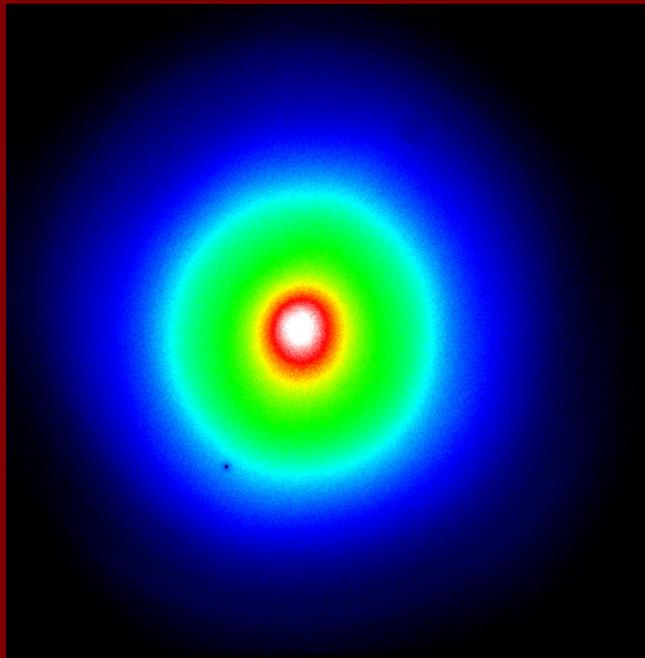


Ionenstrahltransport mit Raumladungslinsen

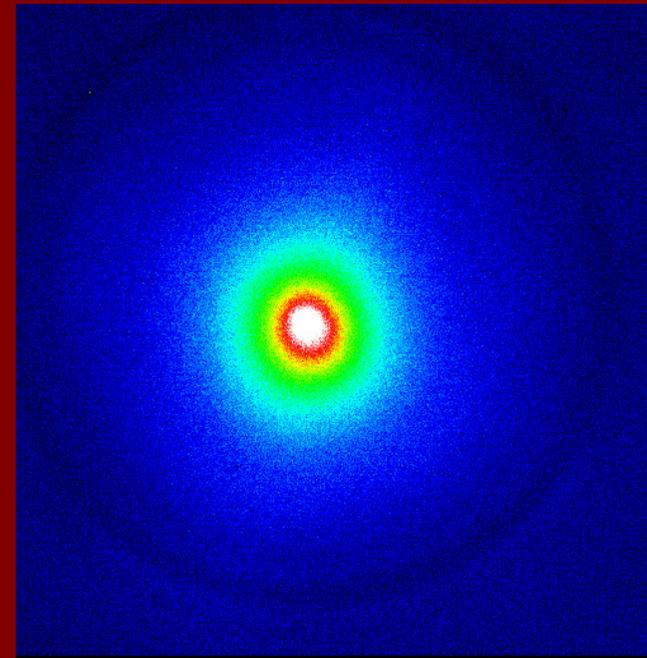
Oliver Meusel

Nichtneutrales Plasma für die Ionenstrahlfokussierung

Restgasleuchten angeregt durch die eingeschlossene Raumladungswolke



Eingeschlossene Elektronen-wolke

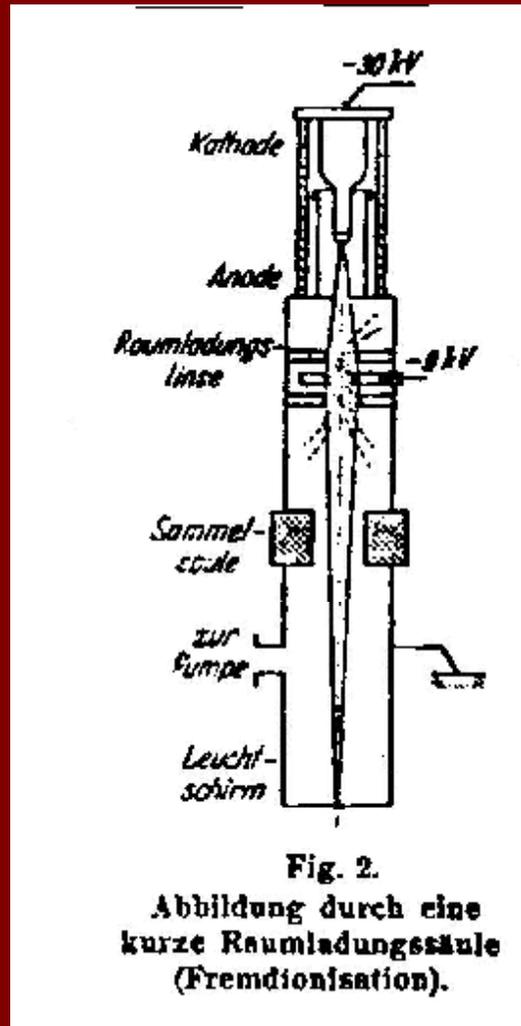


Eingeschlossene Protonen-wolke

Übersicht

- Konzept der Gabor-Linse, ein Historischer Überblick
- Theoretische und numerische Aspekte des Plasmaeinschlusses
- Untersuchung der eingeschlossenen Raumladungswolke
- Strahltransportexperimente mit einem RFQ-Beschleuniger

Historischer Überblick



[Vorläufige Mitteilung¹⁾ aus dem Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Berlin²⁾.]

Das kurze Raumladungsfeld einer Hilfsentladung als Sammellinse für Kathodenstrahlen.

Von Bodo von Borries und Ernst Ruska in Berlin.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 22. April 1932.)

Fokussierung eines Elektronenstrahles mit einem Gasentladungsplasma

Experimenteller Aufbau

Historischer Überblick

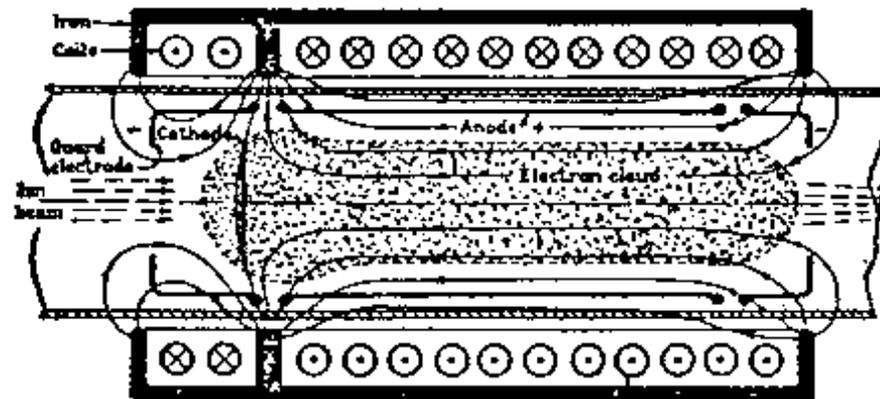
No. 405E July 19, 1947

NATURE

89

A Space-Charge Lens for the Focusing of Ion Beams

SOME time ago I proposed a magnetron of special design as a divergent lens for electron beams¹. It now appears that the same device may become useful as a very powerful concentrating lens for positive ions, particularly for ion beams of extreme energy.



MAGNETRON LENS FOR ION BEAMS



Dennis Gabor
(1900-1979)

Electrical & Electronic
Engineering Department,
Imperial College London

Raumladungslinse mit stabil eingeschlossener
Elektronenwolke

Historischer Überblick

IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-26, No. 3, June 1979

PROGRESS IN SPACE CHARGE LENS DEVELOPMENT*

H. W. Lefevre

Physics Department, University of Oregon, Eugene, Oregon 97403

Rex Booth

Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, California 94550

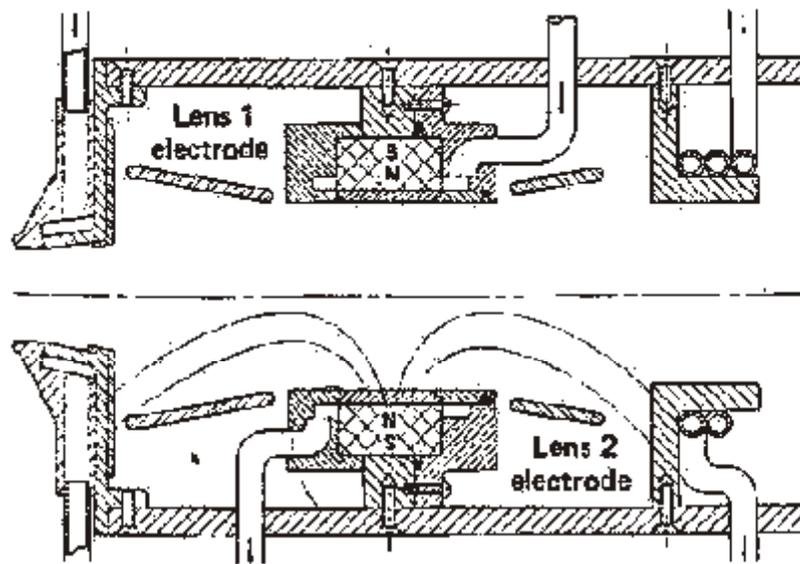


Fig. 1. The LLL permanent magnet lens. Overall length is approximately 18 cm.

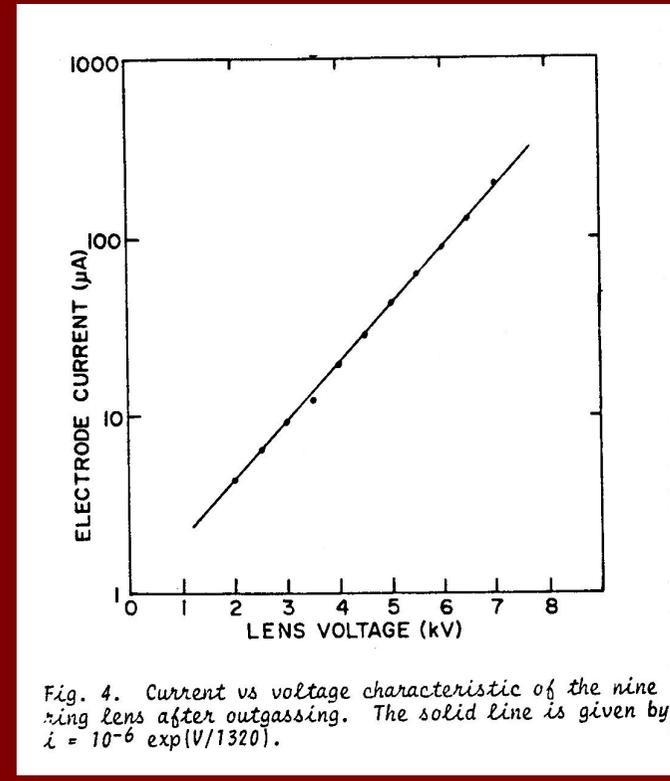


Fig. 4. Current vs voltage characteristic of the nine ring lens after outgassing. The solid line is given by $i = 10^{-6} \exp(V/1320)$.

Analyse der Verlustströme

Erste Strahltransportexperimente mit Gabor-Linsen

Historischer Überblick

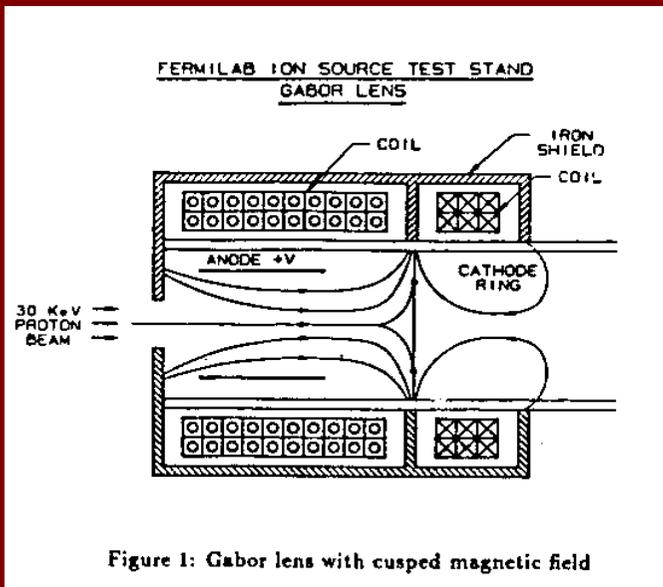
MEASUREMENTS ON A GABOR LENS FOR NEUTRALIZING AND FOCUSING A 30 KEV PROTON BEAM

J.A.Palkovic*

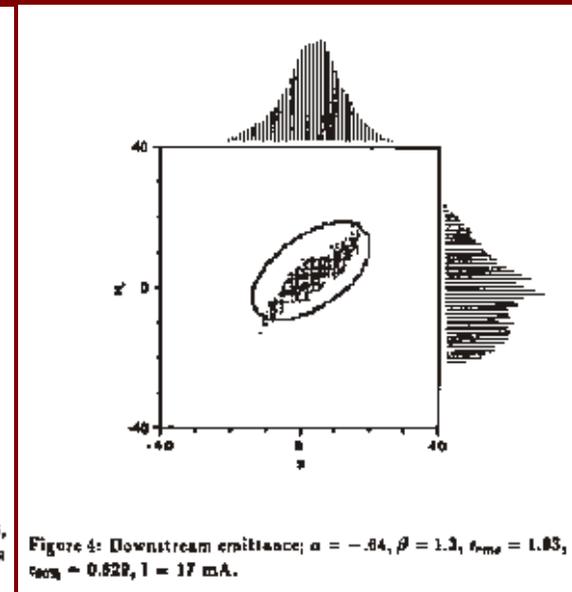
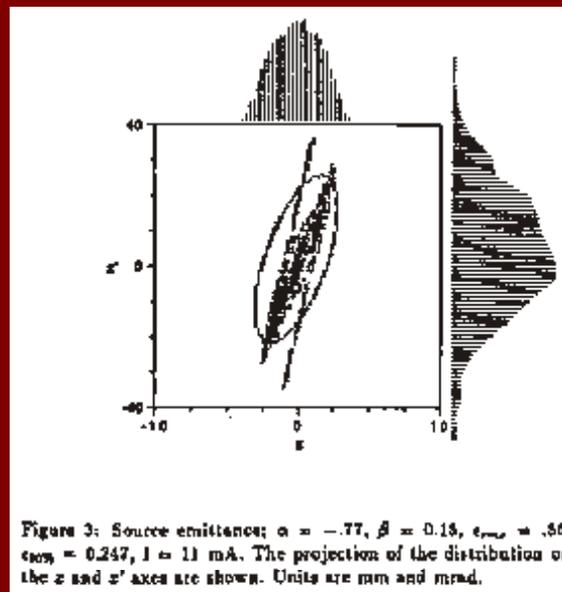
University of Wisconsin, Madison

R.Hren, G. Lee, F.E.Mills, C.W. Schmidt, J.Wendt, D.E.Young

Fermi National Accelerator Laboratory†



Mit dem ursprünglichen Layout vergleichbare Gabor-Linse

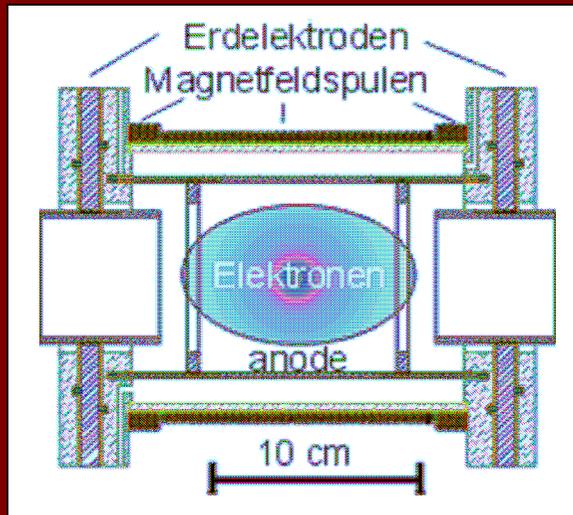


Strahltransportmessungen, Abbildungseigenschaften der Linse

Historischer Überblick

Entwicklung von Gabor-Linsen am IAP-Frankfurt

1990

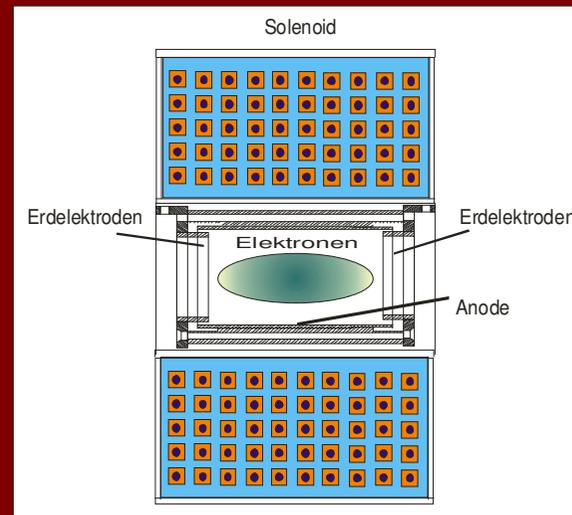


Prototyp ohne externe
Elektronenquelle

$$\Phi_{A,\max} = 6 \text{ kV}$$

$$B_{z,\max} = 350 \text{ G}$$

1997

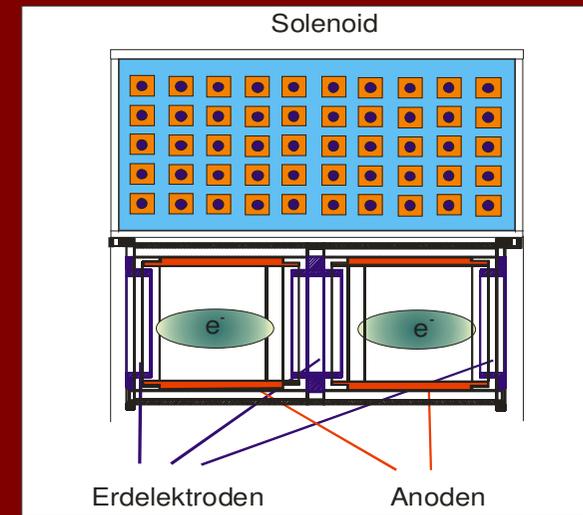


Gabor-Linseneinsätze für
Solenoid

$$\Phi_{A,\max} = 6 \text{ kV}$$

$$B_{z,\max} = 7 \text{ kG}$$

2000



Gabor-Doppellinse im
vorhandenen Solenoid

$$\Phi_{A,\max} = 6 \text{ kV}$$

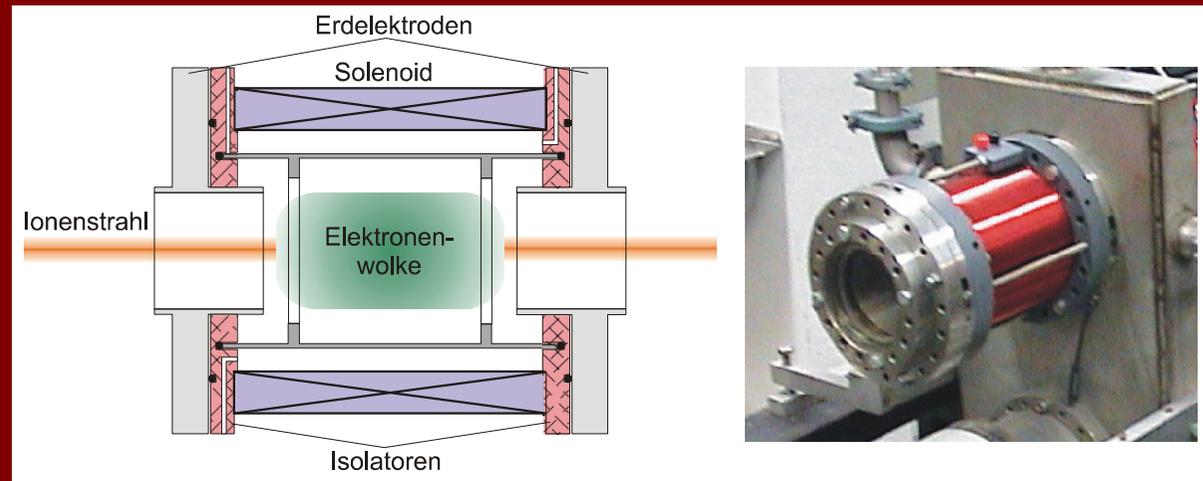
$$B_{z,\max} = 7 \text{ kG}$$

Gabor-Linse für niedrige Strahlenergien (40 keV)

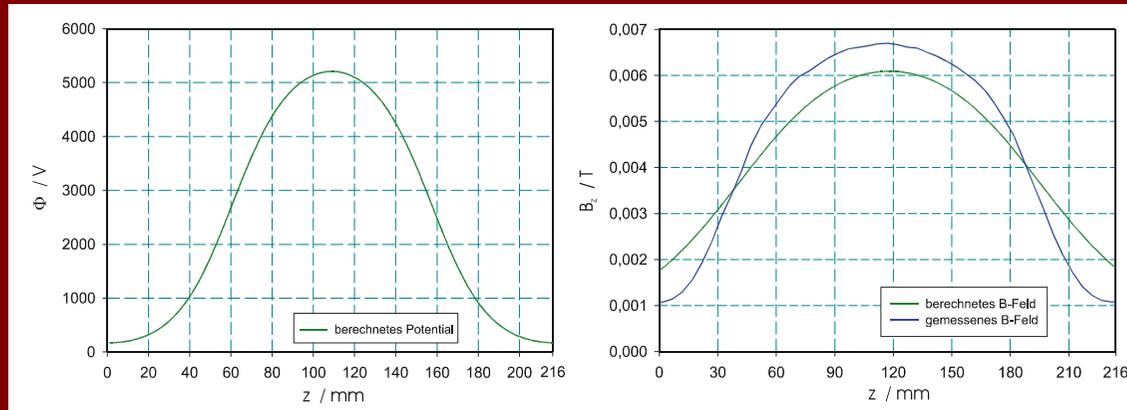
Linsenparameter:

$$\Phi_{A,\max} = 8,5 \text{ kV}$$

$$B_{z,\max} = 480 \text{ G}$$



Aufbau der verwendeten Linse



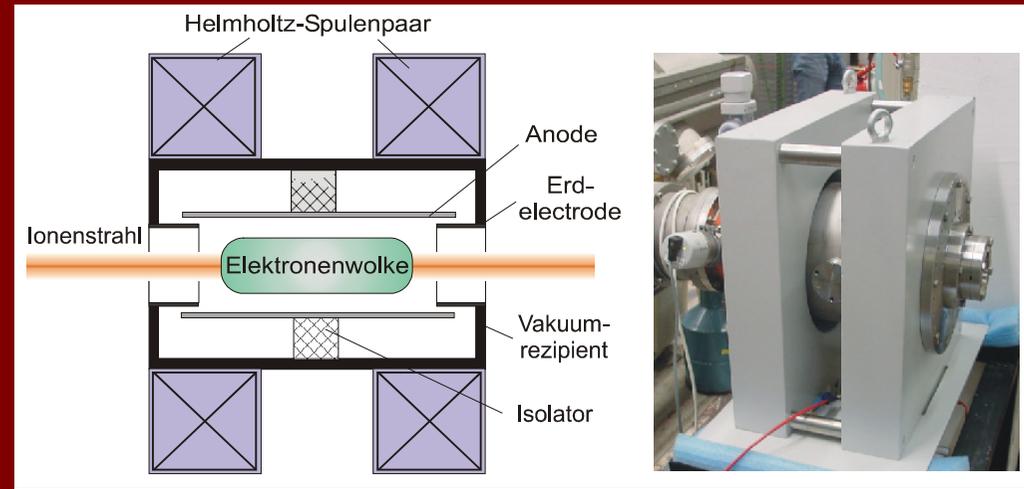
Potential- und Magnetfeldverteilung auf der Achse der Linse

Gabor-Linse für mittlere Strahlenergien (500 keV)

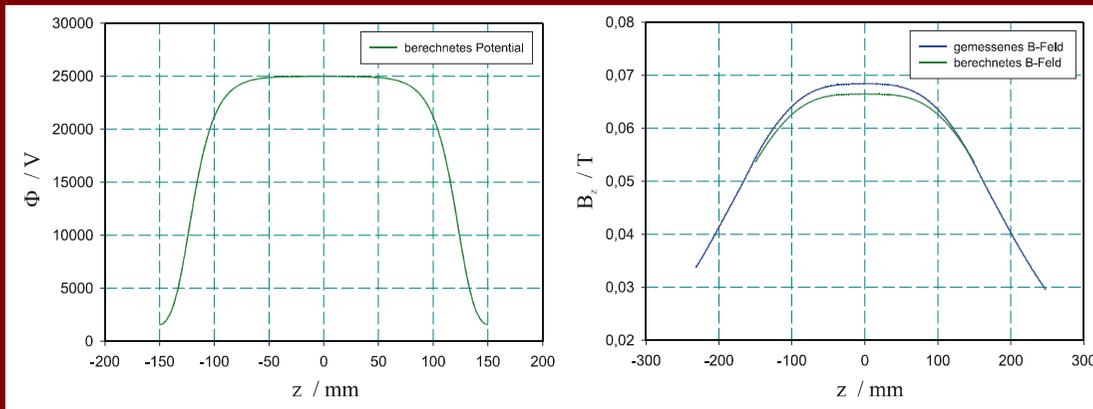
Linienparameter:

$$\Phi_{A,\max} = 65 \text{ kV}$$

$$B_{z,\max} = 2,2 \text{ kG}$$



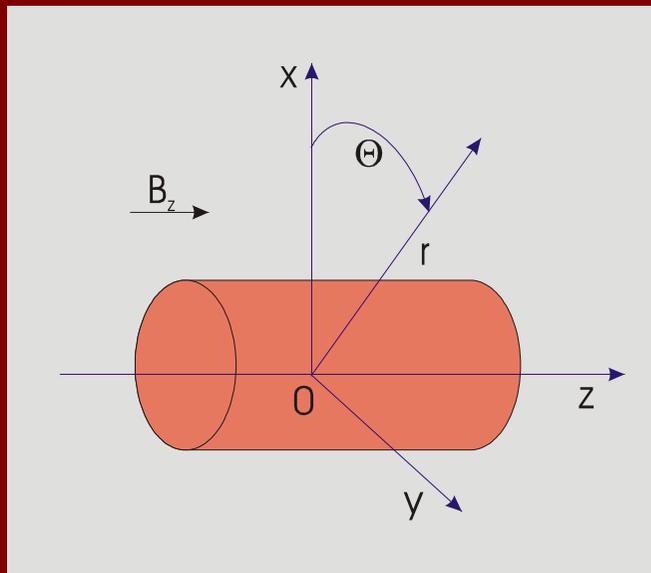
Hochfeld-Gabor-Linse (HGL)



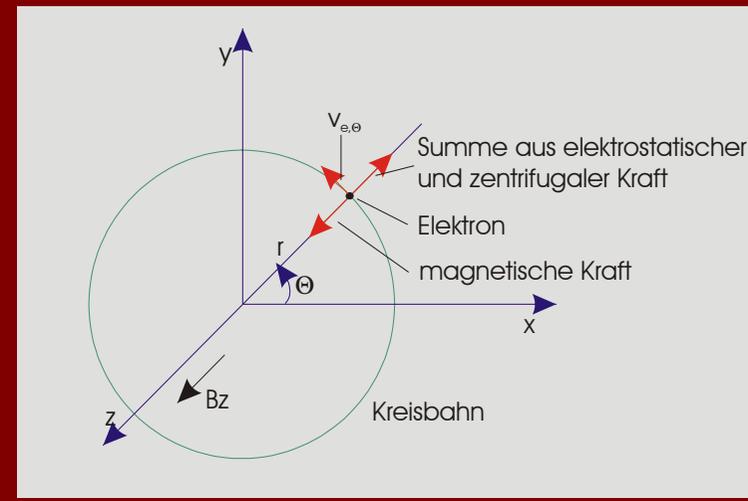
Potential- und Magnetfeldverteilung auf der Achse der Linse

Radialer Einschluss

Kräftegleichgewicht in einem radial eingeschlossenen, kalten NNP



Zylindrische homogene Elektronendichteverteilung eingebettet in ein uniformes axiales magnetisches Feld



Radiales Kräftegleichgewicht für einen achsenzentrierten Elektronen-orbit

Radialer Einschluss

Kräftegleichgewichts-Gleichung

$$\frac{-m_e v_{e,\Theta}^2}{r} = -eE_r - ev_{e,\Theta} B_z$$

E_r ist durch die Poisson-Gleichung bestimmt:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r E_r = \frac{en_e(r)}{\epsilon_0}$$

nach Integration für $0 < r < R_p$ folgt:

$$E_r = \frac{1}{2\epsilon_0} en_e r$$

$$-\omega_e^2 = \frac{\omega_{pe}^2}{2} - \omega_e \Omega_e$$

Einführung

$$\omega_e = \frac{v_{e,\Theta}}{r} \quad \text{Winkelgeschwindigkeit}$$

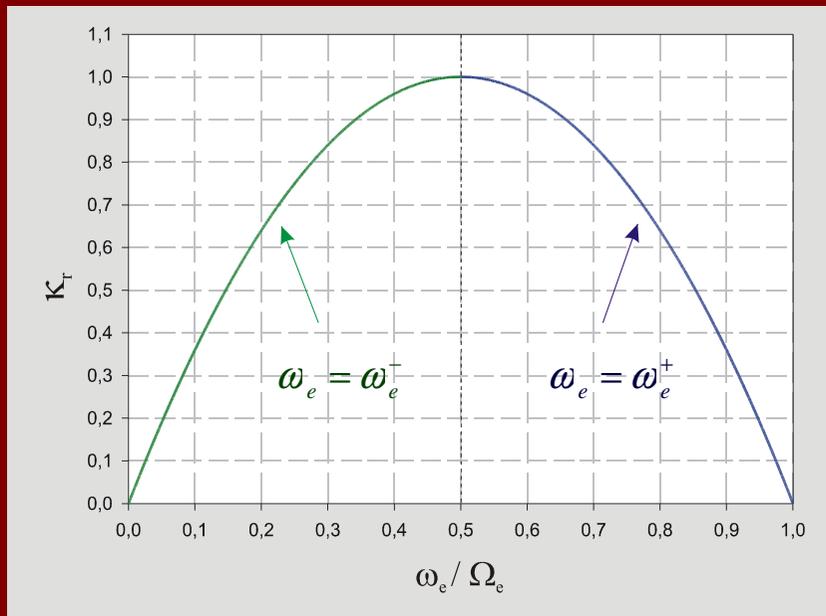
$$\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \quad \text{Plasma-Frequenz}$$

$$\Omega_e = \frac{e B_z}{m_e} \quad \text{Zyklotron-Frequenz}$$

Radialer Einschluss

Lösungen für ω_e

$$\omega_e = \omega_e^\pm = \frac{\Omega_e}{2} \left[1 \pm \left(1 - \frac{2\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$



Zwei Lösungen der Winkelgeschwindigkeit

Einschlusseffizienz

$$K_r = \frac{2\omega_{pe}^2}{\Omega_e^2}$$

hohe Dichten

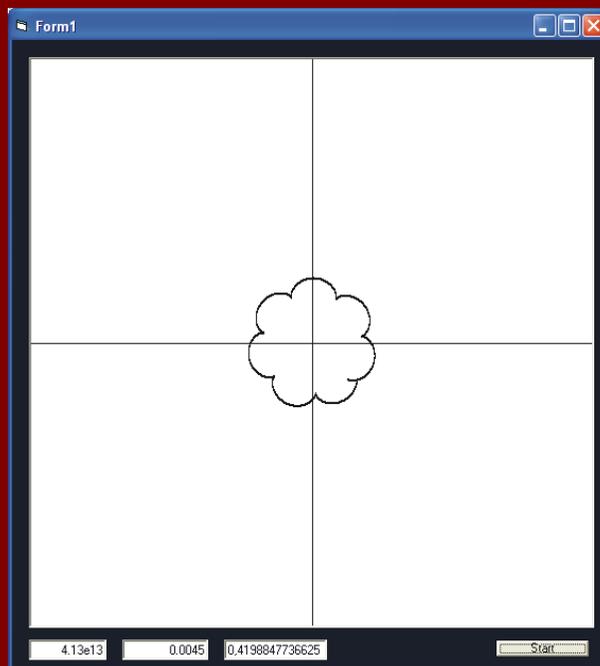
$$K_r = 1$$
$$\omega_e^- = \omega_e^+ = \frac{\Omega_e}{2}$$

niedrige Dichten

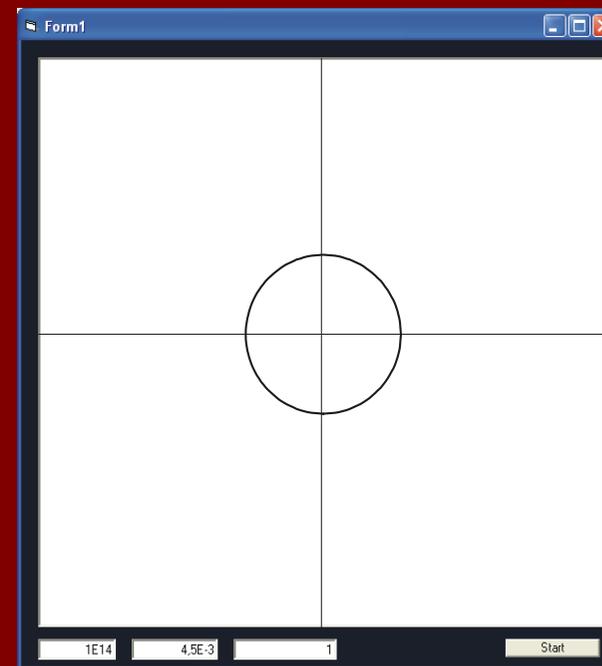
$$K_r \ll 1$$
$$\omega_e^- \cong \frac{\omega_{pe}^2}{2\Omega} = \frac{E_r}{rB_z} ; \omega_e^+ = \Omega_e$$

Radialer Einschluss

Trajektorie eines Elektrons für
verschiedene Füllgrade



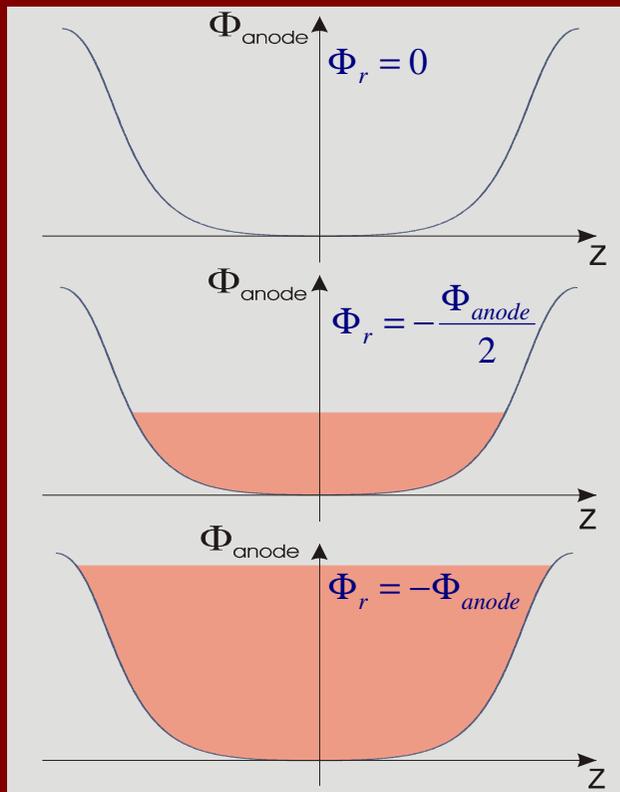
Füllgrad $\kappa = 42\%$



Füllgrad $\kappa = 100\%$

Longitudinaler Einschluss

Potentialdepression durch ein longitudinal eingeschlossenes, kaltes NNP



Potentialdepression durch den Einschluss von Elektronen

Φ_r ist durch die Poisson-Gleichung bestimmt:

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi_r}{\partial r} - \frac{\partial^2 \Phi_r}{\partial r^2} = \frac{en_e(r)}{\epsilon_0}$$

Integration für $0 < r < R_p$

$$\Phi_r = -\frac{en_e r^2}{4\epsilon_0}$$

für eine vollständige potential depression $\Phi_r = -\Phi_{anode}$

$$\Phi_{anode} = \frac{en_e r^2}{4\epsilon_0}$$

Einschlusseffizienz

$$\kappa_l = \frac{\Phi_r}{\Phi_{anode}}$$

Numerische Simulation des Plasmaeinschlusses

radialer Einschluss

radiale Einschlusseffizienz

$$\kappa_r = \frac{\omega_{pe, \text{numerik}}}{\omega_{pe, \text{theory}}}$$

- $\omega_{pe,r} \leq \omega_{pe,l} \quad \forall B_z; \Phi = \text{const.}$
- $E_r \leq E_{B_z} - E_{\text{Laplace}}$
- Diffusion über Feldlinien hinweg

longitudinaler Einschluss

longitudinale Einschlusseffizienz

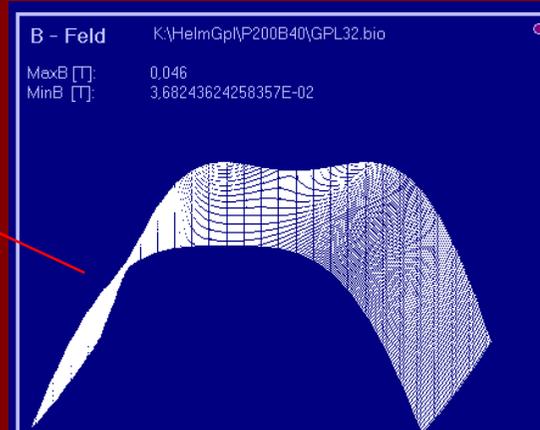
$$\kappa_l = \frac{\omega_{pe, \text{numerik}}}{\omega_{pe, \text{theory}}}$$

- $\omega_{pe,l} \leq \omega_{pe,r} \quad \forall \Phi_A; B_z = \text{const.}$
- Einfluss der Elektrodengeometrie auf ω_{pe}
- Elektronenverluste in Abhängigkeit von T_e

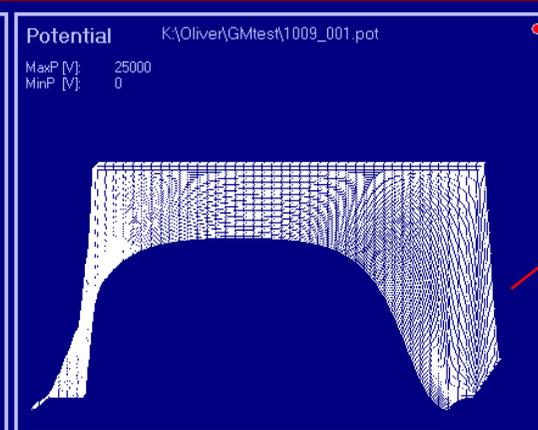
Numerische Simulation des Plasmaeinschlusses

Feldverteilung auf einem numerischen 2D-Gitter

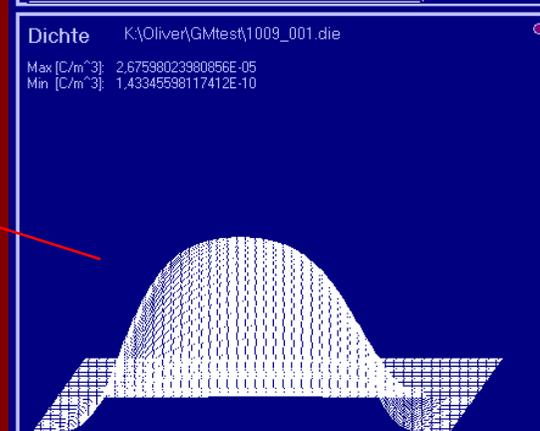
Verteilung des
magnetischen
Feldes



Potential-
verteilung



berechnete
Teilchendichte-
verteilung



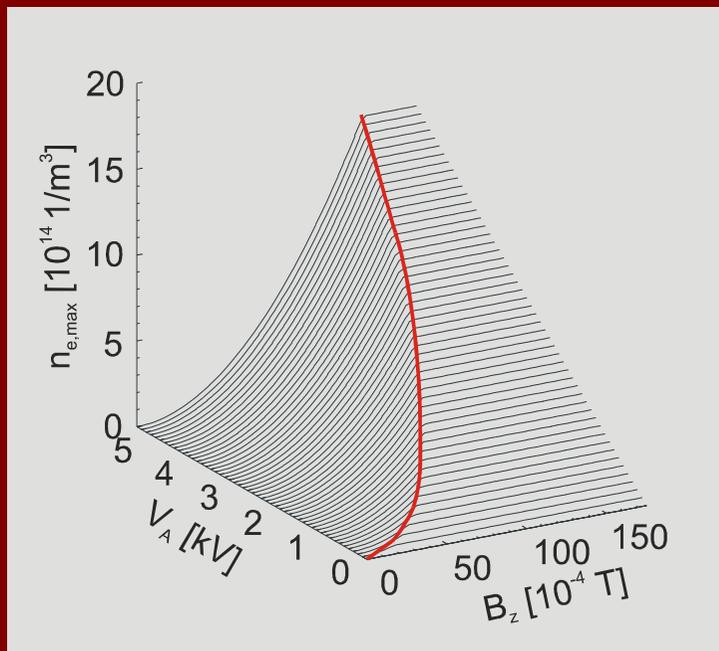
Geometrie des
Elektroden-
systems



Darstellung der Benutzeroberfläche des Simulations-
programms

Numerische Simulation des Plasmaeinschlusses

radialer Einschluss unter
Berücksichtigung des longitudinalen
Einschlusses



Elektronendichte als Funktion von B_z und V_a

$$\omega_{pe} = \omega_{pe,r} = \omega_{pe,l}$$

mit

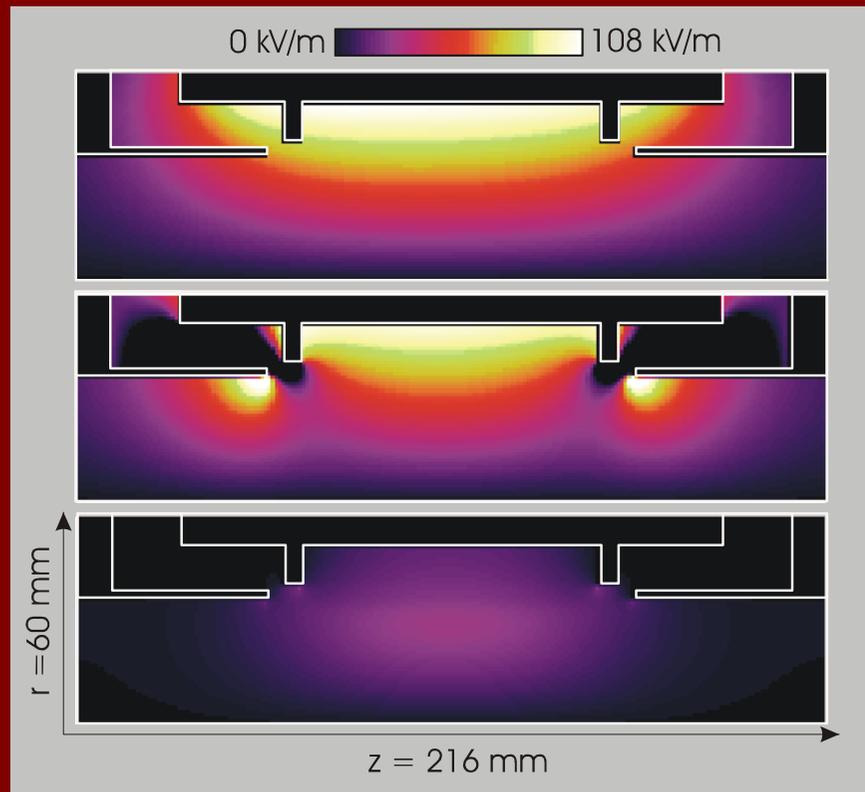
$$V_A = \omega_{pe,l}^2 \cdot \frac{er_A^2}{4m_e} \quad \text{und} \quad B_z^2 = \omega_{pe,r}^2 \cdot \left(\frac{2m_e}{e} \right)^2$$

$$V_A = \frac{er_A^2}{8m_e} \cdot B_z^2$$

$$\omega_{pe,r} \leq \omega_{pe,l} \quad \forall B_z; V_A = \text{konst.}$$

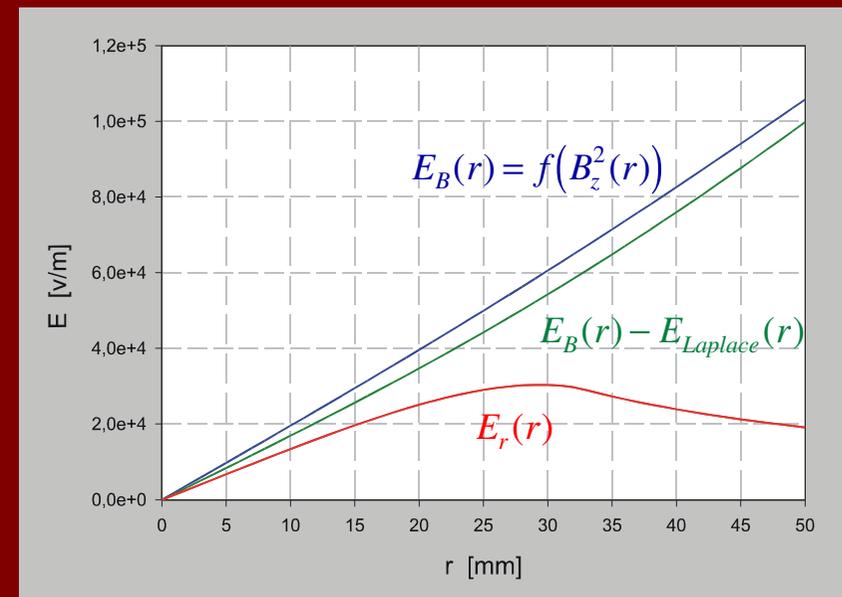
Numerische Simulation des Plasmaeinschlusses

Einfluss der externen elektromagnetischen Felder auf den radialen Elektroneneinschluss



Elektrisches Feld als Funktion von r und z im Inneren der Gabor-Linse

$$E_r \leq E_{B_z} - E_{Laplace}$$

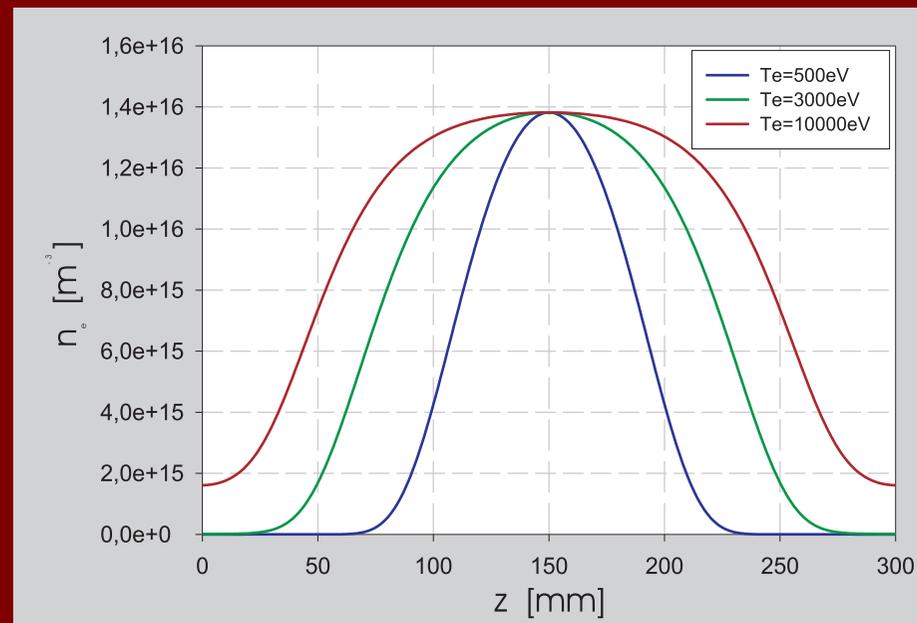


Elektrisches Feld als Funktion von r für $z = 108 \text{ mm}$

Numerische Simulation

Longitudinale Elektronenverluste als Funktion
der Plasmatemperatur T_e

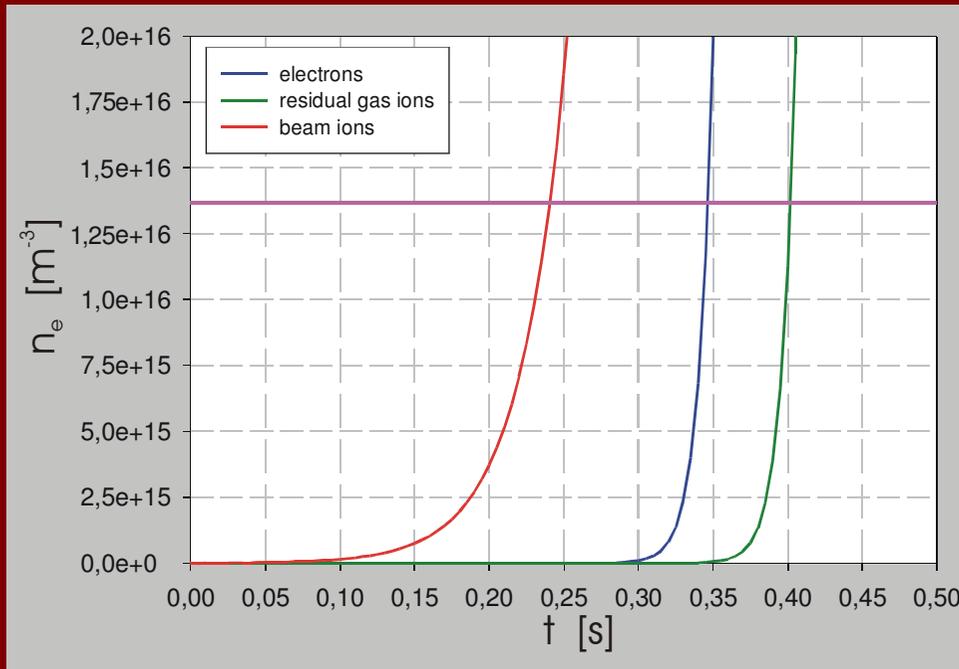
$$\rho_e(z, r = \text{const}) = \rho_e(z = \Phi_{\max}, r = \text{const}) \cdot \exp\left[-\frac{e\Delta\Phi(z, r = \text{const})}{k_b \cdot T_e}\right]$$



Elektronendichteverteilung im Potential $\Phi_A(z)$ für
verschiedene Elektronentemperaturen

Produktion des NNP

Produktionsmechanismen für die Linsenelektronen



$\gamma + RGA \rightarrow RGI + e^- + \gamma'$	Production:	$1 E6 m^{-3}s^{-1}$
$e^- + RGA \rightarrow RGI + 2e^-$	$3,8 E-21 m^2$	$e^- U = 100 eV$
$RGI + RGA \rightarrow 2RGI + e^-$	$2 E-21 m^2$	$He^+ U = 3 keV$
$BI + RGA \rightarrow BI + RGI + e^-$	$8 E-21 m^2$	$He^+ U = 10 keV$

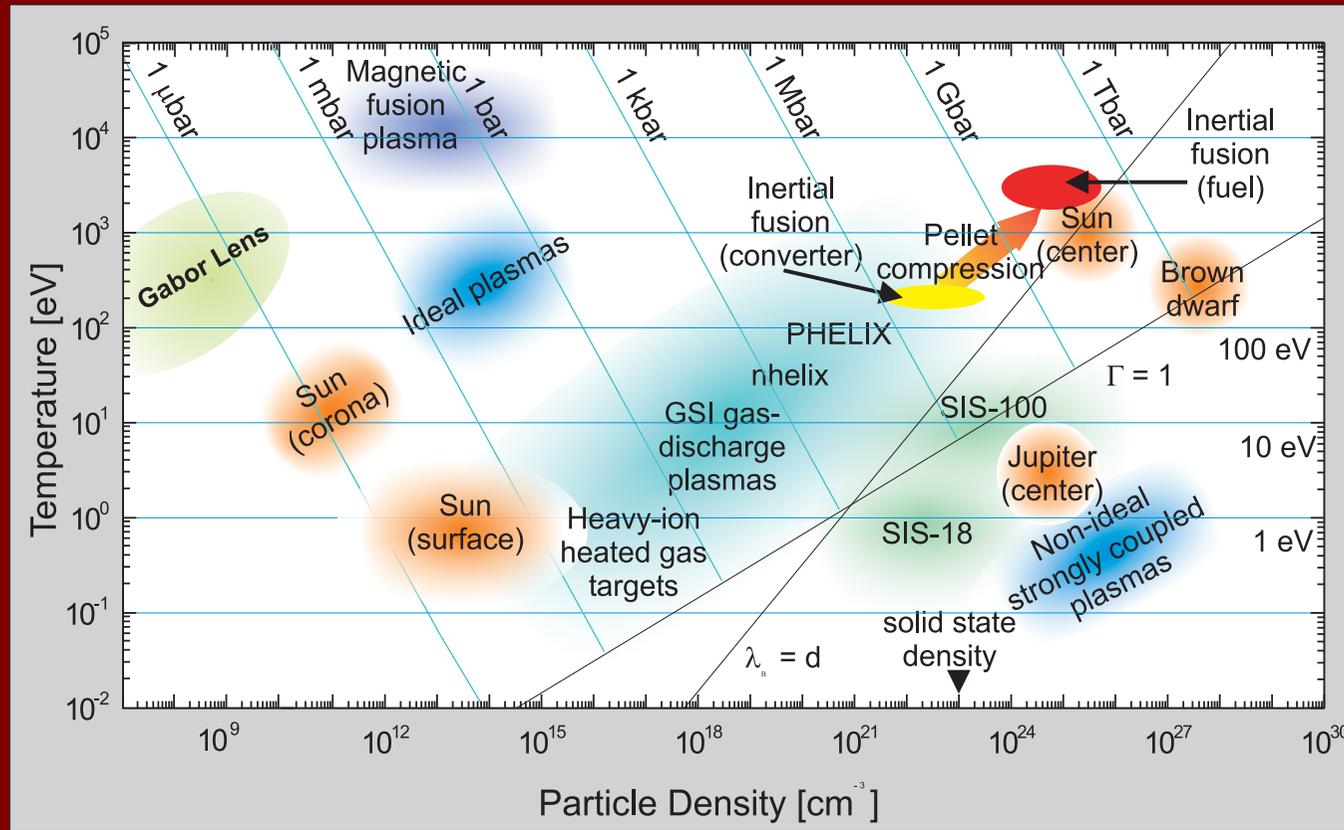
Linsenparameter:

- $B_z = 0,046T$
- $\Phi_A = 25 kV$
- $p = 2e-7 mbar$ Helium

Elektronendichte als Funktion der Zeit für verschiedene Produktionsmechanismen

Eigenschaften des NNP

Vergleich mit anderen Plasmen



Linsenparameter:

- $B_z = 0,046T$
- $\Phi_A = 25 \text{ kV}$
- $\kappa_T = \kappa_I = 0,4$

Plasmaparameter:

- $T_e = 2350 \text{ eV}$
- $n_e = 5,53E9 \text{ cm}^{-3}$

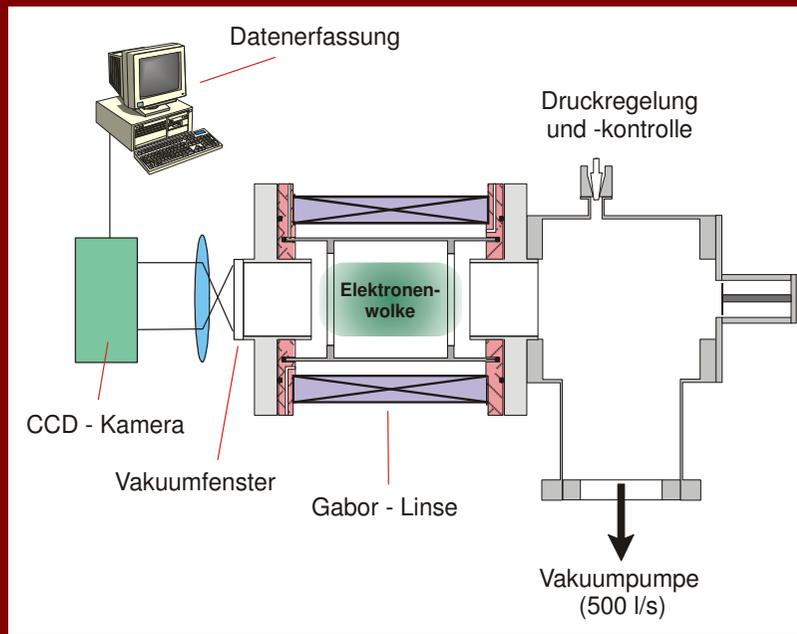
Plasmadiagramm mit dem in einer Gabor-Linse einmgschlossenen NNP

Untersuchung des nichtneutralen Plasmas

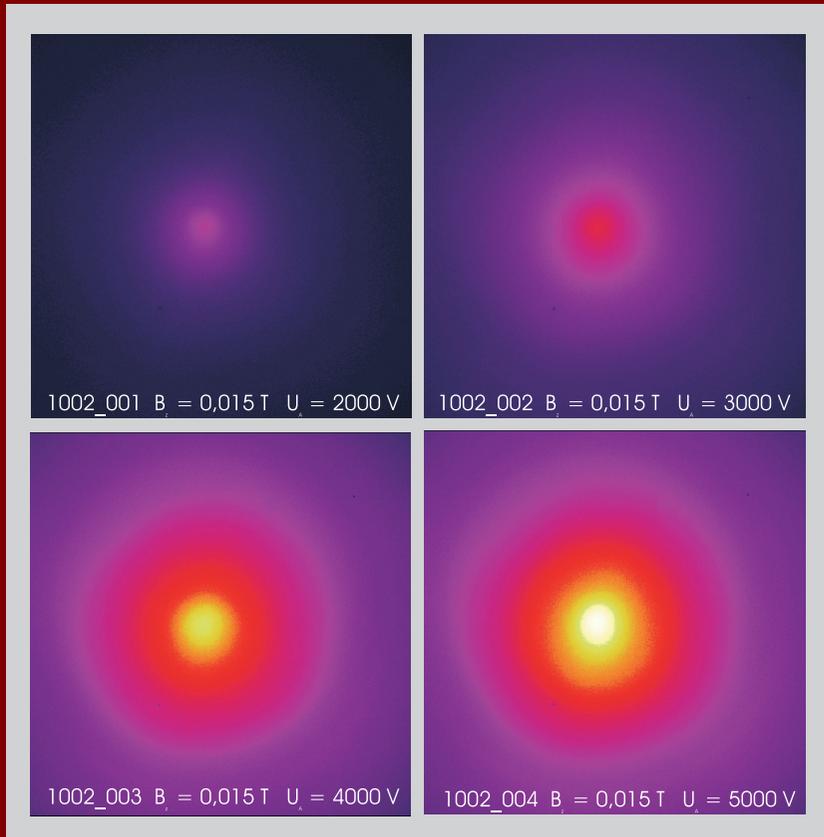
einige Methoden für die Diagnostik der Plasmaparameter

- optische Methoden
 - LASER
 - Restgasleuchten
- HF-Sonde
- Energiespektroskopie der Verlustelektronen
und Restgasionen
- Ionenstrahltransport

Untersuchung des Restgasleuchtens



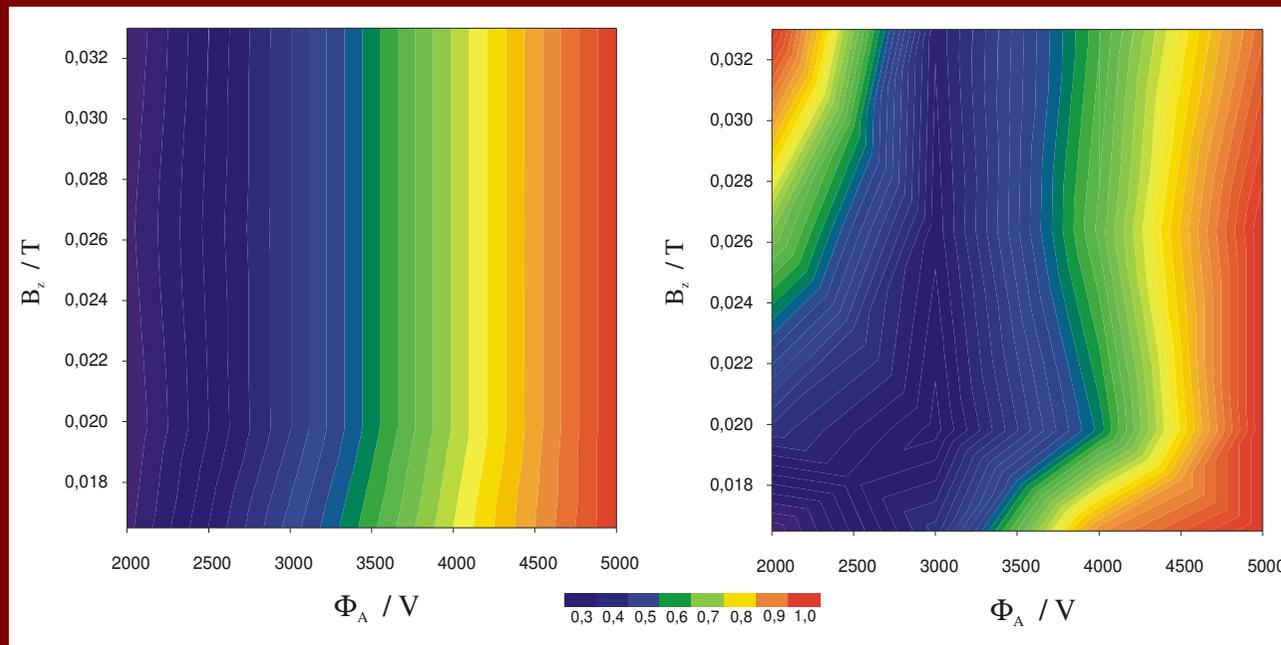
experimenteller Aufbau



Messung der Leuchtdichte als Funktion des Anodenpotentials V_A

Untersuchung des Restgasleuchtens

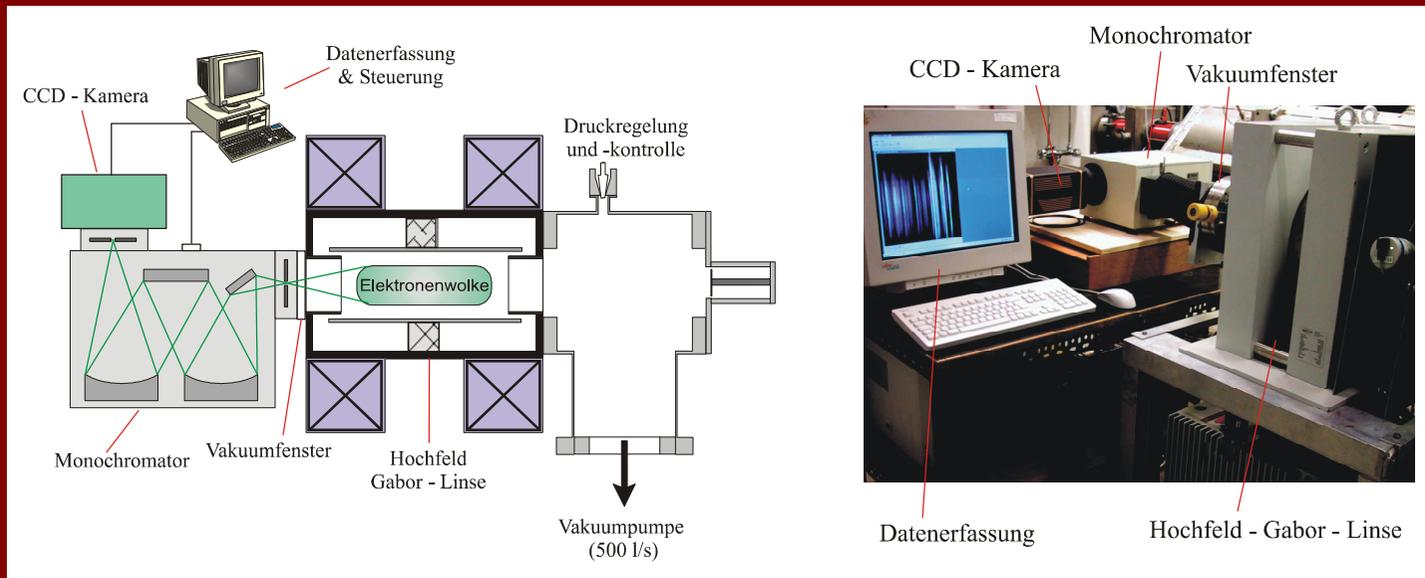
numerische Ergebnisse



normierte Elektronendichteverteilung (Simulation) und gemessene Leuchtdichteverteilung als Funktion der Linsenparameter

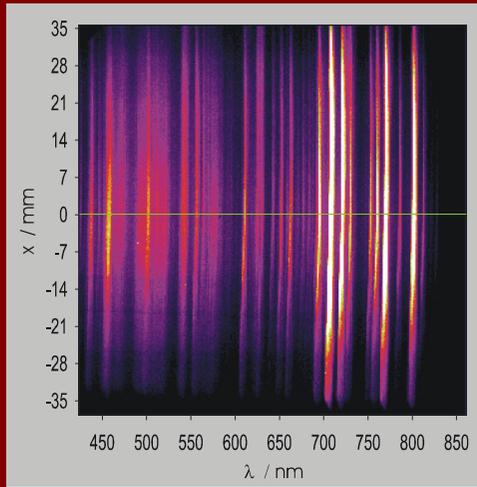
Untersuchung des Restgasleuchtens

optische Spektroskopie

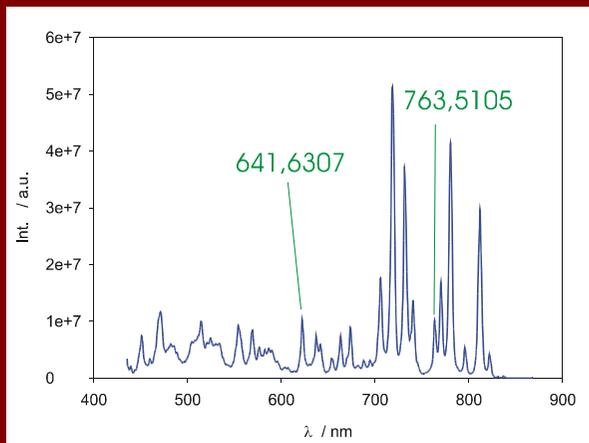


experimenteller Aufbau zur optischen Spektroskopie des Restgasleuchtens

Optische Spektroskopie des Restgasleuchtens



CCD - Kamerabild



Leuchtdichteintensität als Funktion der Wellenlänge

Griem, Plasma Spectroscopy, 1964

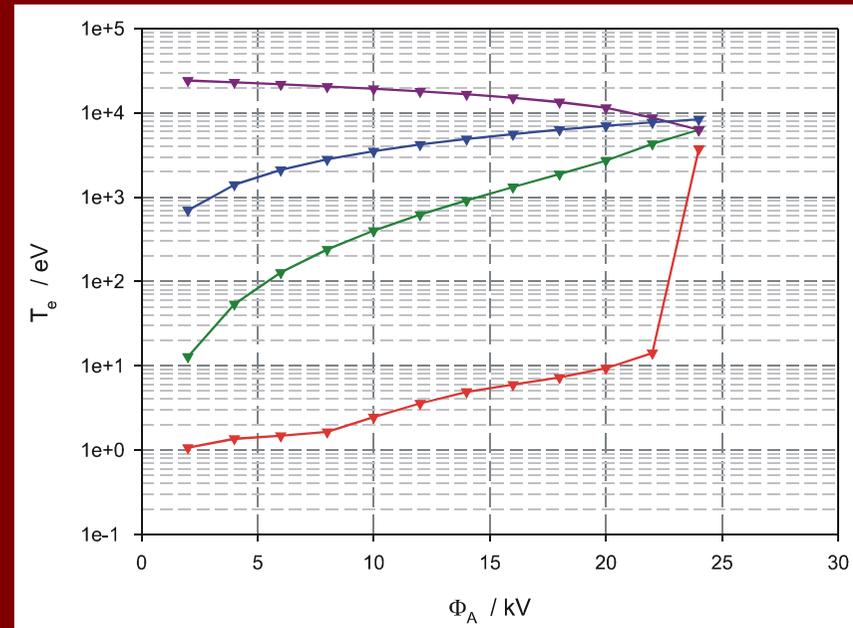
$$k_B T_e = \frac{E' - E}{\ln \left(\frac{I \lambda^3 g' f'}{I' \lambda^3 g f} \right)}$$

Argon

$p = 1E-5$ mbar

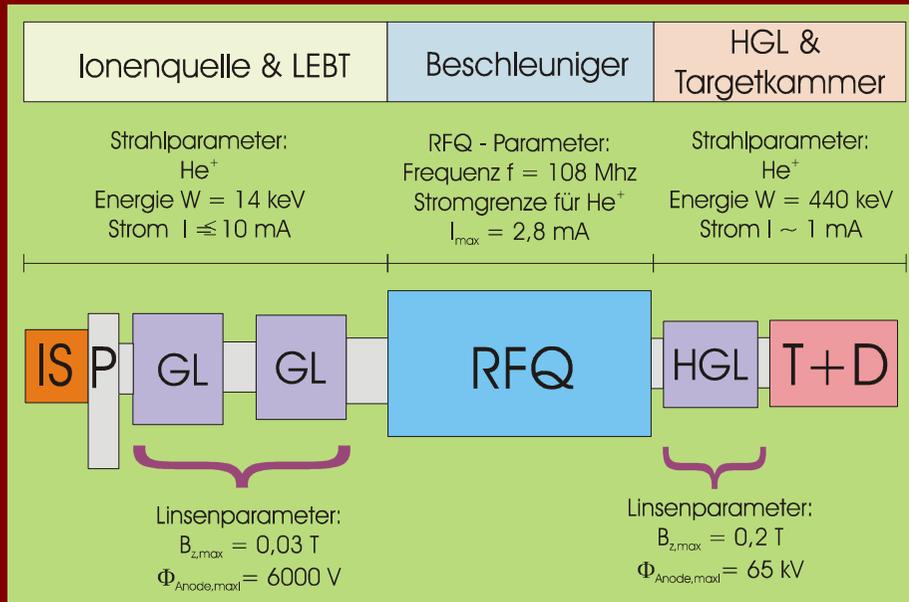
$B_z = 0,026$ T

$\Phi_A = 2 - 24$ kV



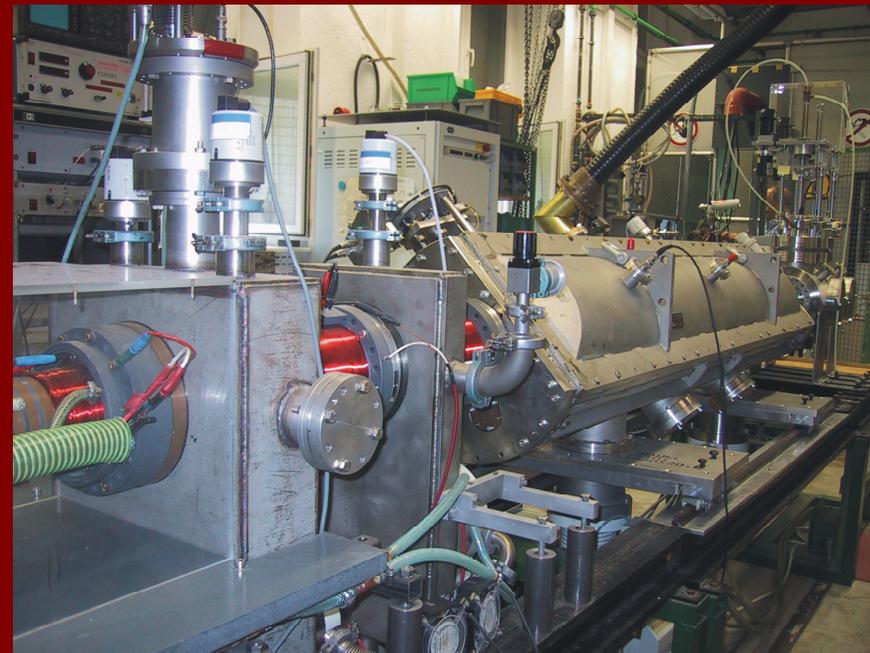
mittlere kinetische Energie der Elektronen als Funktion des Anodenpotentials (rot)

Strahltransportexperimente



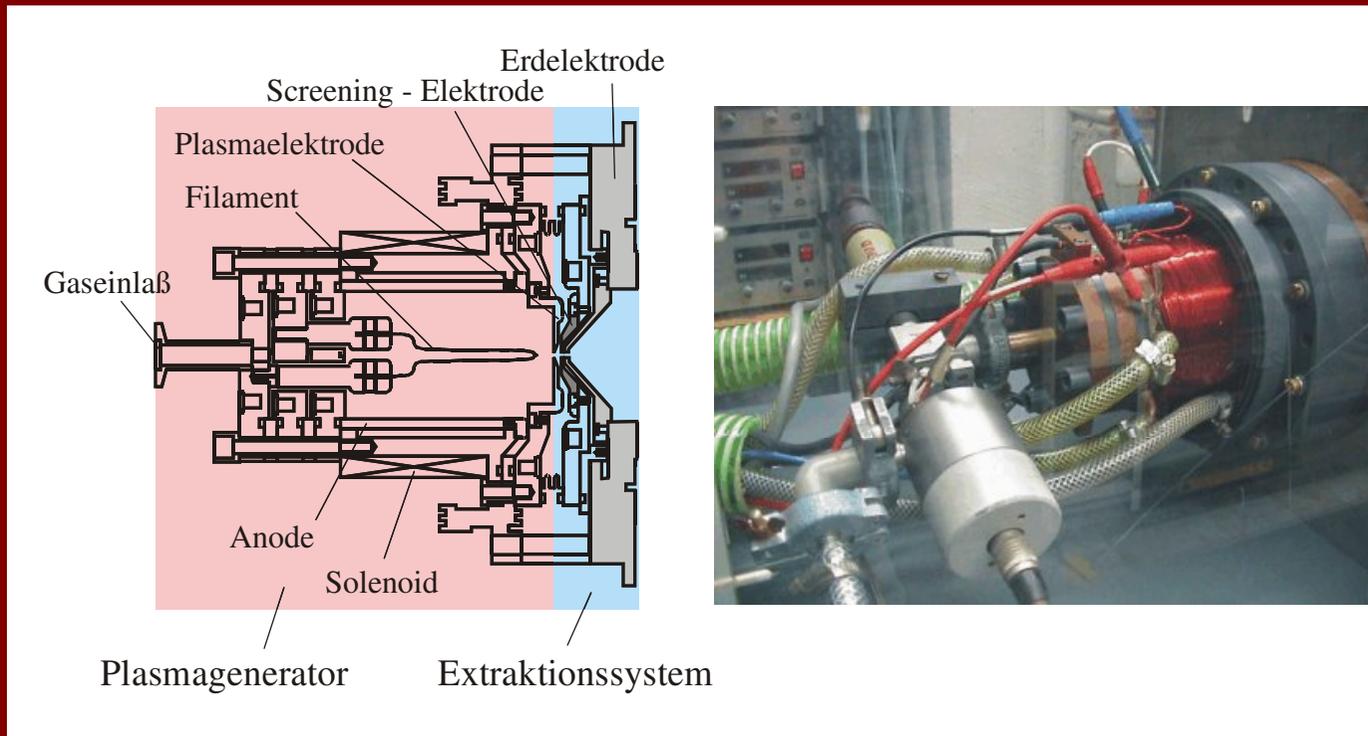
schematische Darstellung des Injektors

Beschleunigerlabor am IAP



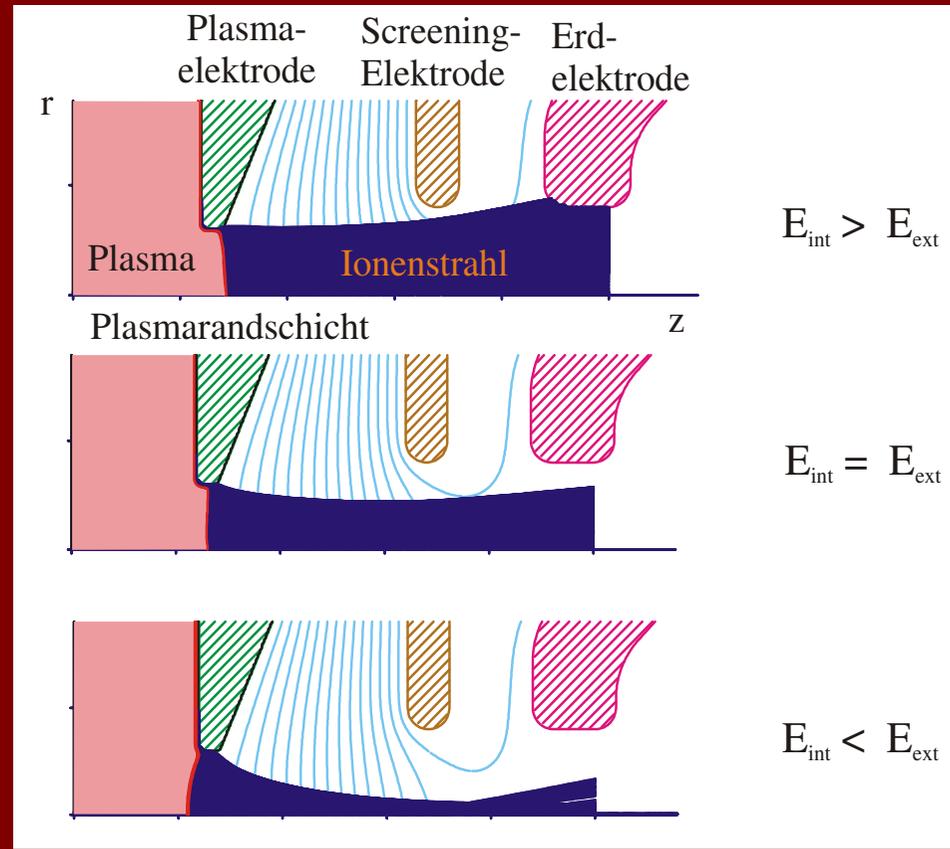
Strahltransportexperimente

Ionenstrahlerzeugung und Extraktion



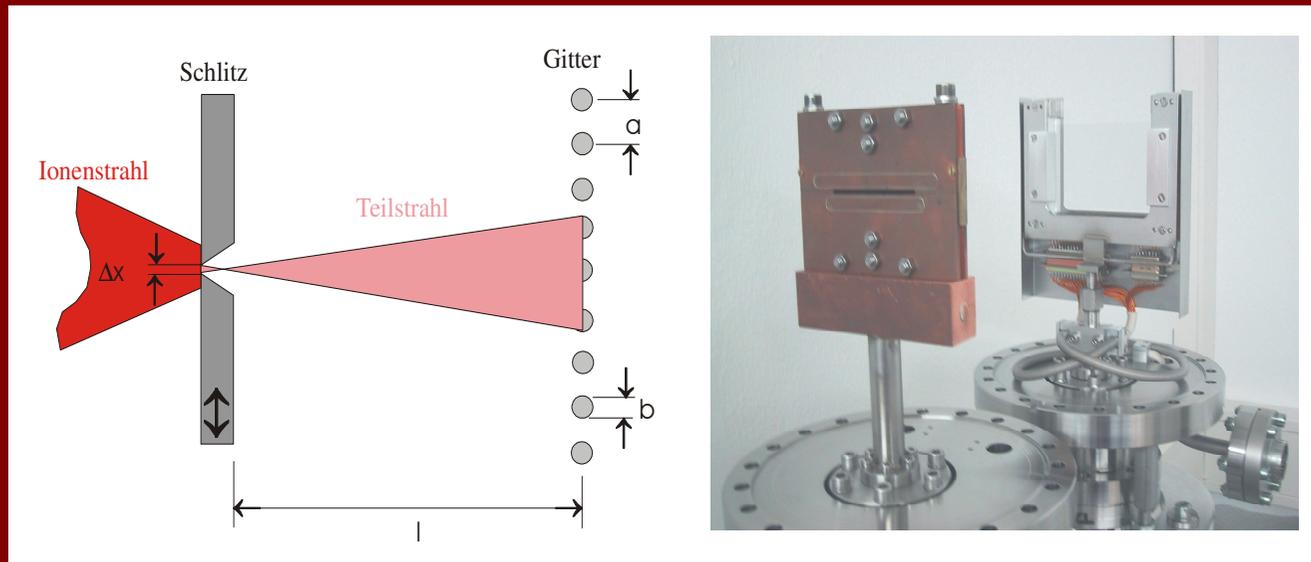
Aufbau der am IAP verwendeten Volumenquelle

Strahlanpassung im Extraktionssystem

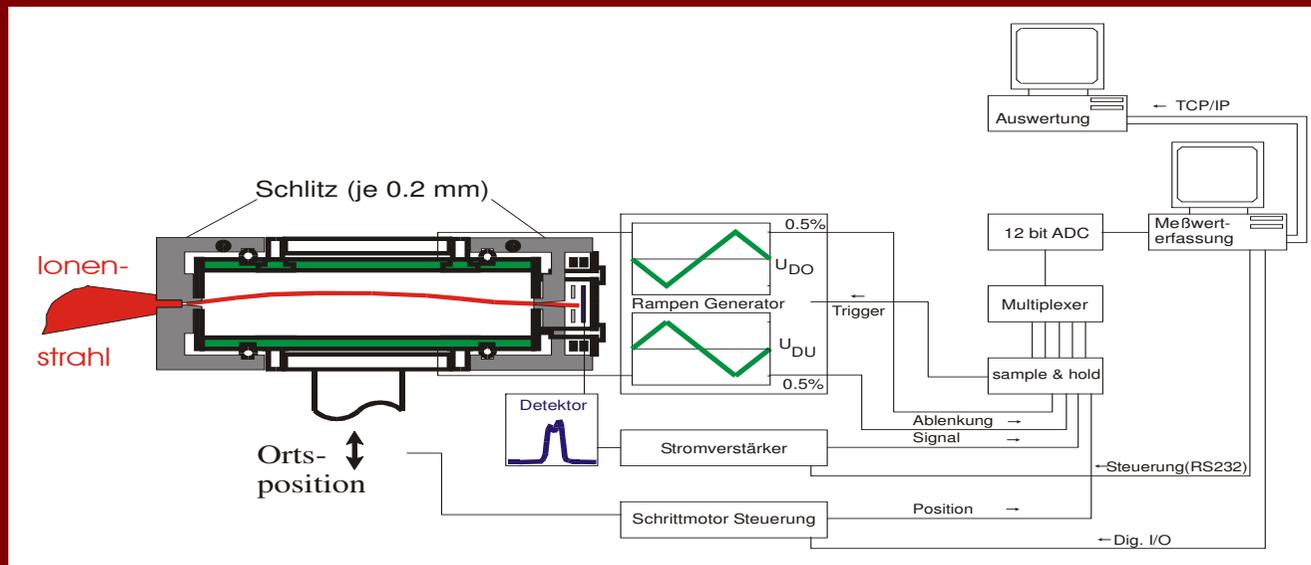


Numerisch berechnete Strahlanpassung

Strahldiagnose - Emittanzmessung

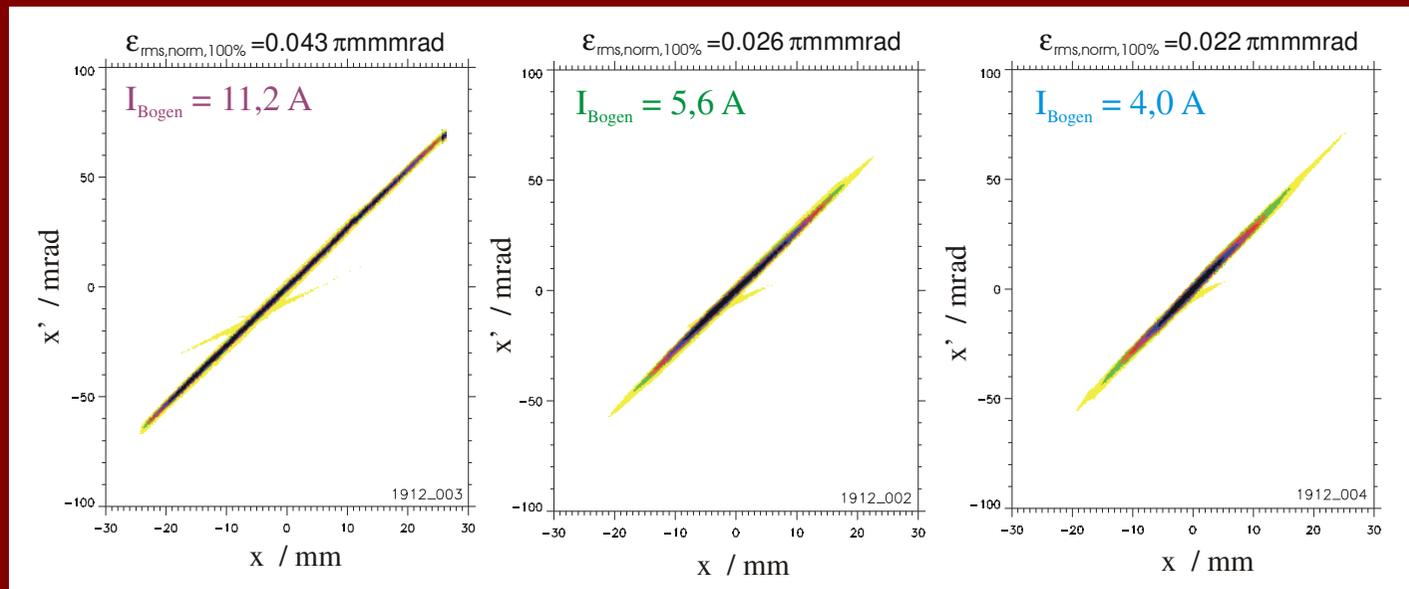


Schlitz-Gitter-
Emittanzmessanlage



Allison-
Emittanzmessanlage

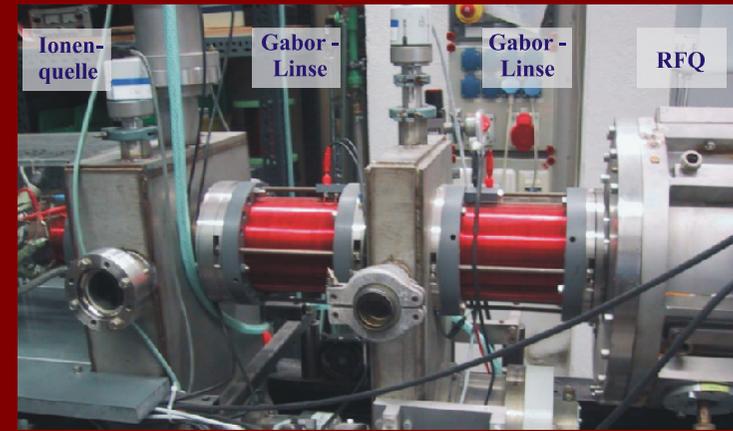
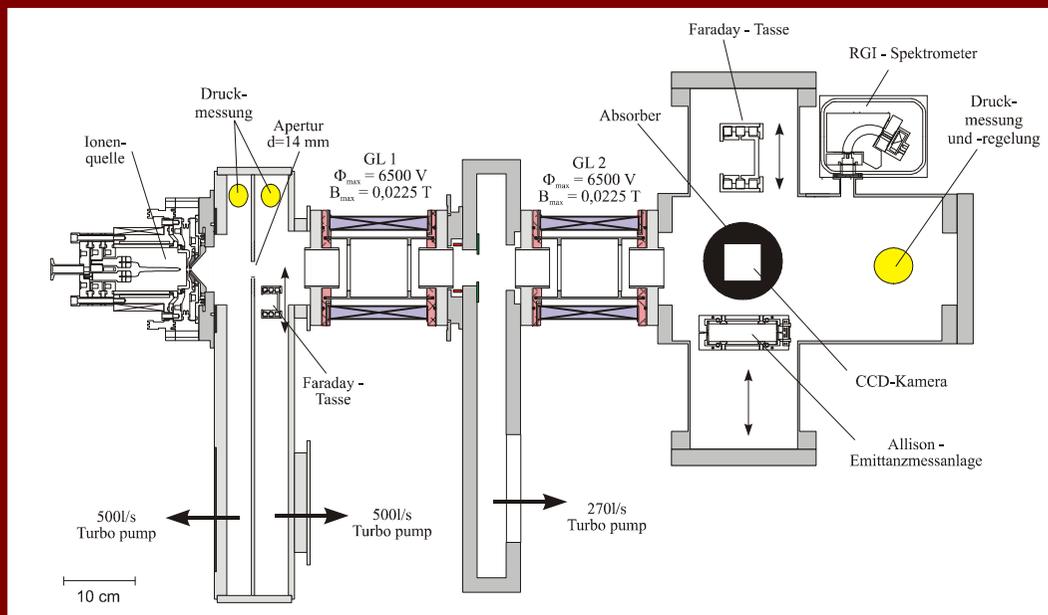
Ionenstrahlerzeugung und Extraktion



Gemessene Phasenraumverteilungen für verschiedene Plasmadichten in der Ionenquelle bei einer Beschleunigungsspannung von $U_{\text{ex}} = 10 \text{ kV}$

Niederenergetischer Strahltransport

Low Energy Beam Transport - LEBT



LEBT-System mit Ionenquelle und RFQ

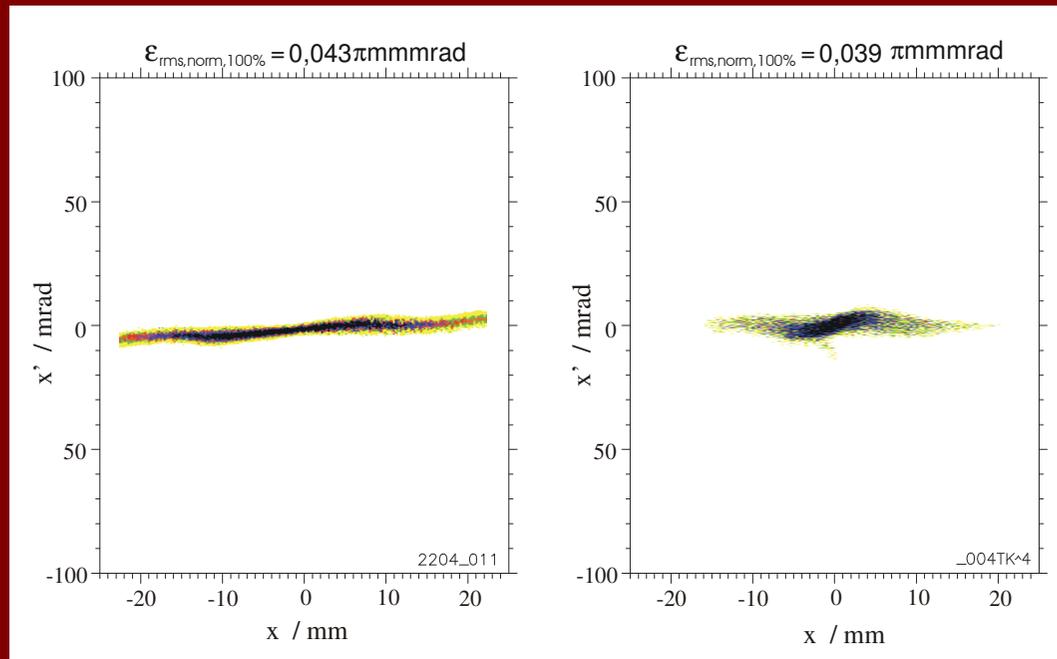
experimenteller Aufbau des Transportkanals

Niederenergetischer Strahltransport

Messung der Phasenraumverteilung – Emittanz

$$B_z = 6,6 \text{ mT}$$

$$\Phi_A = 1,85 \text{ kV}$$



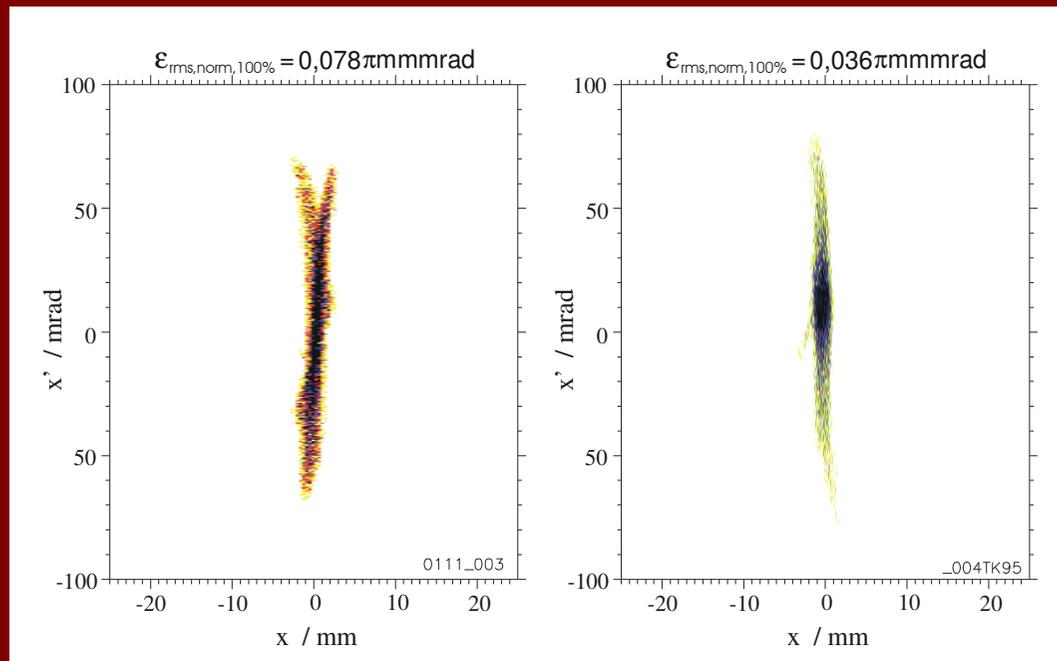
gemessene (links) und numerisch bestimmte (rechts)
Phasenraumverteilung, $W_b = 14 \text{ keV}$, $I = 11 \text{ mA}$

Niederenergetischer Strahltransport

Messung der Phasenraumverteilung – Emittanz

$$B_z = 7,7 \text{ mT}$$

$$\Phi_A = 2,6 \text{ kV}$$



gemessene (links) und numerisch bestimmte (rechts)
Phasenraumverteilung, $W_b = 14 \text{ keV}$, $I = 11 \text{ mA}$

Strahltransportexperimente

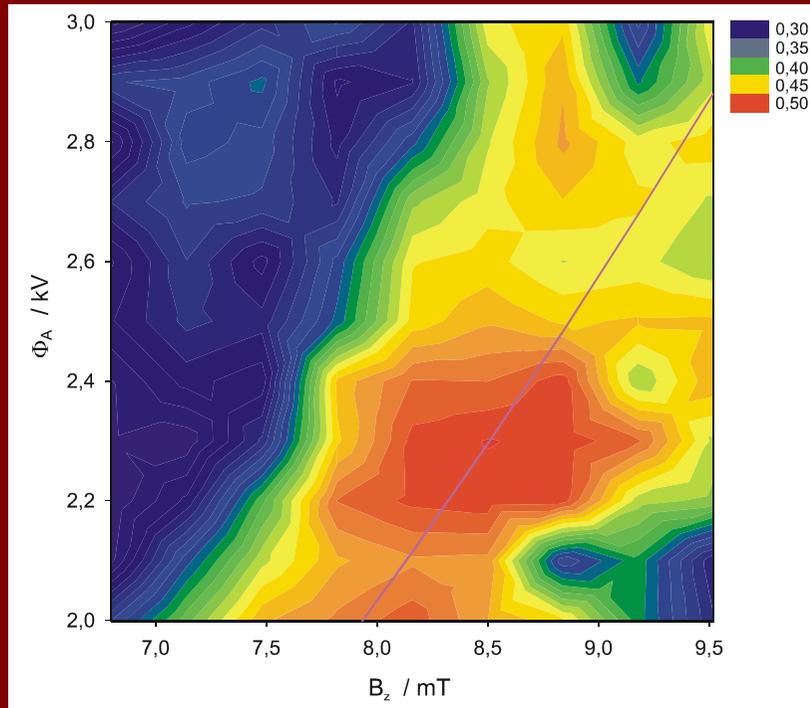
Vergleich zwischen theoretischen, numerischen und experimentellen Ergebnissen

$$\frac{1}{f} = \frac{\Delta r'}{r_0} = k^2 \cdot l = \frac{n_e e}{4\epsilon_0 W_B}$$

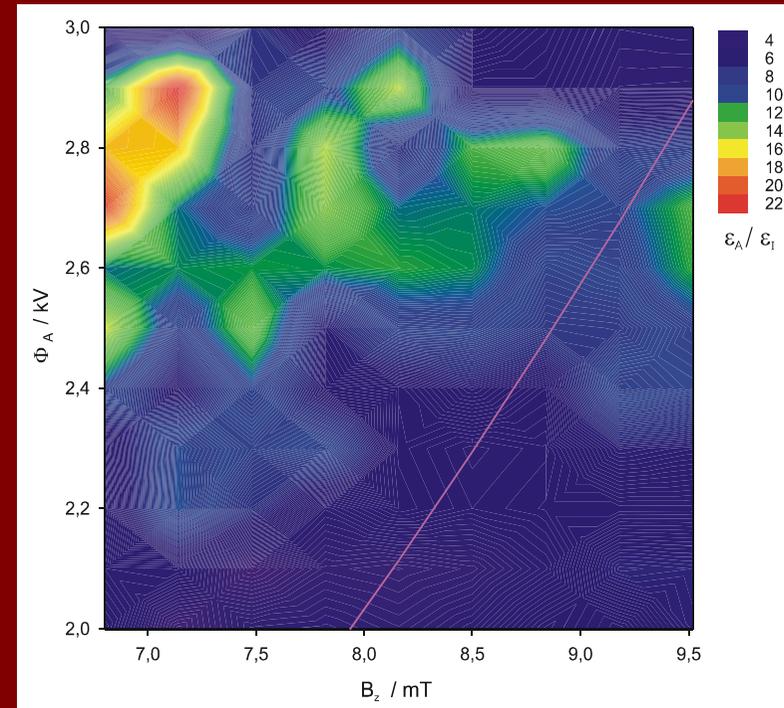
Linse 1	$n_{e,max} [m^{-3}]$	$n_e [m^{-3}]$
radial enclosure	2.1E+14	2.1E+14
longitudinal enclosure	1.6E+14	1.6E+14
Simulation	1.5E+14 (71%/93%)	1.0E+14 (48%/63%)
Measurement	-----	7.9E+13 (38%/49%)

Linse 2	$n_{e,max} [m^{-3}]$	$n_e [m^{-3}]$
radial enclosure	2.9E+14	2.9E+14
longitudinal enclosure	2.3E+14	2.3E+14
Simulation	2.1E+14 (72%/90%)	1.4E+14 (49%/61%)
Measurement	-----	1.4E+14 (49%/61%)

Ergebnisse der Strahltransportexperimente - LEBT

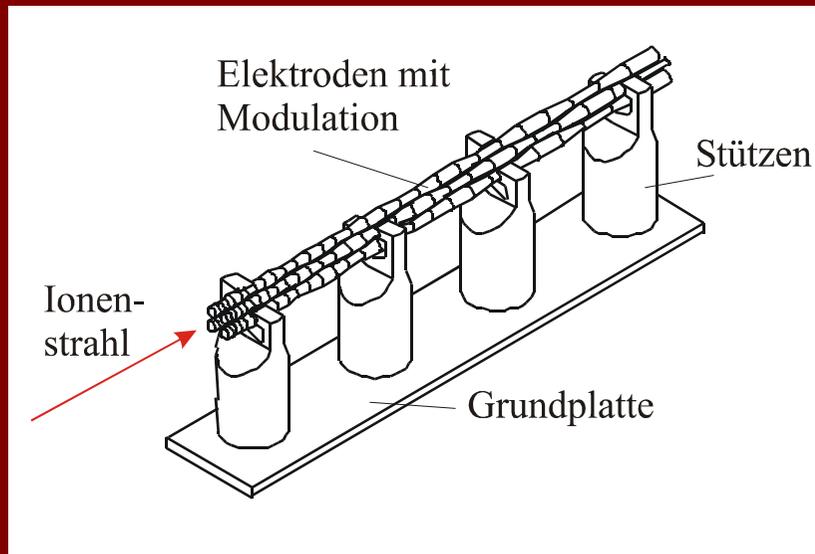


experimentell bestimmter Füllgrad als Funktion der Linsenparameter

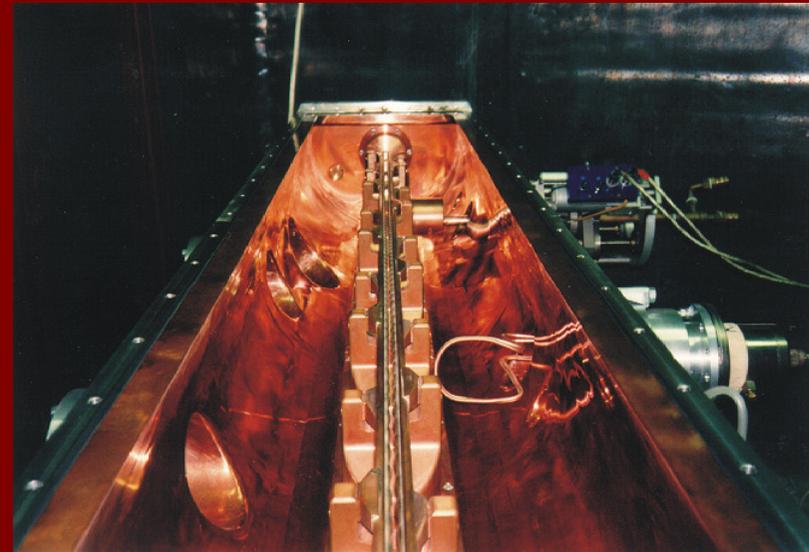


Abbildungsfehler ausgedrückt durch das Emittanzwachstum als Funktion der Linsenparameter

Strahlbeschleunigung durch den RFQ



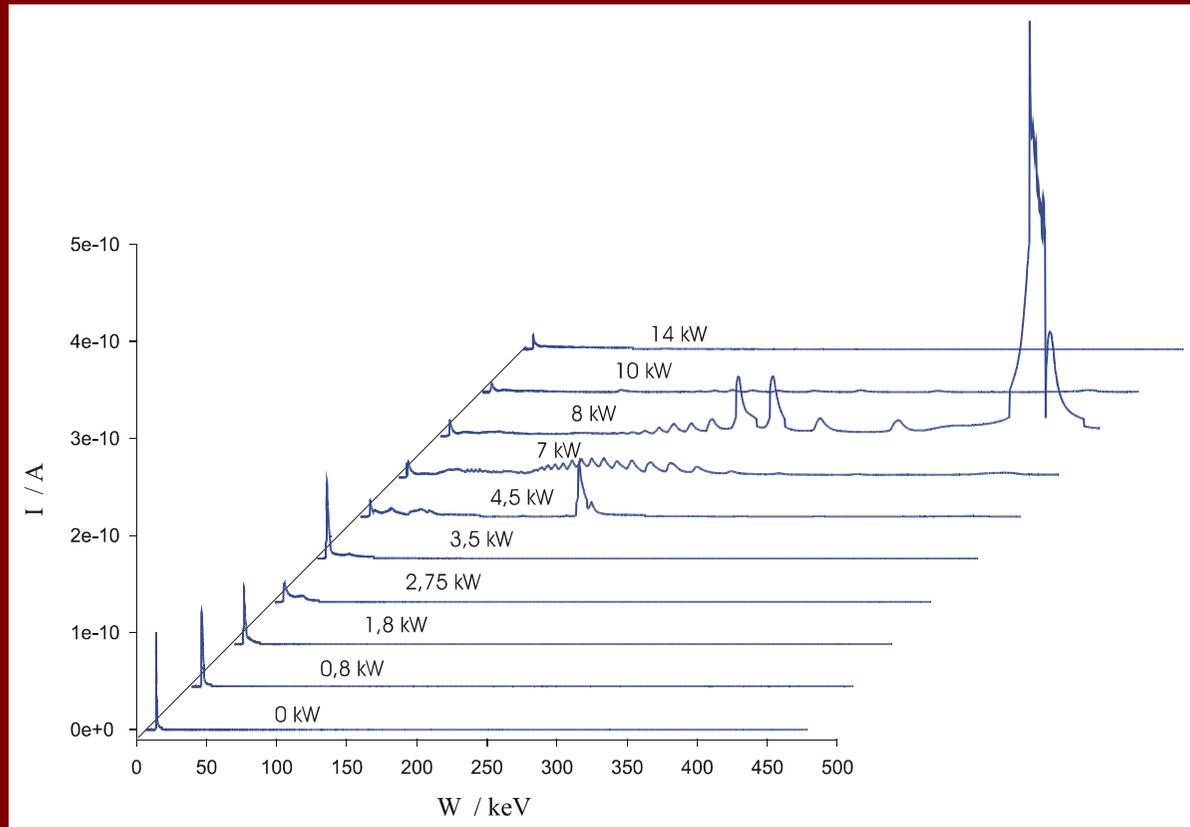
Schematischer Aufbau des Resonators mit modulierten Elektroden



Installierte Elektroden und Einkopplung

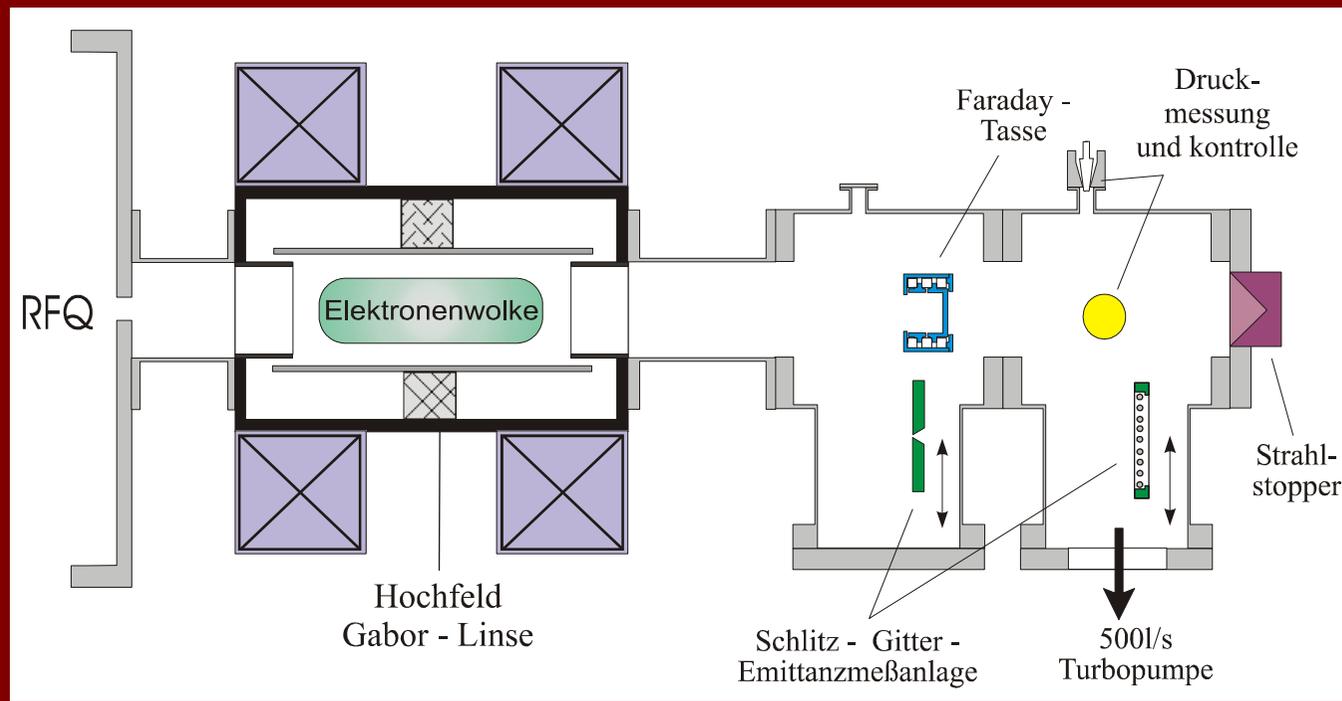
Strahlbeschleunigung durch den RFQ

nur für die Design-Leistung im Resonator ist eine Beschleunigung
des Ionenstrahles möglich



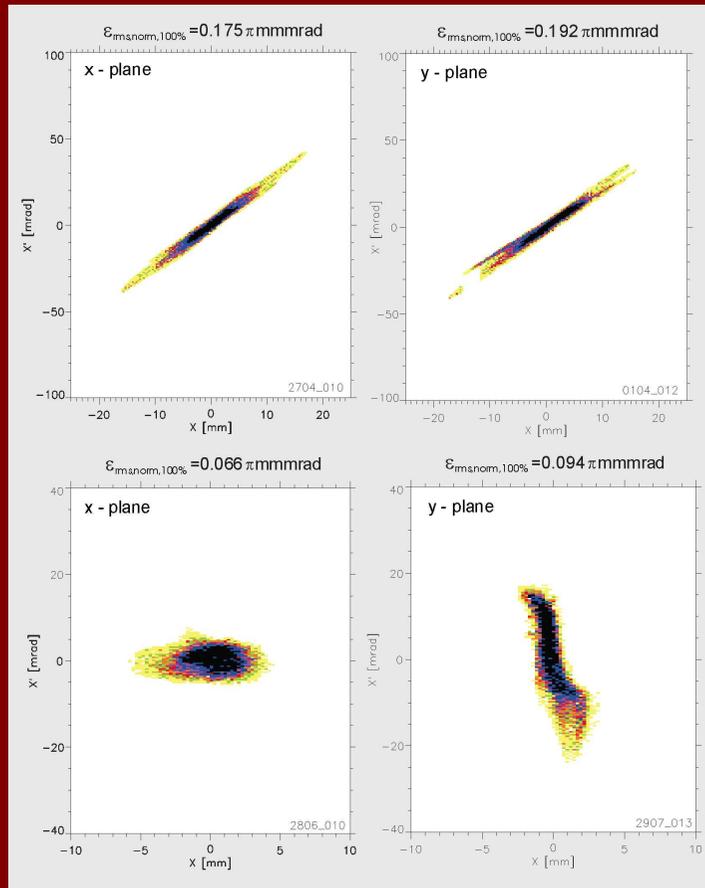
Energiespektrum des Ionenstrahles nach dem RFQ

Strahltransportexperimente mit der Hochfeld-Gabor-Linse



schematische Darstellung des Transportkanals und der Diagnose

Strahlfokussierung mit der HGL



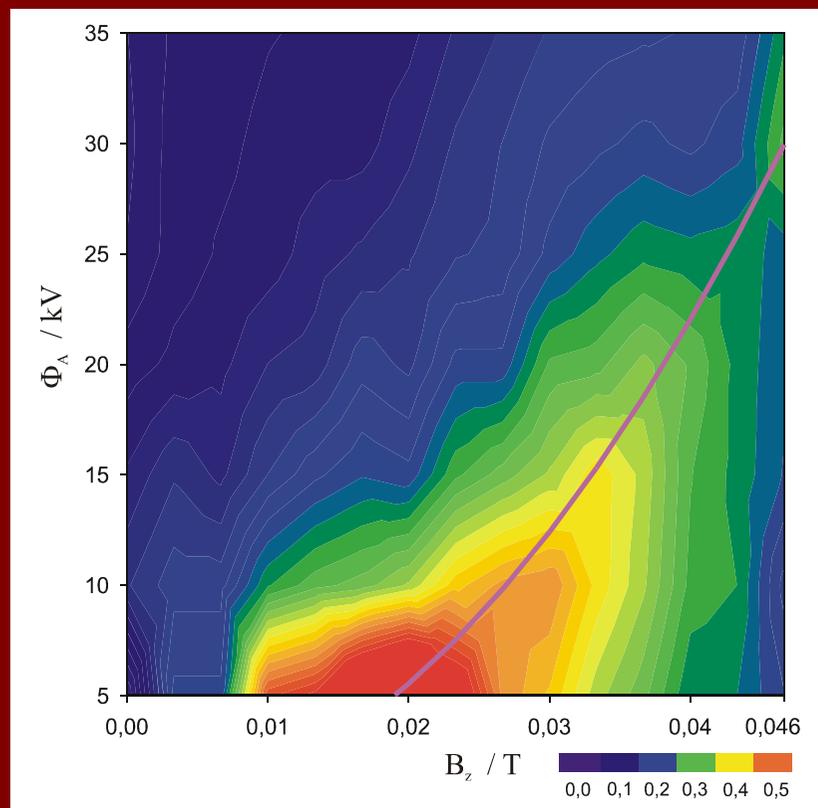
Gemessene Emittanzen mit und ohne Fokussierung durch die HGL in der x- und y-Ebene

Messung der Phasenraumverteilung

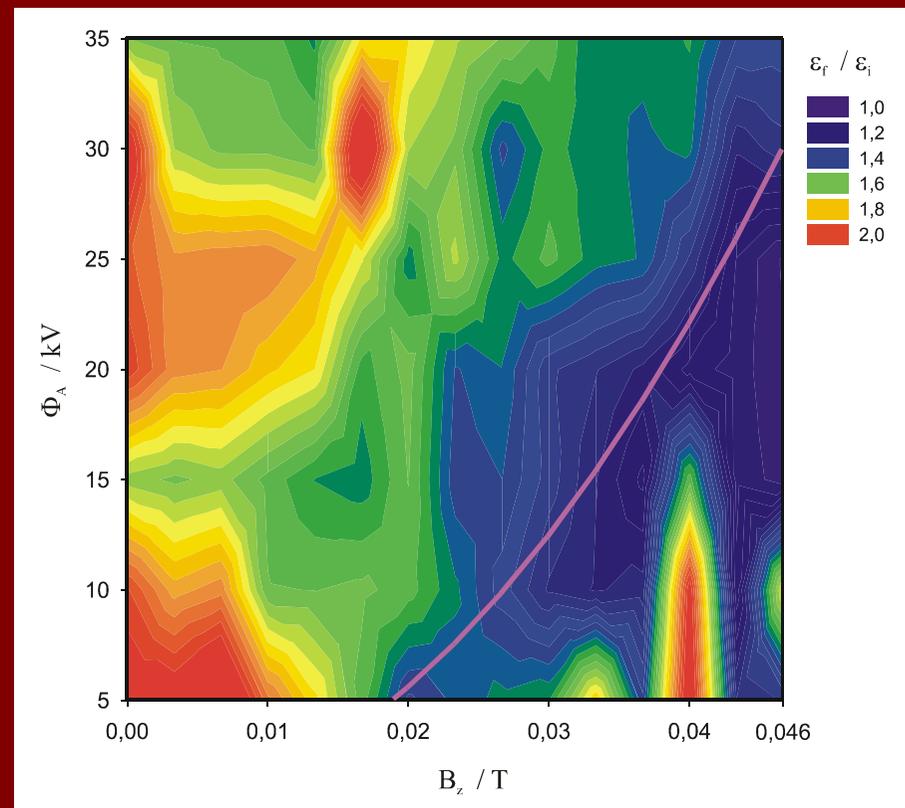
$$\frac{1}{f} = \frac{\Delta r'}{r_0} = k^2 \cdot l = \frac{n_e e}{4 \epsilon_0 W_B}$$

Lens	$n_{e, max} [m^{-3}]$	$n_e [m^{-3}]$
radial enclosure	1,02E+16	1,02E+16
longitudinal enclosure	6,14E+15	6,14E+15
Simulation	5,7E+14 (5,6% / 9,3%)	3,5E+14 (3,4% / 5,7%)
Measurement	-----	2,6E+15 (25,5% / 42,3%)

Ergebnisse der Strahltransportexperimente nach dem RFQ



experimentell bestimmter Füllgrad als Funktion der Linsenparameter



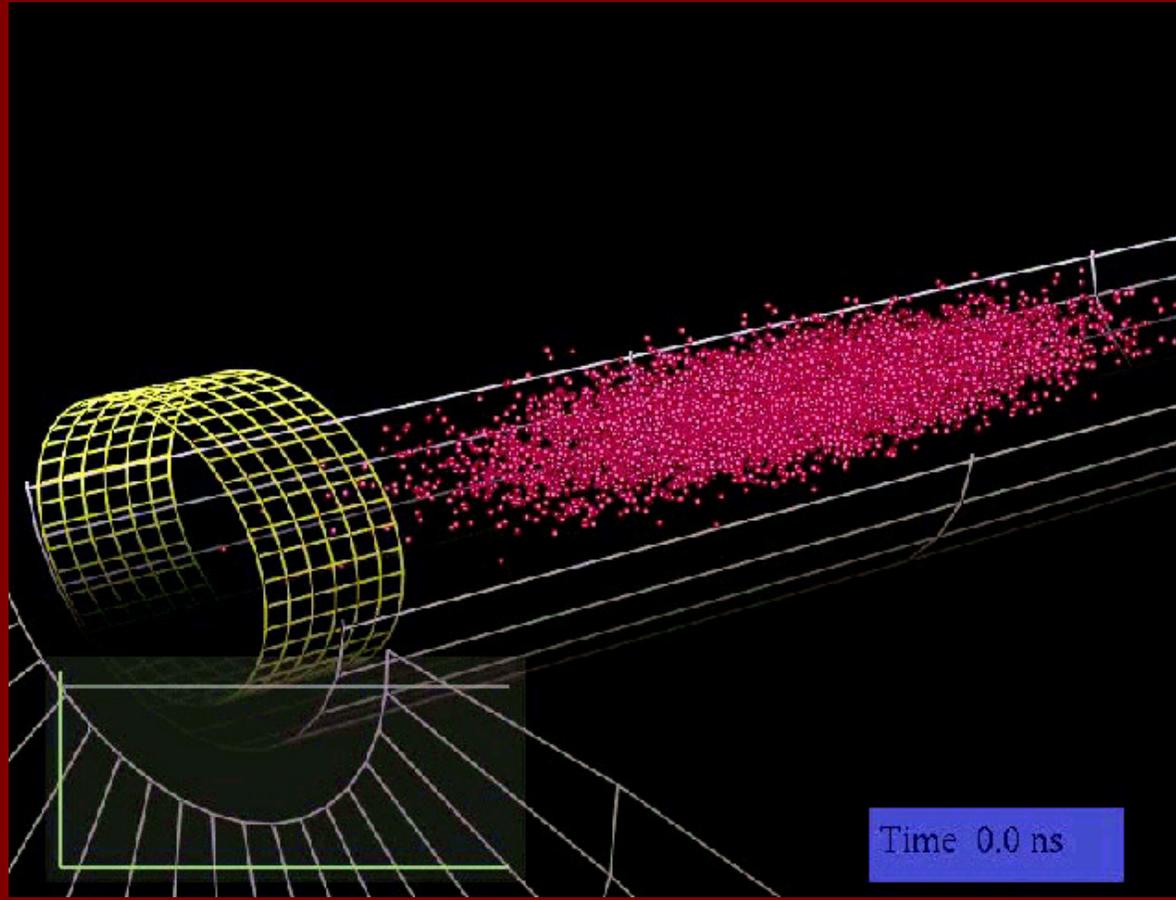
Abbildungsfehler ausgedrückt durch das Emittanzwachstum als Funktion der Linsenparameter

Zusammenfassung

- die theoretische Beschreibung des Plasmaeinschlusses konnte durch weitere Randbedingungen in der numerischen Simulation erweitert werden
- die experimentelle Bestimmung der Eigenschaften des eingeschlossenen NNP ermöglichen eine gezielte Einflussnahme auf das Linsendesign
- die Strahltransportexperimente zeigen gute optische Eigenschaften dieses Linsentyps
- Offene Fragen wie z.B. die Möglichkeit der Raumladungskompensation von Mikrobunchen muss noch untersucht werden

Offene Fragen zu Raumladungskompensation

Möglichkeit eines Raumladungskompensierten Strahltransports?



© A. Lifschitz
LPGPU Paris XI
Orsay - France

Raumladungskompensation eines Mikrobunches