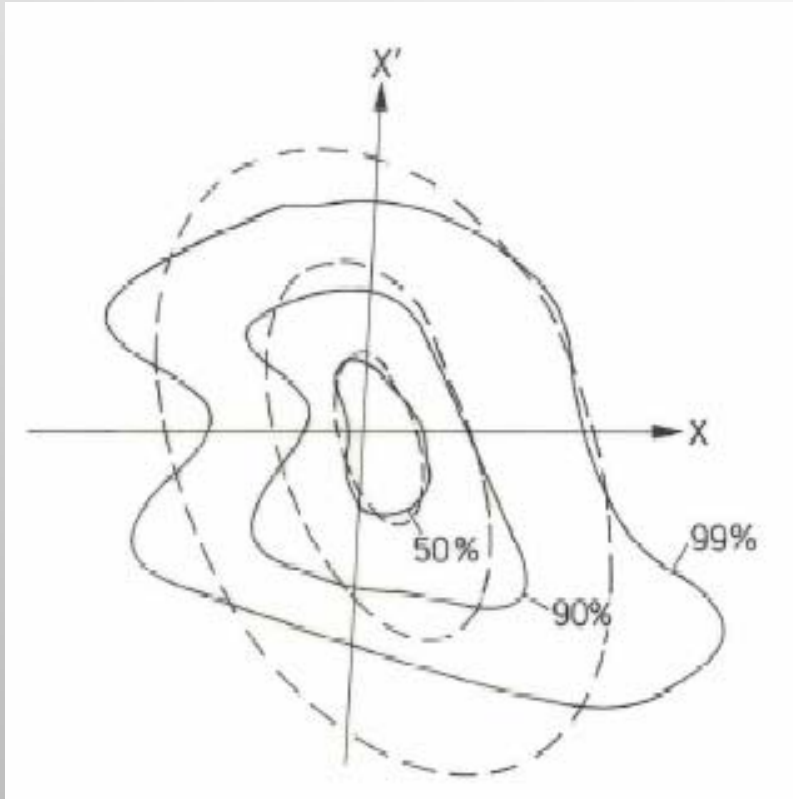


Liouville-Theorem

- Eine Verkleinerung des Strahlenquerschnitts nur auf Kosten einer größeren Strahldivergenz erzielen kann (und umgekehrt).
- Etwas genauer besagt es, dass die Phasenraumdichte ρ entlang jeder Teilchenbahn invariant ist:

$$\frac{d\rho(x, x', t)}{dt} = 0$$

- Grundvoraussetzung für die Gültigkeit des Liouville-Theorems ist in jedem Fall, dass die Wechselwirkung zwischen den Teilchen vernachlässigbar ist.



Emittanzplot

- Linien konstanter Phasenraumdicke sowie Ellipsen (gestrichelt), die einen bestimmten Bruchteil aller Teilchen einschließen
- Zur Vereinfachung ist nur ein zweidimensionaler Phasenraum (d.h. nur eine Ortskoordinate und Winkelkoordinate) dargestellt.



Folge des Liouville-Theorem

- Eine direkte Folge des Liouville-Theorem ist es, dass die Phasenraumfläche, die von einer Linie konstanter Teilchendichte eingeschlossen wird, zeitlich konstant ist, auch wenn sich die Form dieser Begrenzung im Verlauf der Bewegung stark verändern mag
- Wenn die Emittanz als die von einer solchen Linie eingeschlossene Fläche definiert wurde, besagt das Liouville-Theorem also gleichzeitig, dass die Emittanz invariant ist



Einschränkungen

- Annahme: es wirken nur konservative Kräfte auf den Ionenstrahl
 - externe makroskopische elektrische und magnetische Felder sind konservativ
- Für Kräfte, die auf Grund der (internen) Raumladung eines Ionenstrahls entstehen, ist das Liouville-Theorem nicht mehr anwendbar



Emittanz

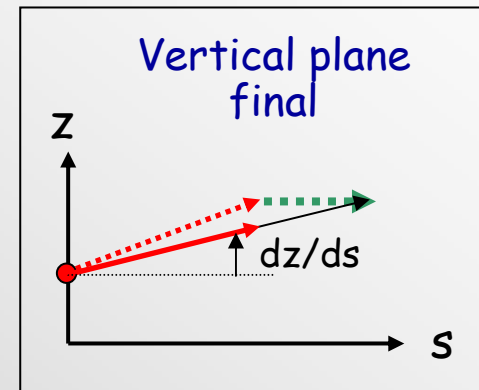
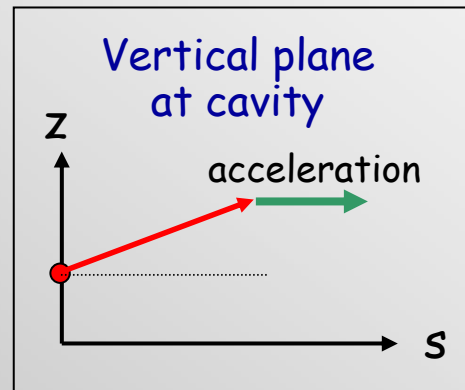
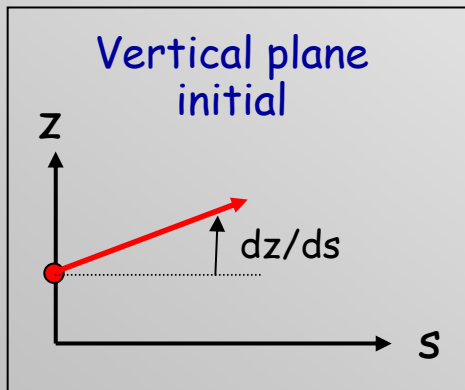
- ε_x (bzw. ε_y) eines Ionenstrahls wird in diesen zweidimensionalen Unterräumen als jene Fläche definiert, die alle durch Punkte repräsentierten Ionen umschließt
- Üblicherweise wird diese Fläche durch π dividiert \rightarrow Einheit: ($\pi.mm.mrad$)
- Für **ideal-zylindersymmetrische** Ionenoptiksysteme sind die Ionenstrahlen um die Ausbreitungsrichtung **rotationssymmetrisch** und es gilt daher

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y \equiv \varepsilon$$

- Im allgemeinen gültig für Quellen, Zyklotron, Linac aber nicht für Synchrotron.

Adiabatische Dämpfung

- Abnahme der Emittanz mit zunehmender Ionenenergie
 - Folge der Koordinatenwahl Winkel anstelle Impuls.



- Der Winkel zwischen Teilchenbahn und Sollbahn nimmt ab, da Beschleunigung in Sollrichtung erfolgt.
- Impuls (relativistischer) wächst an und „Emittanz“ mit Ort und Impulskoordinaten wäre invariant.

$$p(\gamma) = m_0 c (\beta \gamma)$$



Normierte Emittanz

- Zum Vergleich der Emittanzen von Strahlen unterschiedlicher Energie und/oder Ionenmasse → Konzept der „normierten“ Emittanz.
- Die normierte Emittanz ist bezüglich Änderungen von $v(z)$ invariant. Sie wird folgendermaßen definiert:

$$\varepsilon_n = \beta\gamma\varepsilon$$

Uangelegte Extraktionsspannung (kV)
 qIonenladungszustand
 cLichtgeschwindigkeit
 m_iMasse des Ions

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{2qeU}{m_i}}$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)}}$$



- Kleine Emittanzwerte = bessere Strahlqualität
- Für intensive Ionenstrahlen ist es sinnvoll, die Emittanz entlang des Strahlweges an mehreren Abschnitten zu messen.
- Emittanz aufgrund verschiedenster Effekte mit zunehmender Entfernung von der Ionenquelle anwachsen kann
 - Raumladung,
 - nicht optimierter Transfer zwischen Beschleunigern, etc)



4.4.2 Brillanz

- 2. wichtiger Gütefaktor: Brillanz („brilliance“) B manchmal auch als „brightness“ bezeichnet.
- Die Brillanz ist ein Maß für die Phasenraumdichte eines Strahles
- Ermöglicht Vergleich von Ionenquellentypen, die unterschiedliche Ionenstromdichten, da sie die Emittanz einer Ionenquelle mit dem extrahierten Ionenstrom verknüpft (Brown 1989):

$$B \equiv \frac{I}{\varepsilon_x \varepsilon_y} \cong \frac{I}{\varepsilon^2}$$

Einheit

$$\left[\frac{A}{\pi^2 \text{mm}^2 \text{mrad}^2} \right]$$

I ... Ionenstrom



- Definition **normierte Brillanz**:

$$B_n \equiv \frac{I}{\varepsilon_n^2}$$

- **Qualität einer Ionenquelle** ist charakterisiert durch:
 - erreichbaren Ionenstromdichte
 - erreichbaren Ladungszustand
 - Ionenstrahlqualität durch die Parameter:
 - normierten Emittanz
 - normierten Brillanz