



Low Energy Beam Transport and Diagnostic

# **Fortschritte bei der Entwicklung von Gabor-Plasmalinsen**

C. Gabor, A. Jakob, O. Meusel\*, J. Pozimski, U. Ratzinger, J. Schäfer

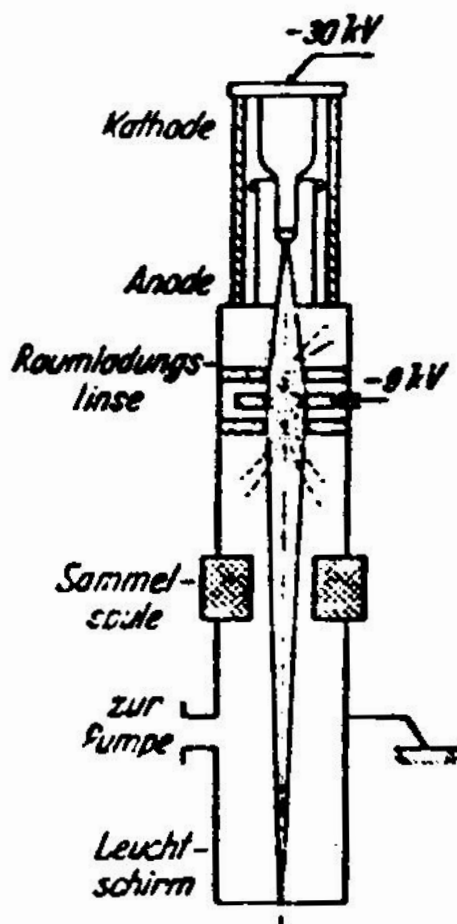
TU - Darmstadt 2003

[Vorläufige Mitteilung<sup>1)</sup> aus dem Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Berlin<sup>2)</sup>.]

**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.)



Entwicklung von Plasmalinsen  
z.B. Z-Pinch-Linsen

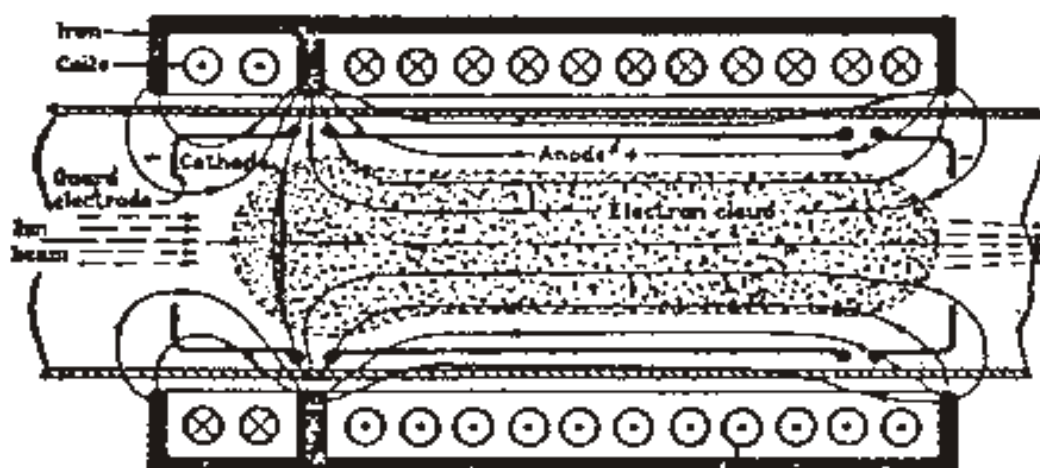
Entwicklung von Gabor-Linsen

**Fig. 2.**  
Abbildung durch eine kurze Raumladungssäule (Fremdionisation).

D. Gabor

### 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 beams<sup>1</sup>. 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.

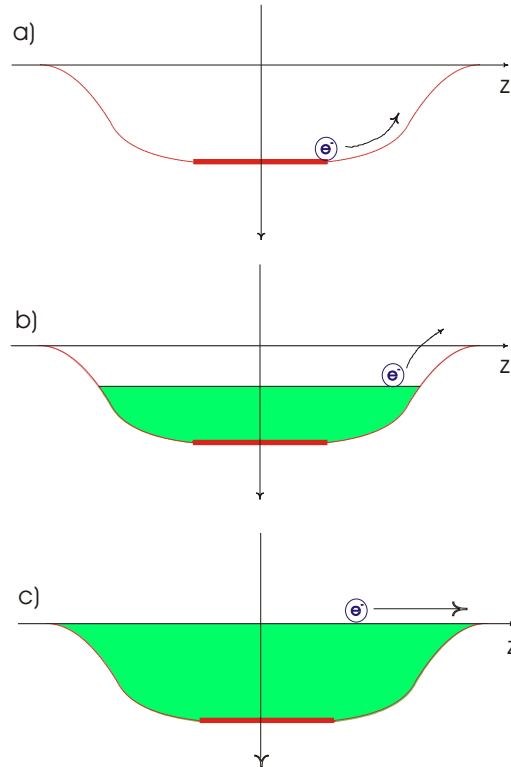


MAGNETRON LENS FOR ION BEAMS

According to the theories of Hull<sup>2</sup> and Brillouin<sup>3</sup>, in the steady state the electrons rotate around the axis in equilibrium orbits, such that the electrostatic repulsion of the electrons inside the orbit together with the centrifugal force balance the radial Lorentz force produced by the magnetic field. The electron distribution in the cloud is uniform, with a space-charge density

$$\rho_E = - \frac{eH^2}{8\pi m_e c^2} \quad (1)$$

## Longitudinaler Elektroneneinschluß



einfachster Ansatz

$$\Phi(r = 0) = 0$$

unter Annahme einer homogenen Verteilung  
ist die Maximaldichte:

$$\rho_{e,\text{max,long}} = \frac{4U_A \epsilon_0}{r_A^2}$$

für thermalisierte Elektronen gilt:

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

dabei sind  $\rho_e(z = \Phi_{\text{max}}, r = \text{konst})$  und  $T_e$  freie Parameter, die über die longitudinalen Verluste gekoppelt sind.

## Radialer Elektroneneinschluß

Bewegungsgleichung geladener Teilchen in elektrischen und magnetischen Feldern

$$m_e \frac{dv}{dt} = -e \cdot (E_{raum} + v \times B)$$

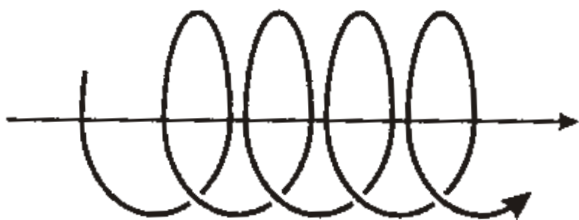
Winkelgeschwindigkeit

$$\Theta' = -\frac{eB_z}{\underbrace{2m_e}_{\omega_l}} + \frac{c}{r^2}$$

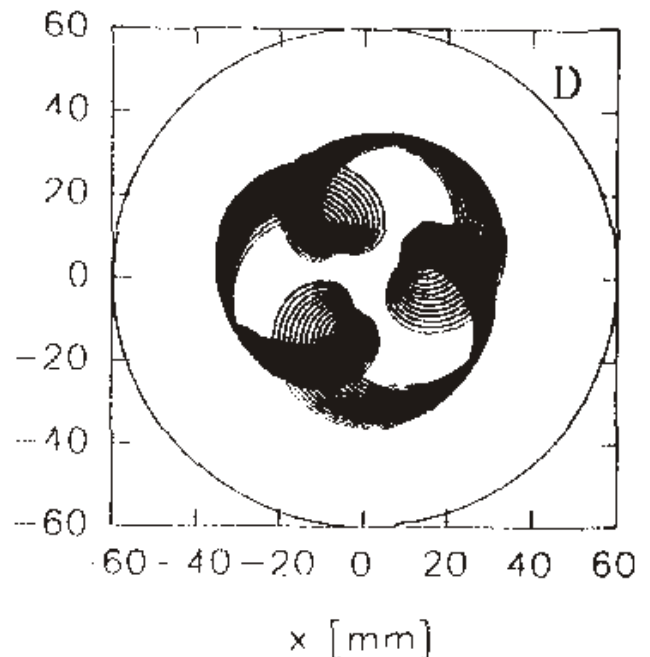
Maximaldichte

$$E(r) = \frac{1}{\epsilon_0 r_0} \int_0^r \rho_{max}(r') r' dr$$

$$\rho_{e,max,rad} = \frac{e\epsilon_0 B_z^2}{2m_e}$$



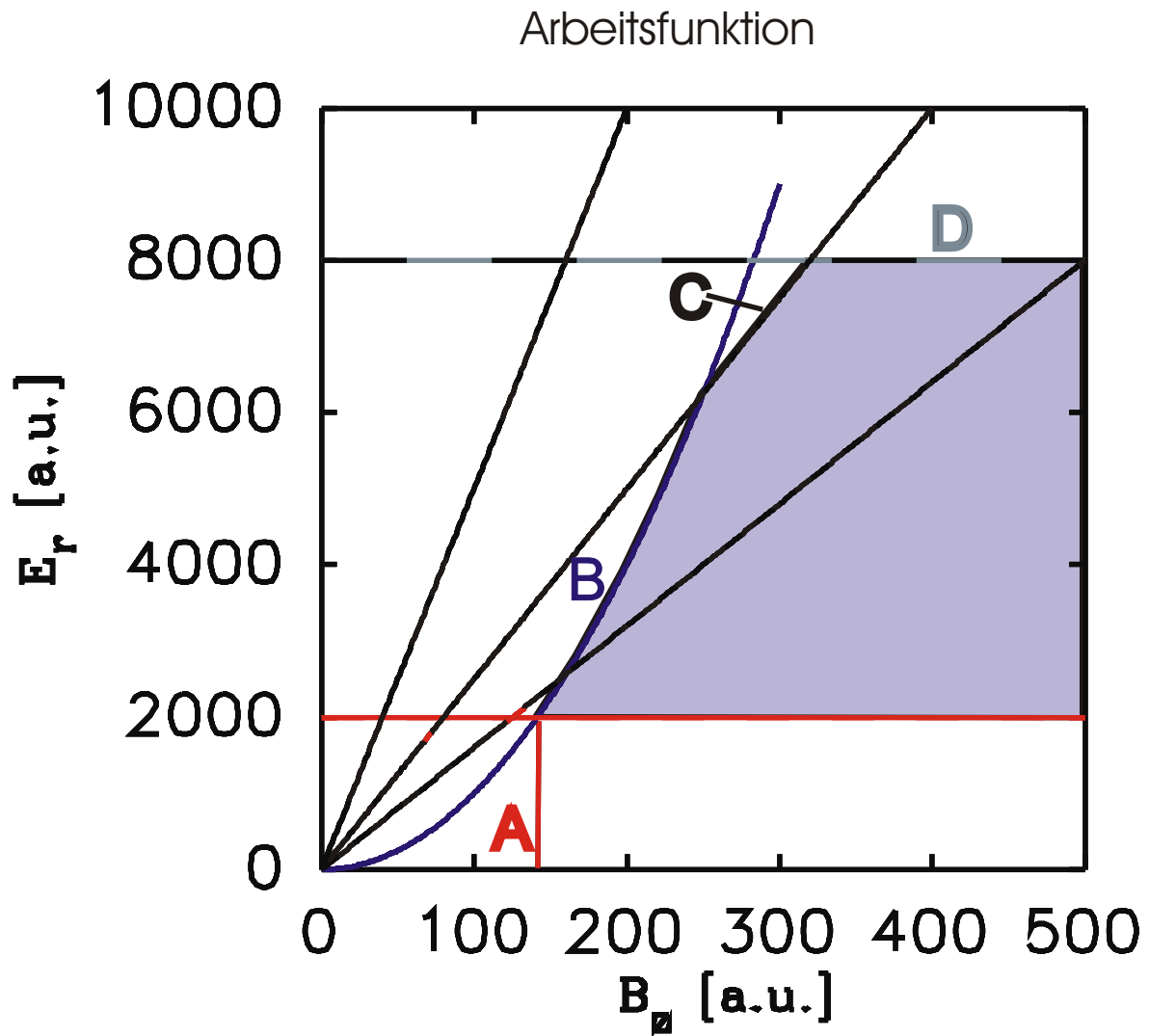
y [mm]



elektrische Diffusion in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern

im Zylinderpotential

## Theoretische Einschlußbedingungen



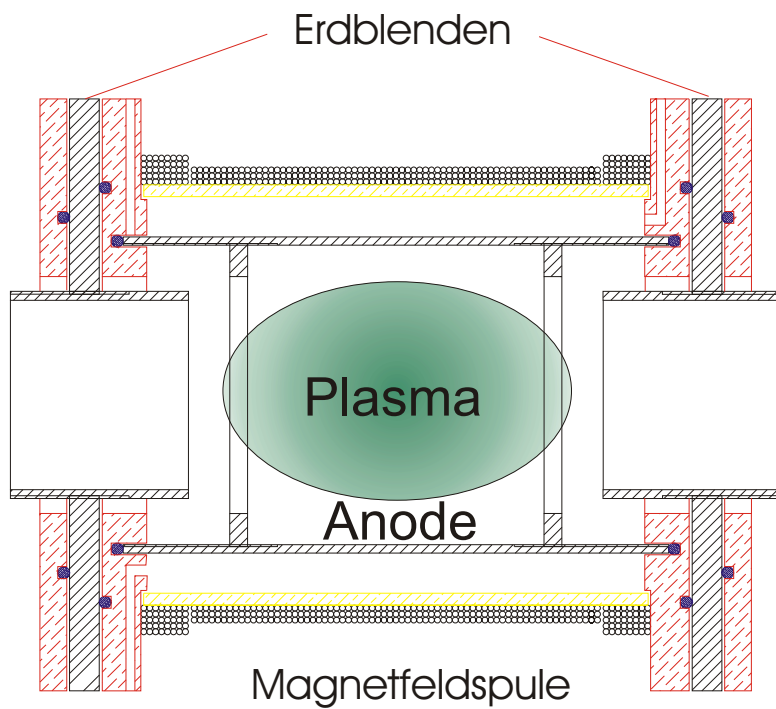
A) Kleinstes magnetisches Feld für den Einschluß  
(abhängig von der Elektrodengeometrie)

B) Radiale Einschlußbedingung  
(Brillouinflow / Gabor:  $n_e B^2$ )

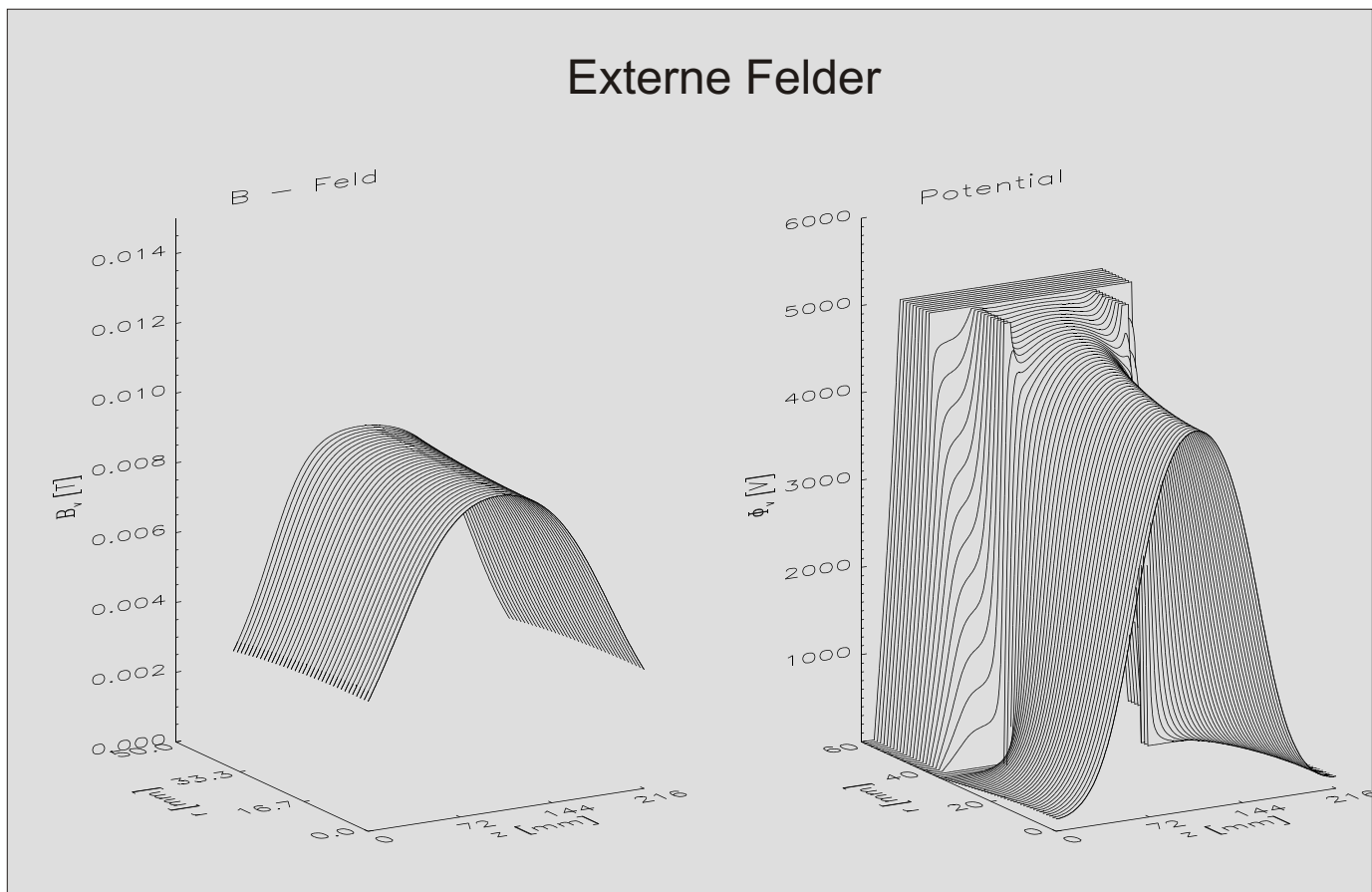
C) Radiale Verluste durch Diffusion über Feldlinien

D) Maximaler longitudinaler Einschluß (Anodenpotential)

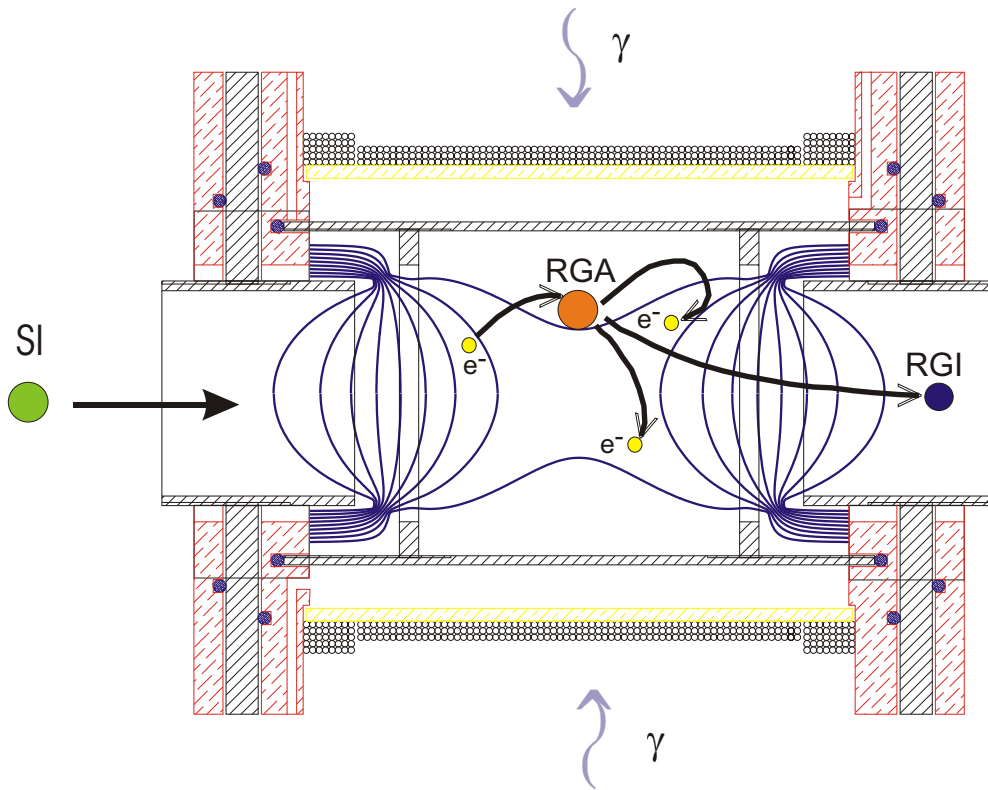
# Aufbau der Gabor - Plasma - Linse



## Externe Felder



## Erzeugung der Linsenelektronen



Reaktionsgleichung

Wirkungs-  
querschnitt

Projektil / Energie

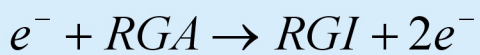


$$^* 8 E-21 m^2$$

$$He^+ U = 10 keV$$

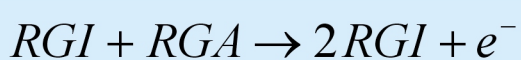


$$^{***} \text{Erzeugungsrate: } 1 E6 m^{-3}s^{-1}$$



$$^{**} 3,8 E-21 m^2$$

$$e^- U = 100 eV$$



$$^* 2 E-21 m^2$$

$$He^+ U = 3 keV$$

\* R.K Janev, W.D. Langer, K. Evans, D.E. Post, Elementary processes in hydrogen-helium plasmas, Springer, Heidelberg (1987)

\*\* Y.-K. Kim, W.R. Johnson, and M.E. Rudd, Phys. Rev. A 61, 034702 (2000).

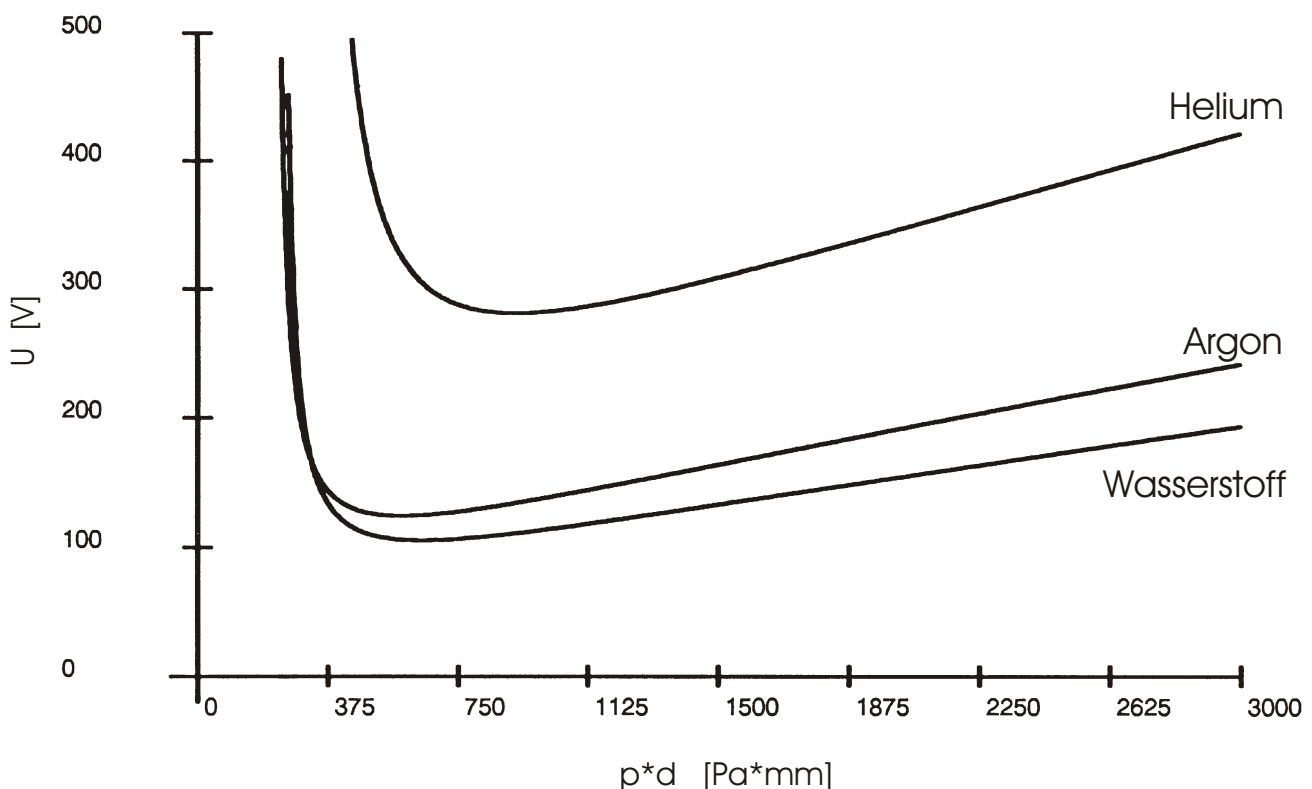
\*\*\* H. Vogel, Gerthsen Physik, Springer, Heidelberg (1999)



## Linsenfüllung durch Gasentladung

Zündbedingung für ein Plasma nach Paschen

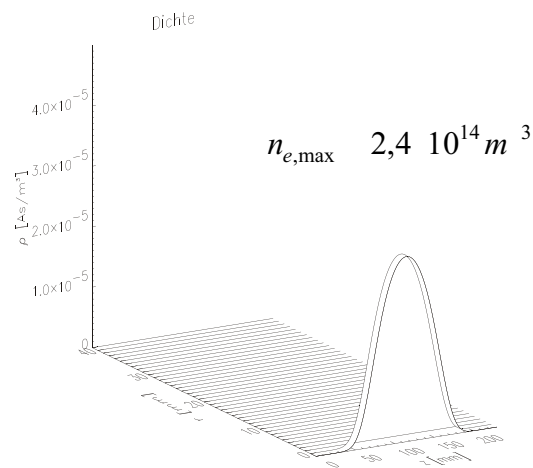
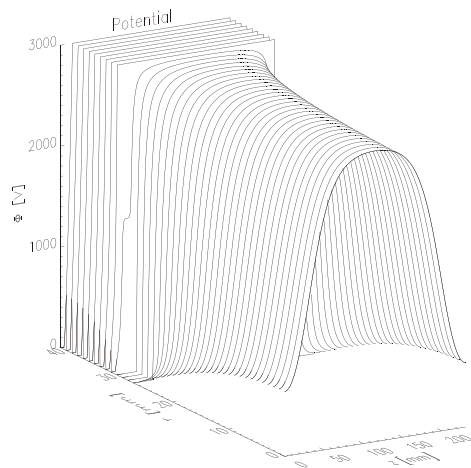
$$E \cdot d = U_z = \frac{\pi \delta^2 \sqrt{2} \cdot U_{Ion} \cdot p d}{k_B T} \cdot \frac{1}{\ln \frac{\pi \delta^2 \sqrt{2} \cdot p d}{k_B T} - \ln \ln \frac{1 + \gamma}{\gamma}}$$



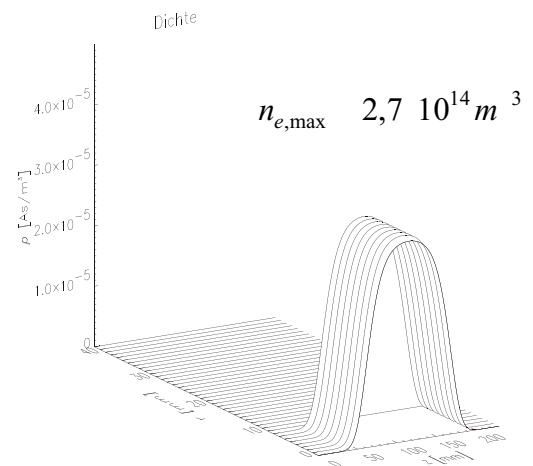
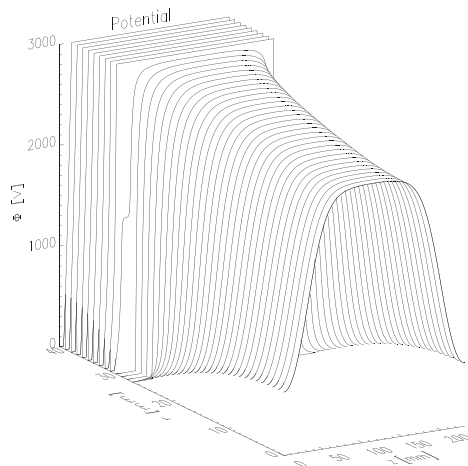
Die Kurven trennen das Gebiet der Gasentladung (oberhalb) von dem Gebiet in dem keine Gasentladung stattfindet.

Numerische Simulation der Elektronendichte für  
konstantes Anodenpotential  $\phi_{\text{anode}} = 3000 \text{ V}$

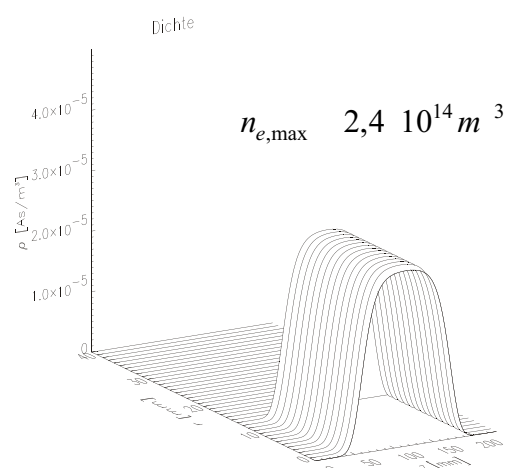
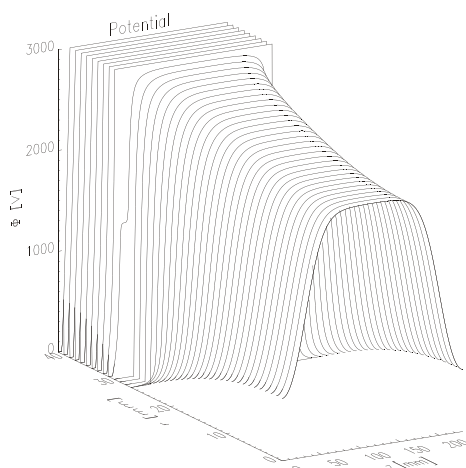
A)  $B_{z,\text{max}} = 80 \cdot 10^4 \text{ T}$



B)  $B_{z,\text{max}} = 90 \cdot 10^4 \text{ T}$

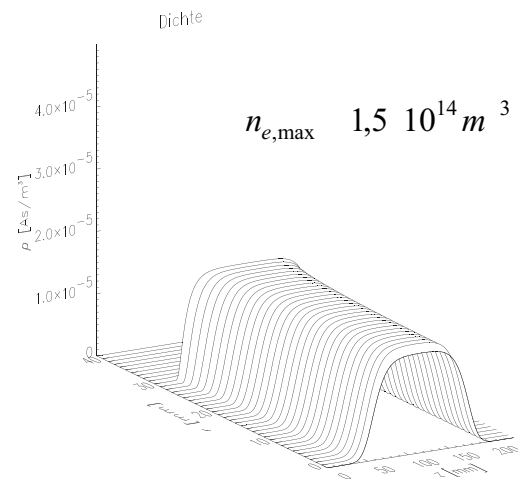
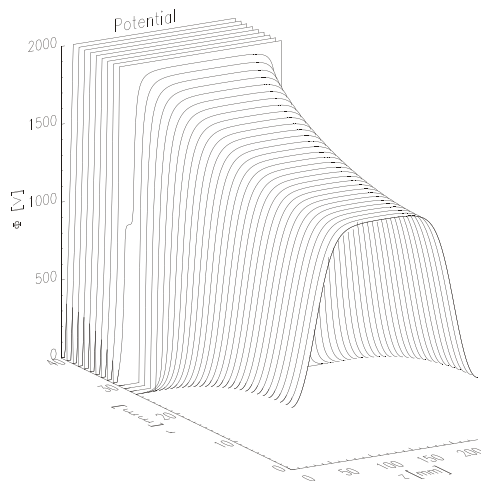


C)  $B_{z,\text{max}} = 100 \cdot 10^4 \text{ T}$

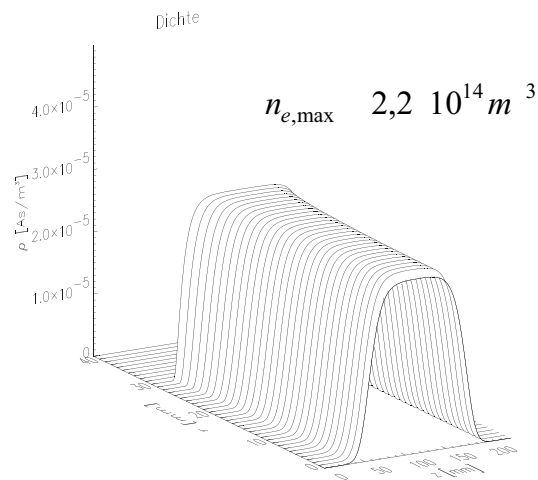
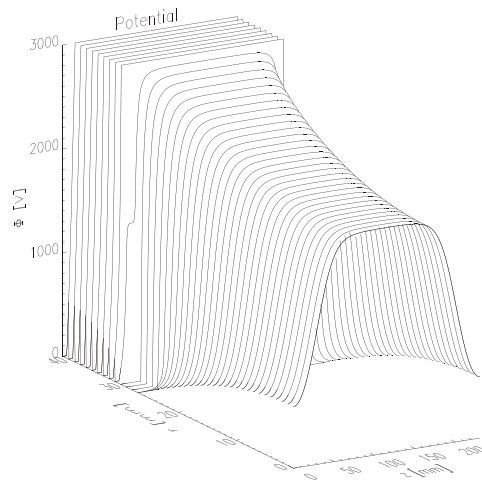


Numerische Simulation der Elektronendichte für  
konstantes Magnetfeld  $B_{z,\max} = 5 \cdot 10^2 T$

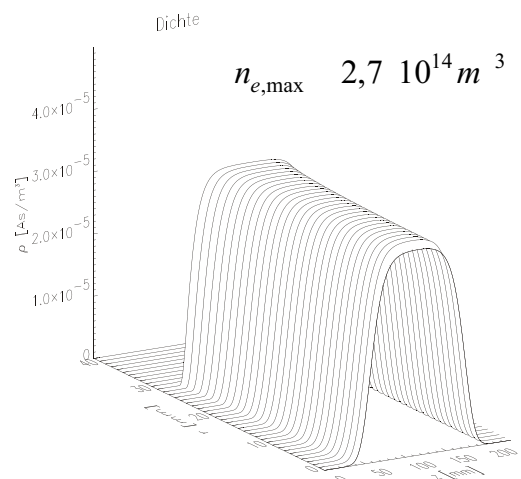
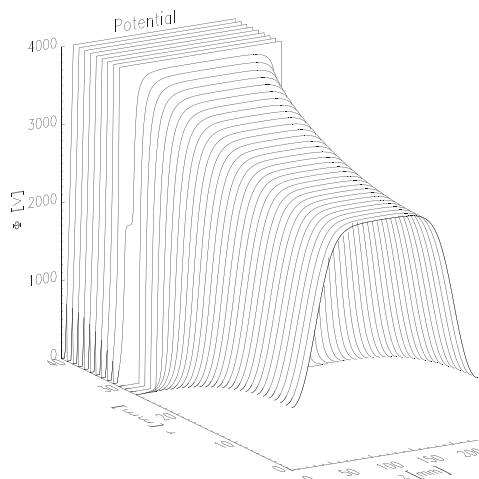
A) Anode = 2000 V



B) Anode = 3000 V

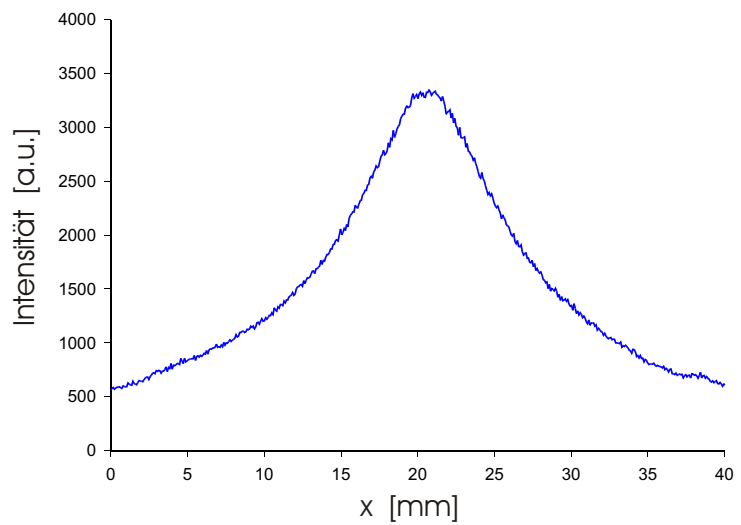
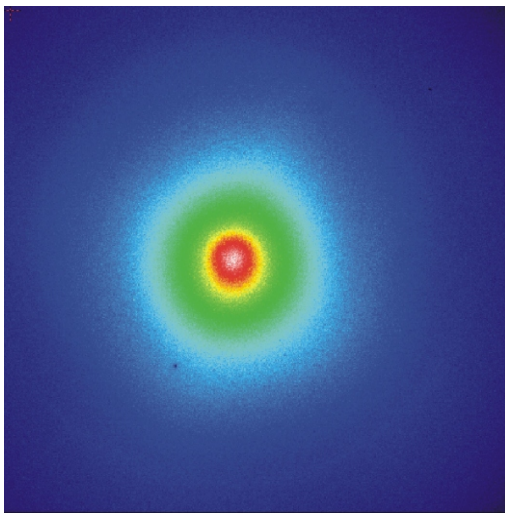


C) Anode = 4000 V

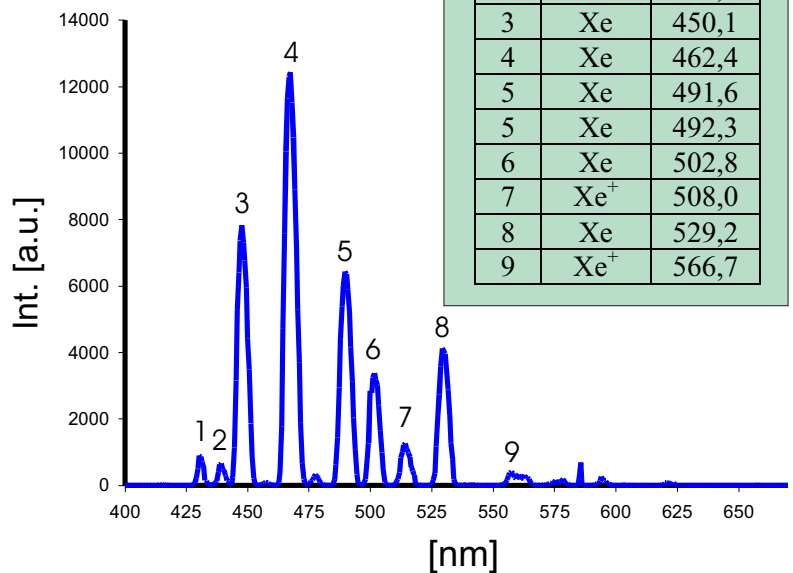
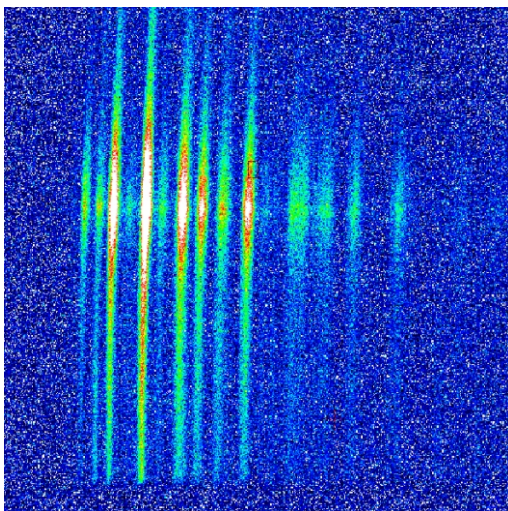


# Plasmaanalyse durch Beobachtung des Restgasleuchtens

Messung der Verteilung der Leuchtintensität



## Optische Spektroskopie des Restgasleuchtens



Nr.	Quelle	[nm]
1	Xe <sup>+</sup>	429,0
2	Xe <sup>+</sup>	433,0
3	Xe	450,1
4	Xe	462,4
5	Xe	491,6
5	Xe	492,3
6	Xe	502,8
7	Xe <sup>+</sup>	508,0
8	Xe	529,2
9	Xe <sup>+</sup>	566,7

## Aufbau Testinjektor 1

Strahlenergie  $U_{\text{End}} = 440 \text{ kV}$

Strahlstrom  $I_{\text{End}} = 10 \text{ mA}$

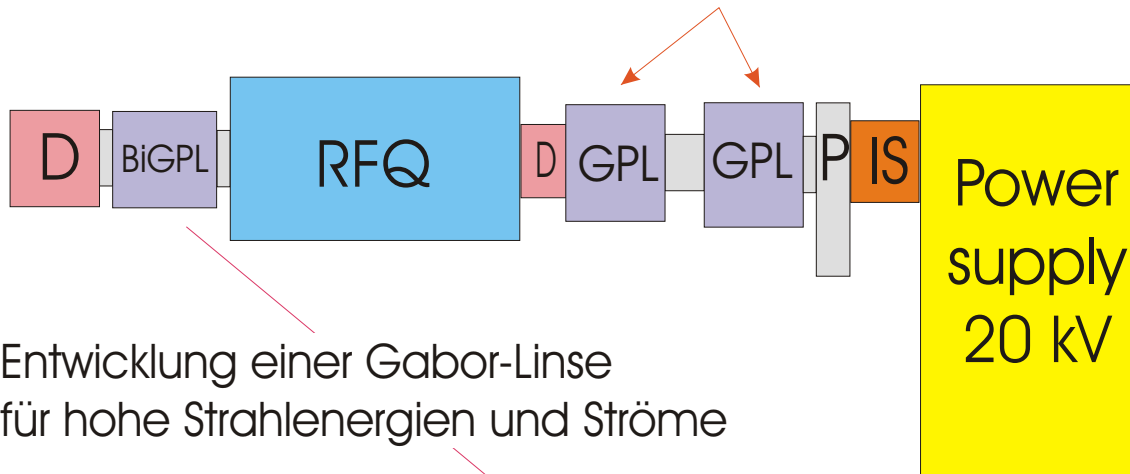
generalisierte Perveanz  $K = 4,45\text{E-}5$

Strahlenergie  $U_{\text{Ex}} = 14 \text{ kV}$

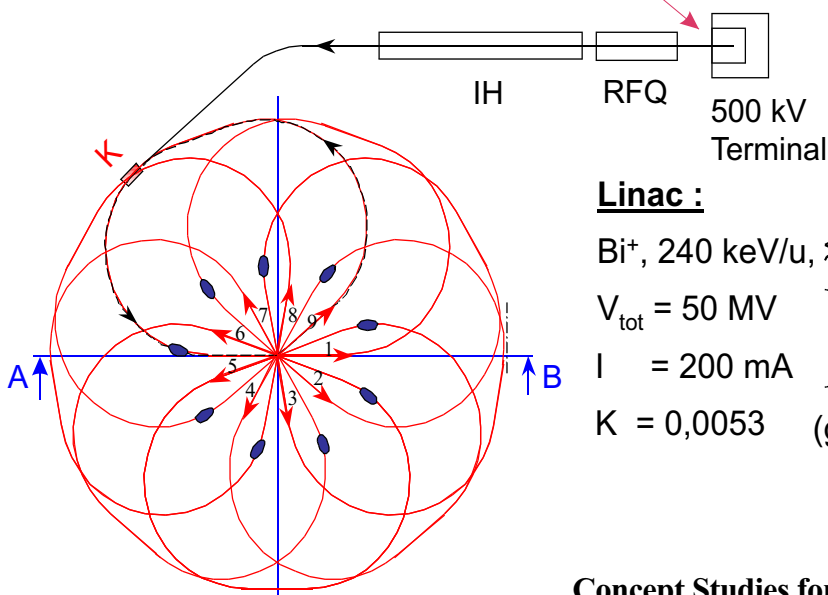
Strahlstrom  $I_{\text{Ex}} = 10 \text{ mA}$

generalisierte Perveanz  $K = 0,00783$

### LEBT-Sektion aus Gabor-Linsen



Entwicklung einer Gabor-Linse  
für hohe Strahlenergien und Ströme



generalisierte Perveanz

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \sqrt{\frac{Am}{2e\zeta}} \cdot \frac{I}{U^{\frac{3}{2}}}$$

### Linac :

$\text{Bi}^+$ , 240 keV/u,  $\lesssim 500 \text{ s}$

$V_{\text{tot}} = 50 \text{ MV}$  } 10 MW

$I = 200 \text{ mA}$

$K = 0,0053$  (generalisierte Perveanz)

### Concept Studies for a Frankfurt Plasma Generator<sup>+</sup>

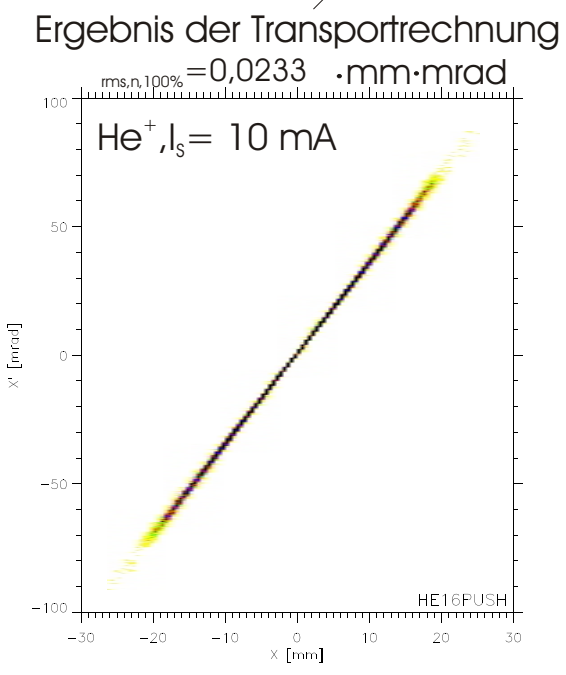
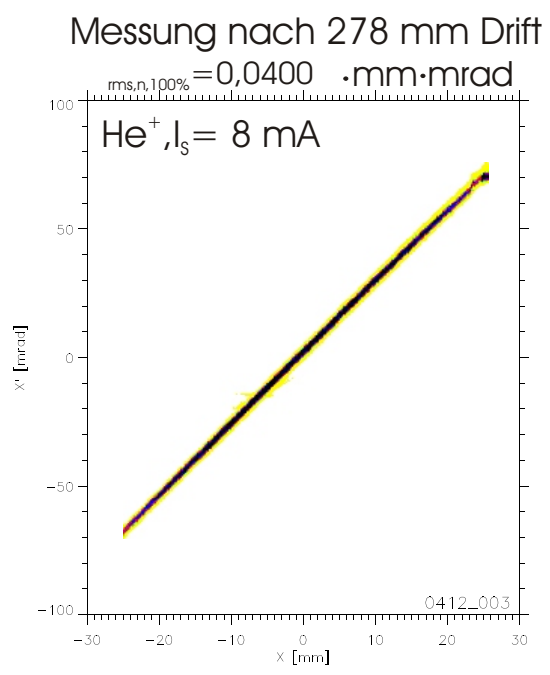
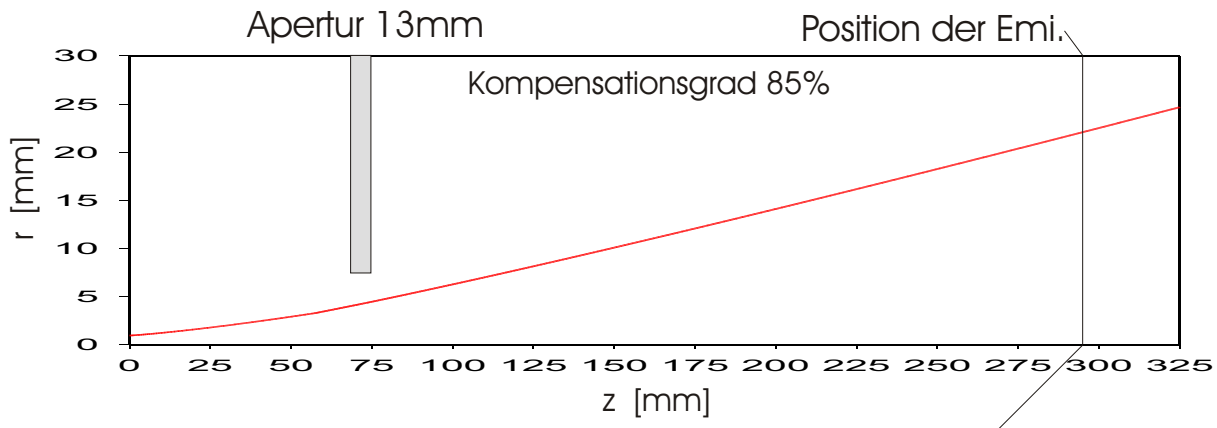
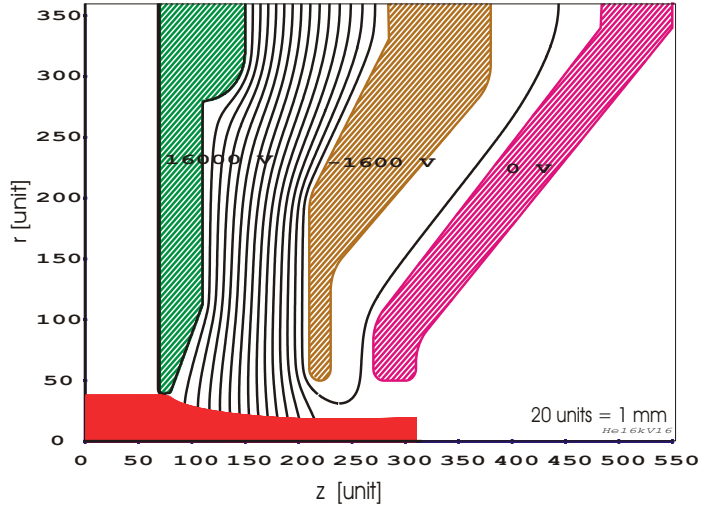
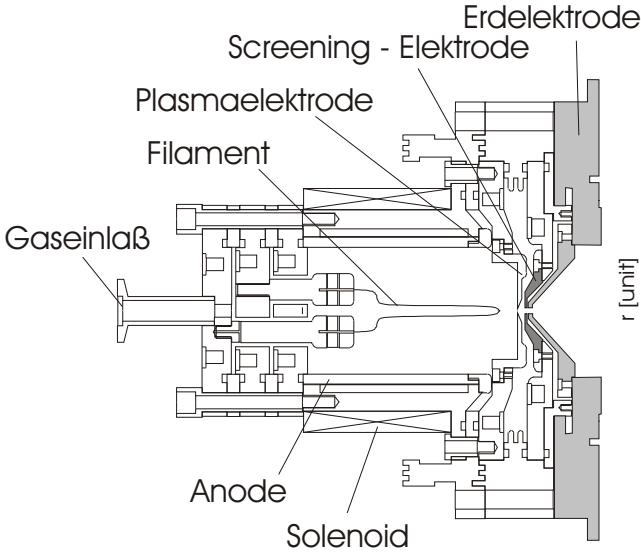
U. Ratzinger

Institut für Angewandte Physik, Universität Frankfurt

J. A. Maruhn

Institut für Theoretische Physik, Universität Frankfurt

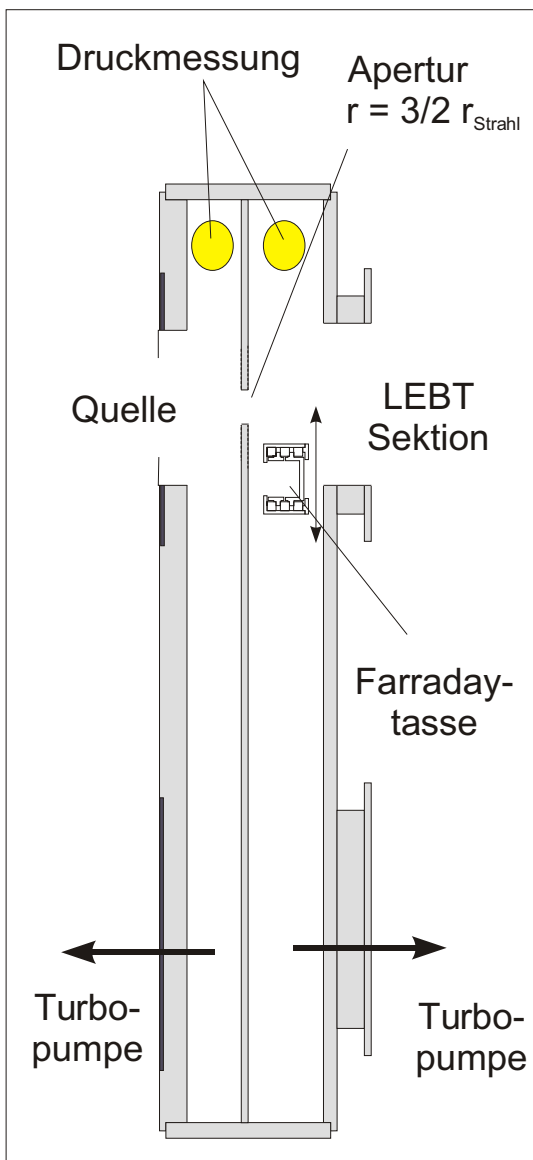
# Ionenquelle und Extraktionssystem



## Differentielles Pumpen und erste Diagnose

Der Restgasdruck korrespondiert mit:

Transmission  
Kompensationsgrad  
Strahldiagnose (Restgasleuchten, RGI)

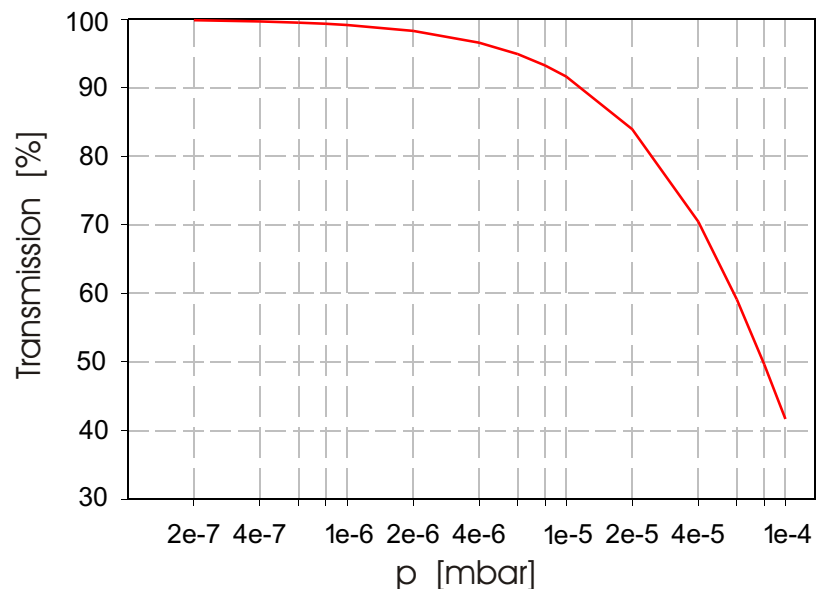


Berechnung der Transmission für den Verlust von Strahlionen durch Umladung

$$s = 600 \text{ mm}$$

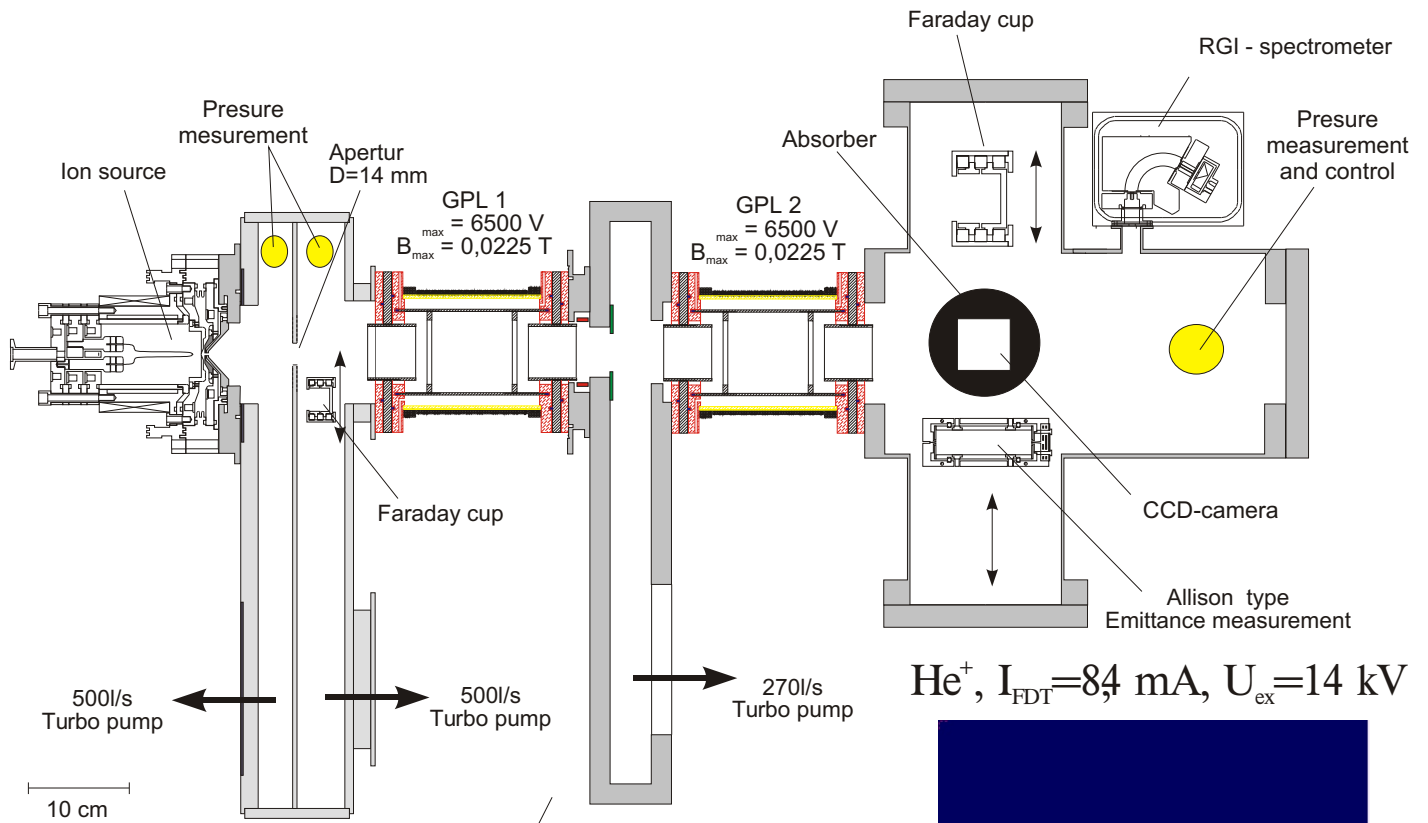
$$\sigma_{\text{ww}} = 5,9 \text{e-}20 \text{ m}^2$$

$$n_{\text{neutral}} = n_{\text{Si}} \cdot e^{-n_{\text{RGA}} \cdot \sigma_{\text{ww}} \cdot s}$$

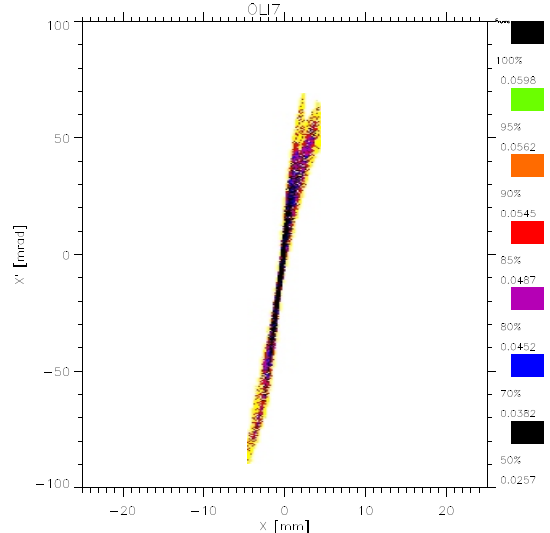
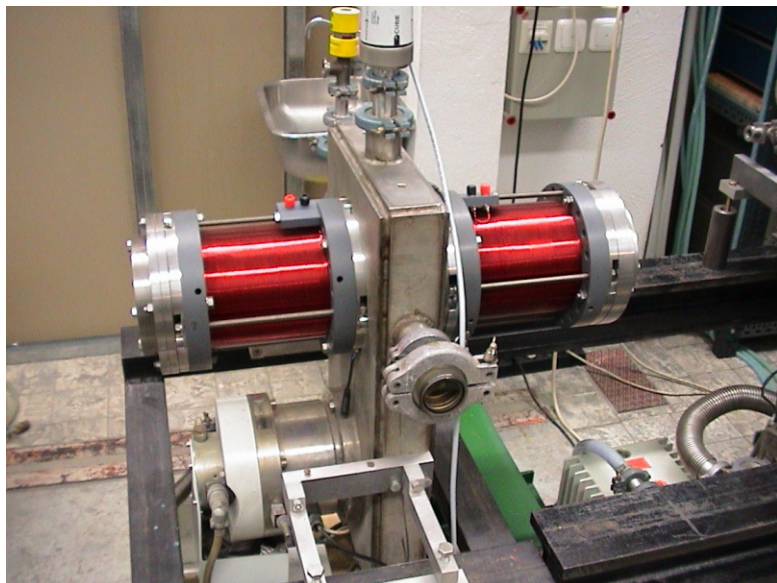
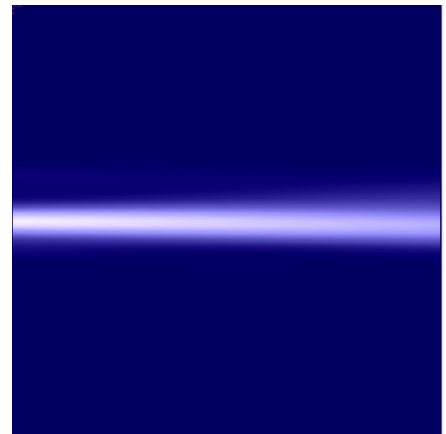


# Schematischer Aufbau der He<sup>+</sup> - LEBT

$U_{ex} = 14 \text{ kV}$ ,  $I_{ex} = 10 \text{ mA}$

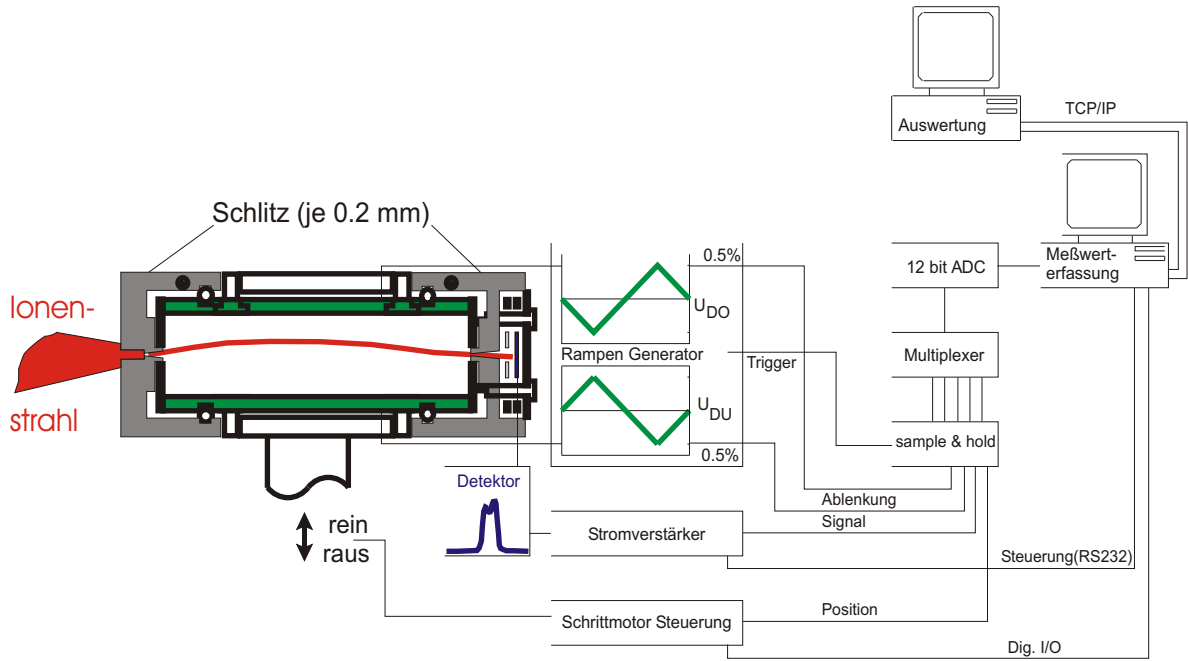


He<sup>+</sup>,  $I_{FDT} = 84 \text{ mA}$ ,  $U_{ex} = 14 \text{ kV}$

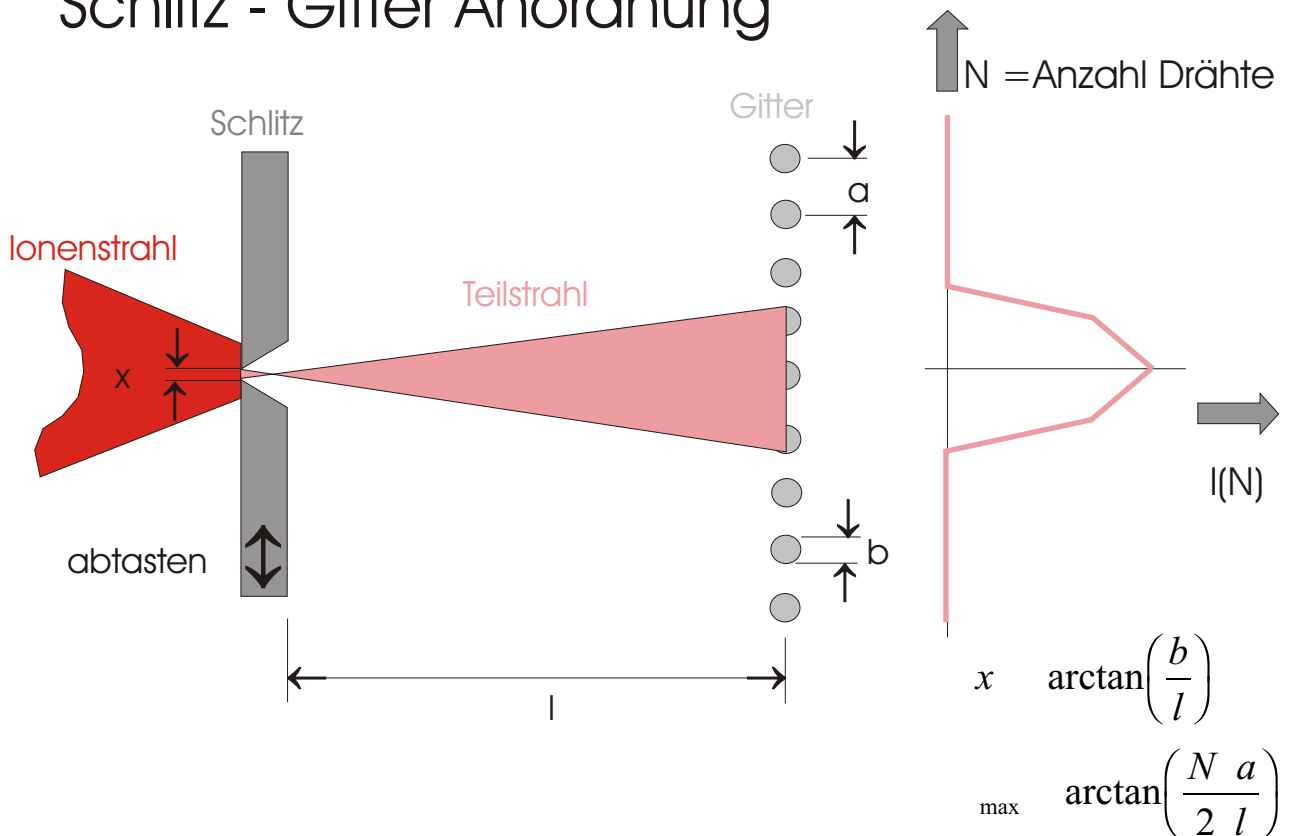




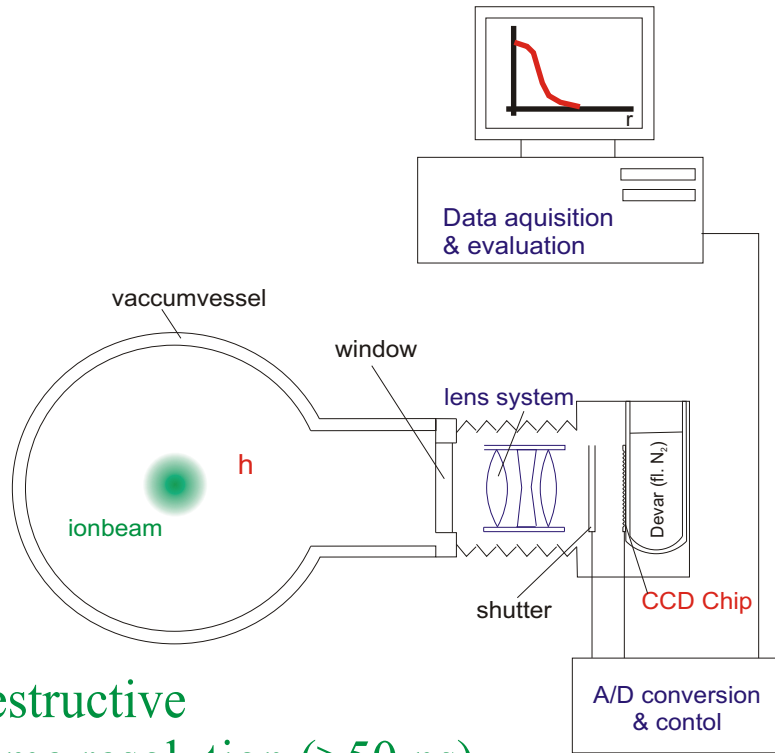
# Emittanzmessung mit Allison-Scanner



## Emittanzmessung Schlitz - Gitter Anordnung

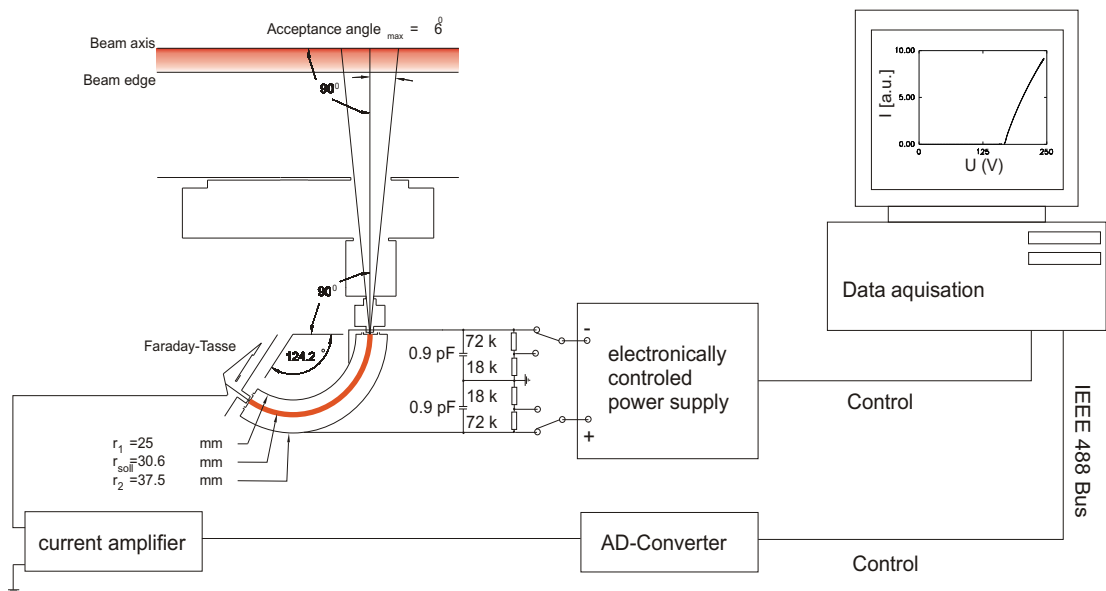


# Strahlprofilmessung mit CCD-Kamera



- \* non destructive
- \* high time resolution ( $>50$  ns)

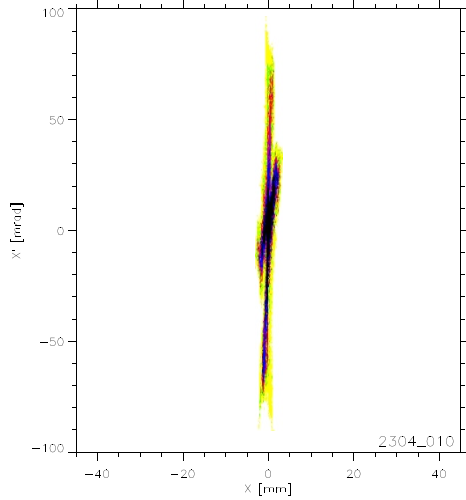
# Strahlpotentialmessung mit Restgasionen-energiespektrometer



## Strahltransport durch die GPL - LEBT

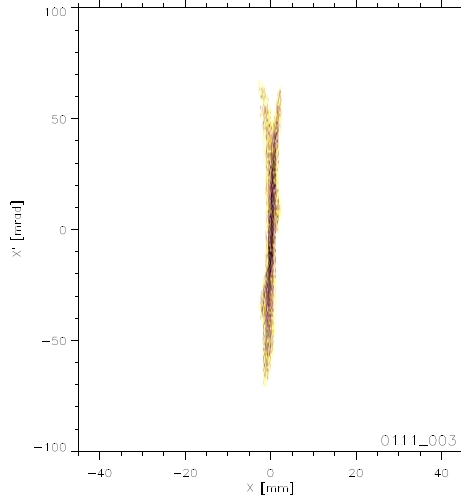
Allison-Scanner

rms,n,100%=0.062 mmmrad



Schlitz-Gitter

rms,n,100%=0.075 mmmrad



Strahlparameter

$$U_{ex} = 14 \text{ kV}$$

$$I_{ex} = 8,61 \text{ mA}$$

Linsenparameter

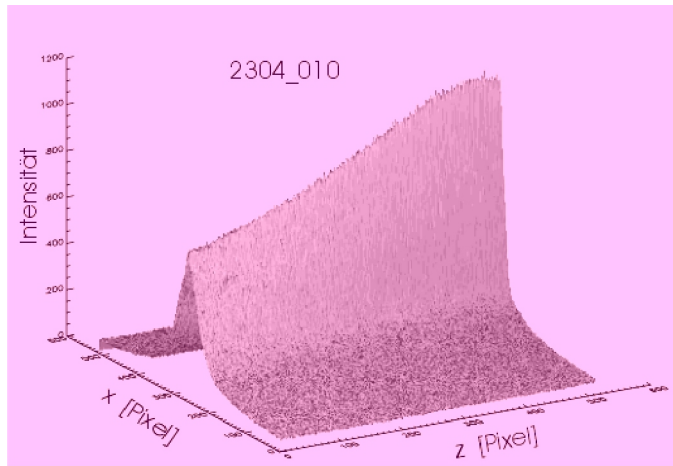
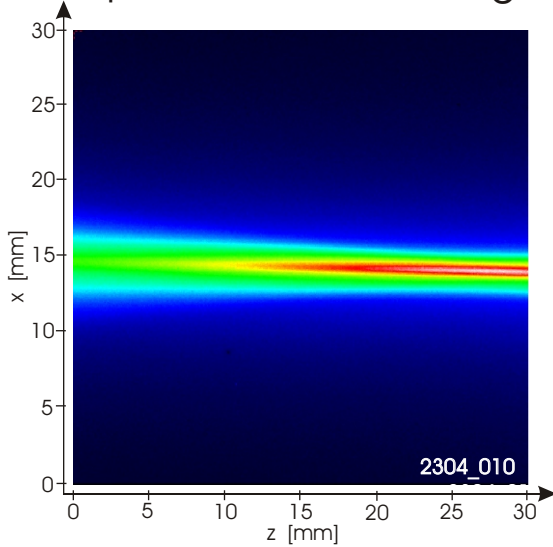
$$B_{z,max} = 7,9E-3 \text{ T}$$

$$\Phi_{anode} = 1,85 \text{ kV}$$

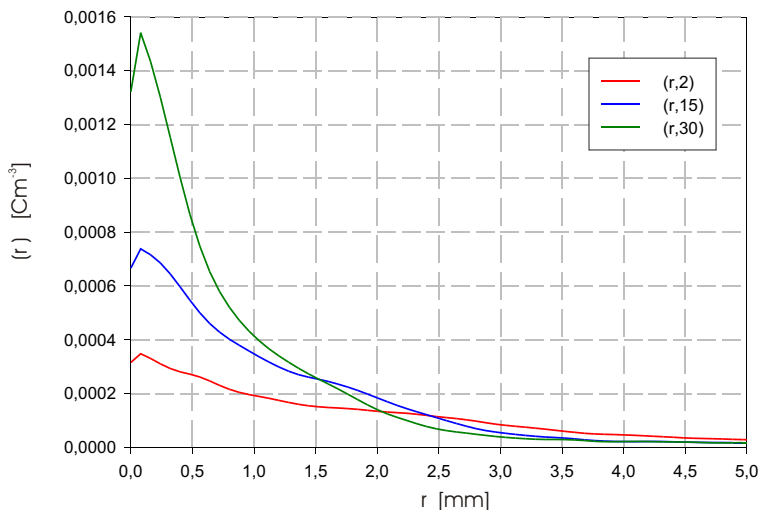
$$B_{z,max} = 8,1E-3 \text{ T}$$

$$\Phi_{anode} = 1,95 \text{ kV}$$

optische Profilmessung



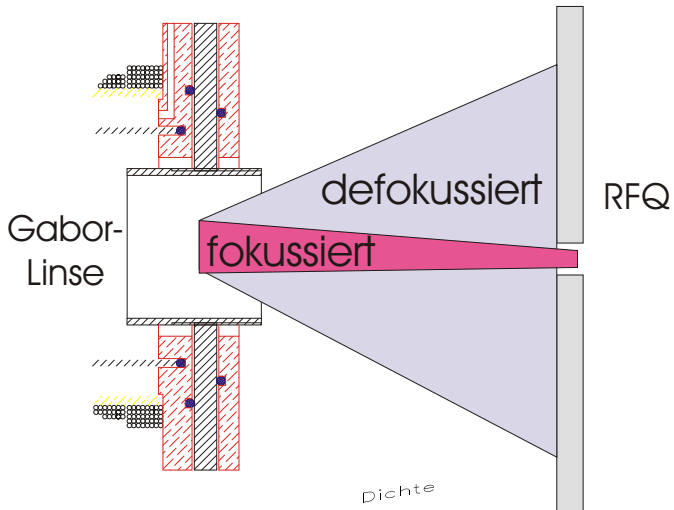
Strahlionendichteprofile



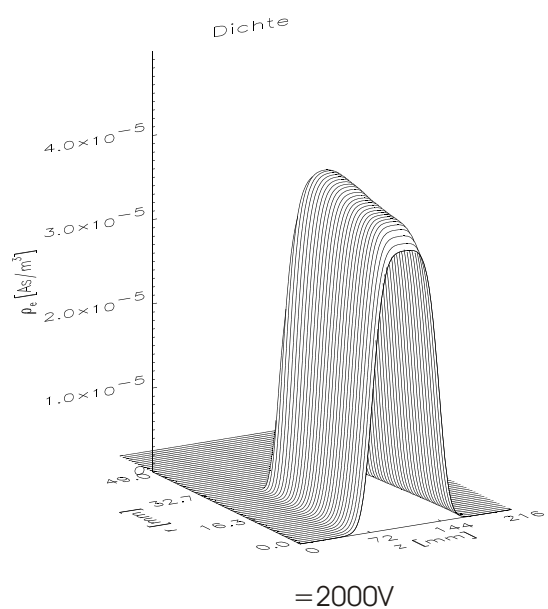
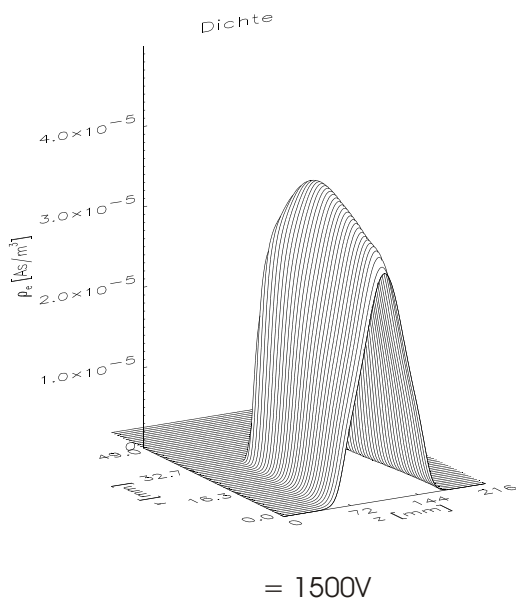
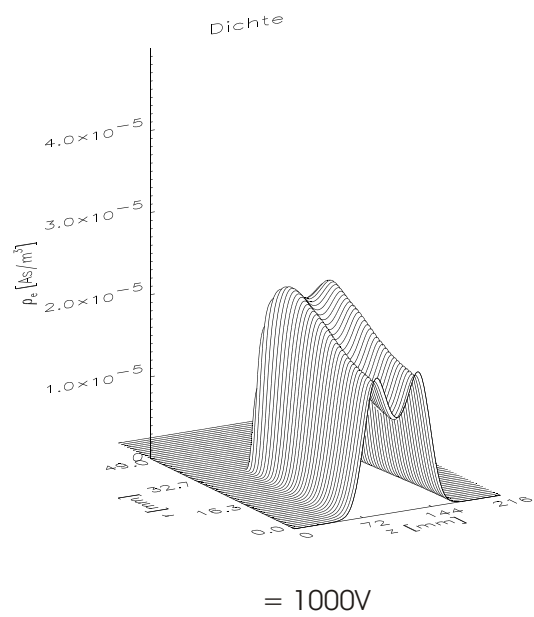
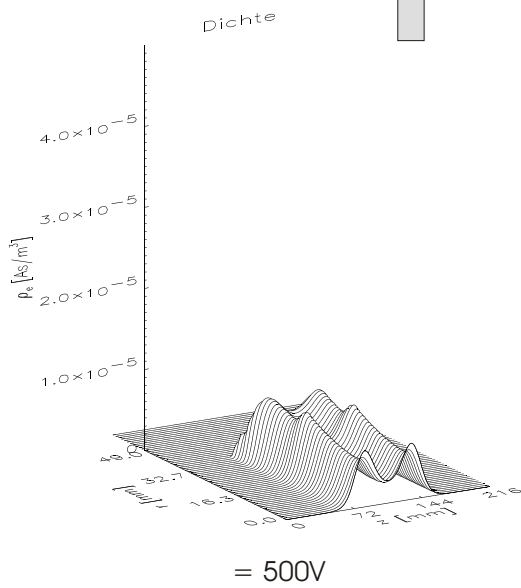
Abelinversion

$$\rho(r) = K \int_r^{\infty} \frac{\left(\frac{dI}{dx}\right) dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}$$

# Pulsung der Gabor-Linse



- Untersuchung des zeitlichen Verhaltens bei Änderung der äußeren Felder
- Eignung als Pre-Chopper
- Reduktion der Leistungsdichte nach dem RFQ

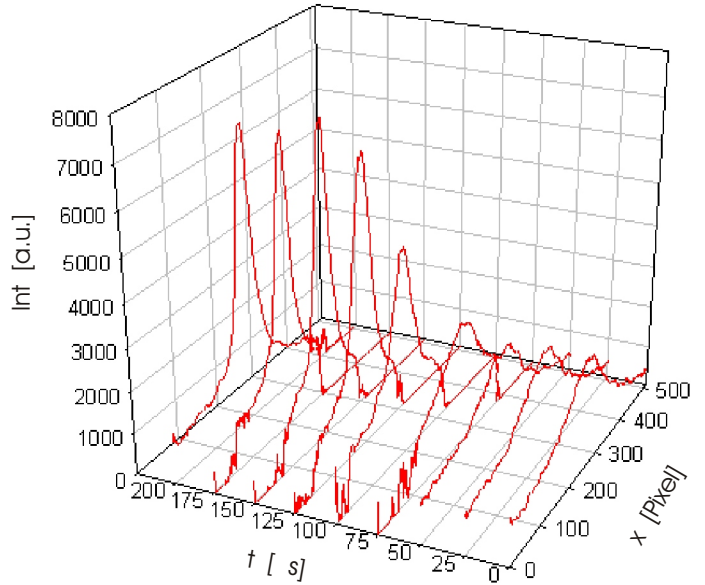
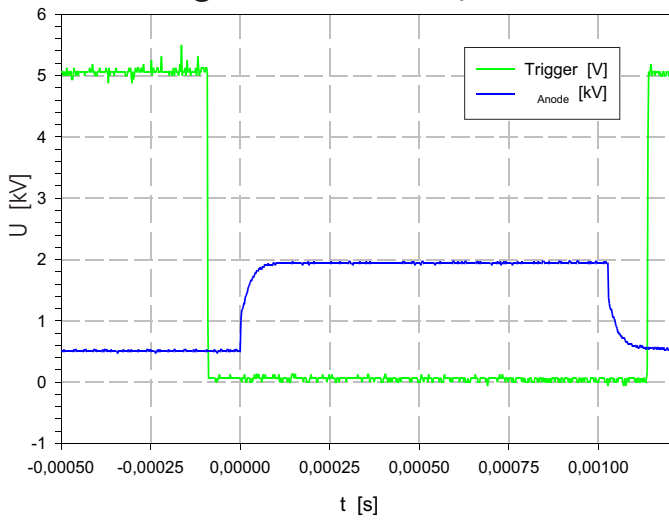


# Pulsung der Gabor-Linse erste Meßergebnisse

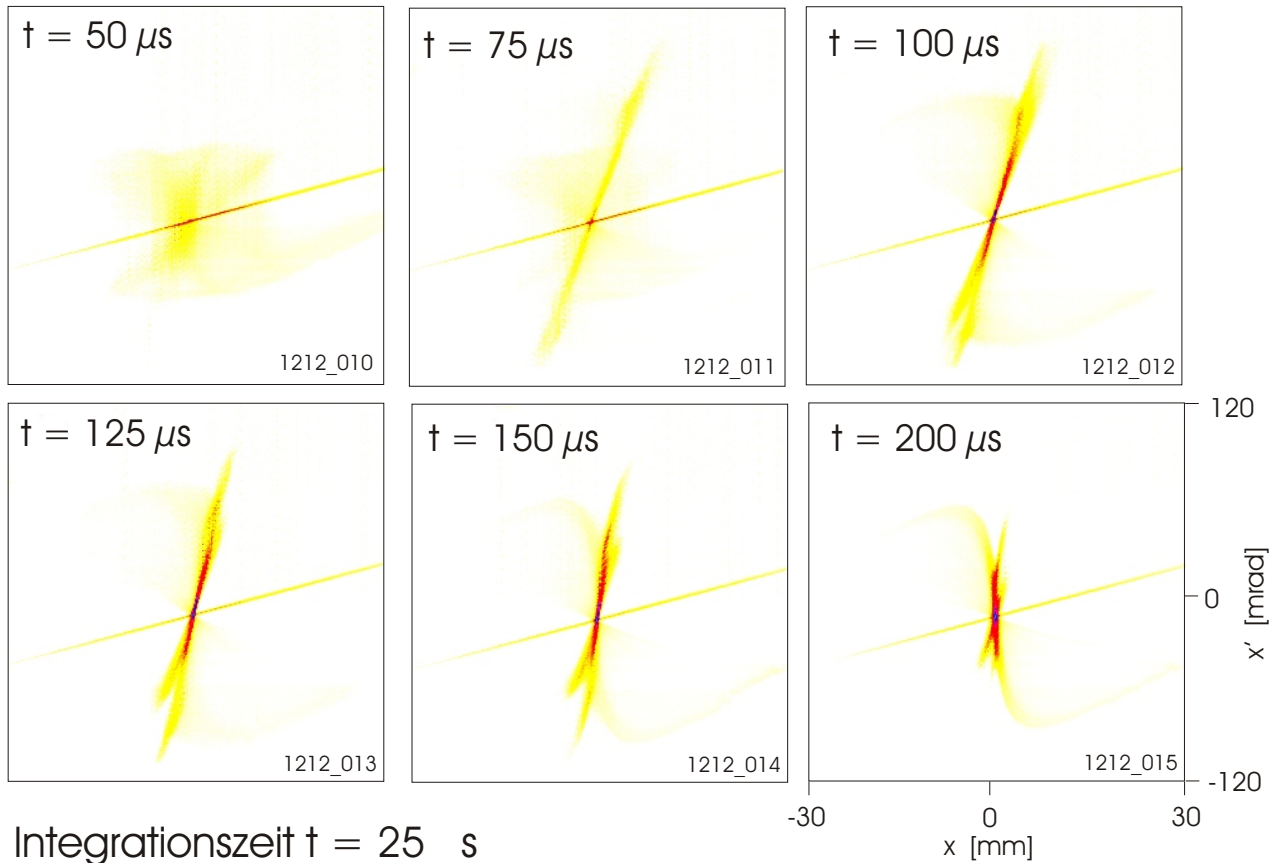
$f = 50 \text{ Hz}$   
Pulslänge = 1 ms

zeitliche Entwicklung  
des Strahlprofils

Pulsung des Anodenpotentials

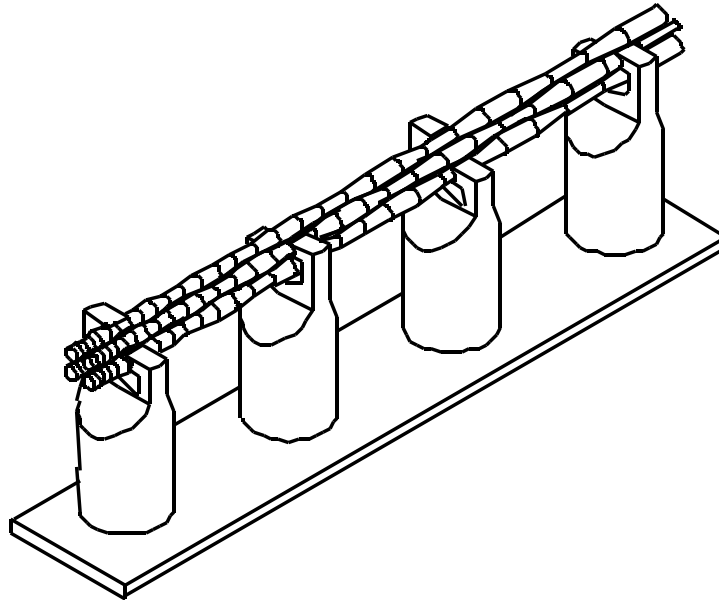


zeitliche Entwicklung der Phasenraumverteilung



in Zusammenarbeit mit der AG Schempp

## Four - Rod - RFQ

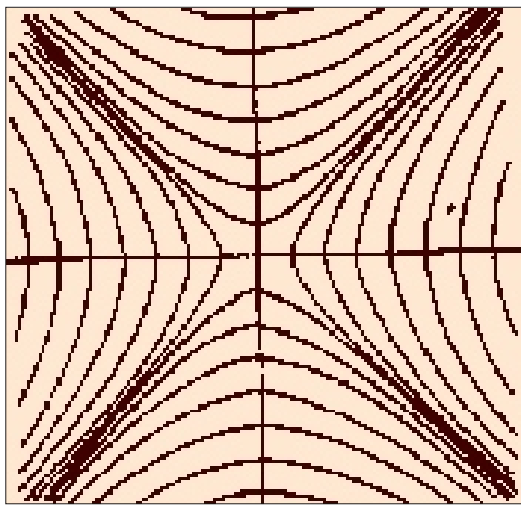


Eingangsenergie:	3,5 keV/u
Ausgangsenergie:	110 keV/u
Elektrodenspannung:	80 kV
Strahlstrom:	10 mA
Tastverhältnis:	33 %
Masse/Ladung:	16
Betriebsfrequenz:	108,48 MHz

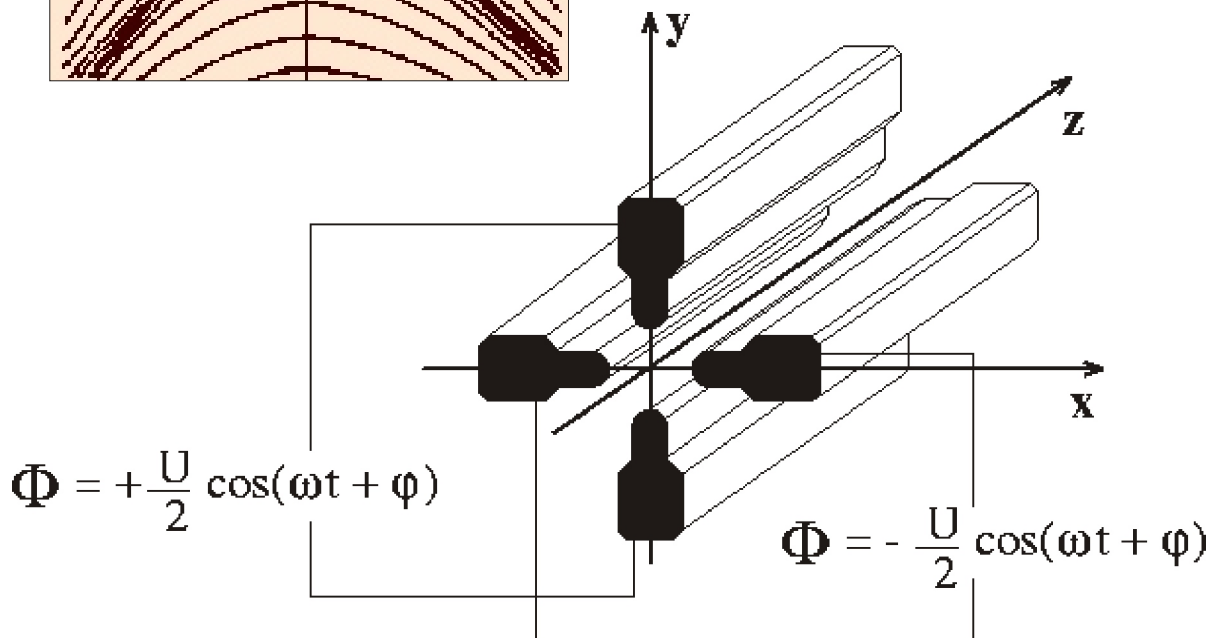


in Zusammenarbeit mit der AG Schempp

## Einfluß der Quadrupolfelder auf den Strahltransport am Eingang des RFQ

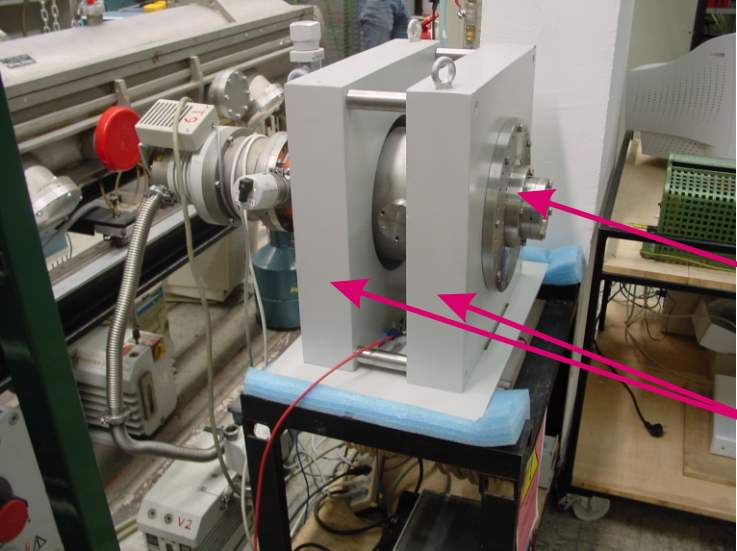


dekompensierter Strahltransport am Übergabepunkt zwischen LEBT - Sektion und RFQ



Untersuchung der Transmission und des Emittanzwachstums beim Transport durch den RFQ in Abhängigkeit von den Einschubparametern

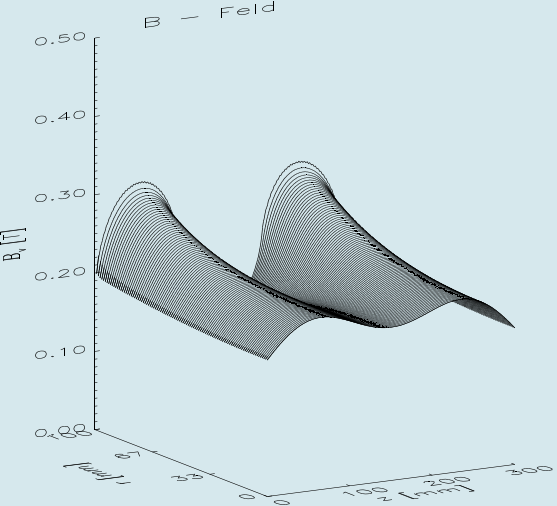
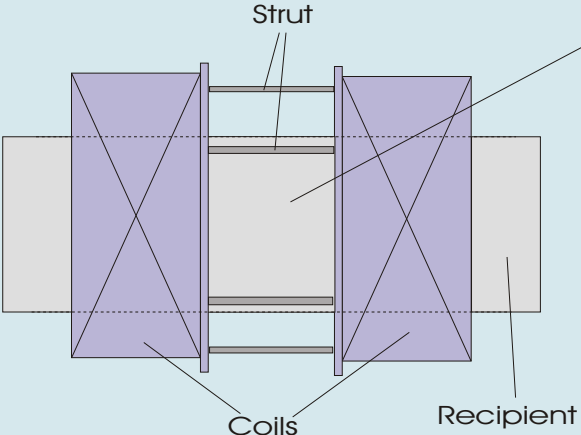
**Aufbau und externe Felder der großen Gabor-Linse**



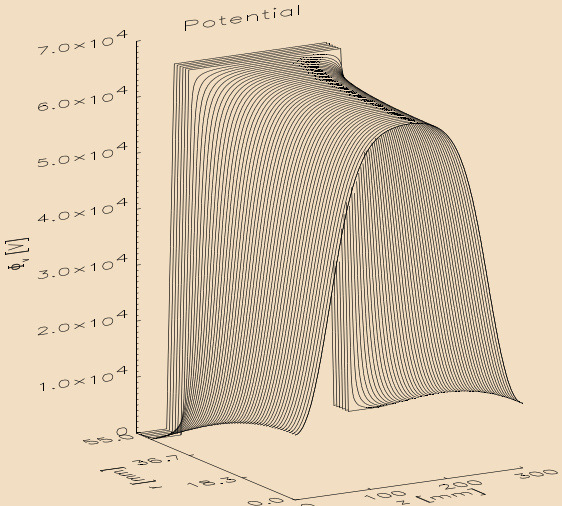
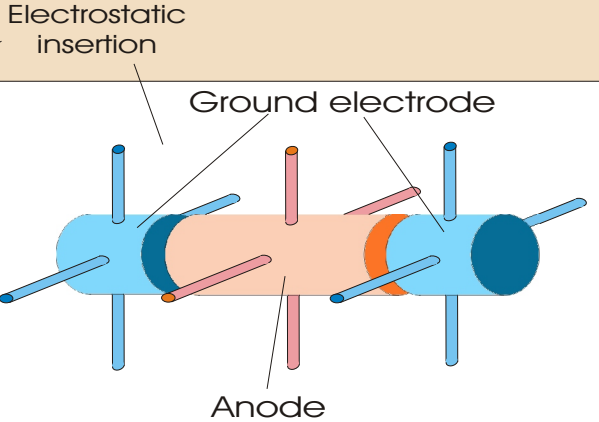
Vacuumrezipient mit Elektrodensystem

Helmholtz-Spule

**radialer Einschluß**



**longitudinaler Einschluß**

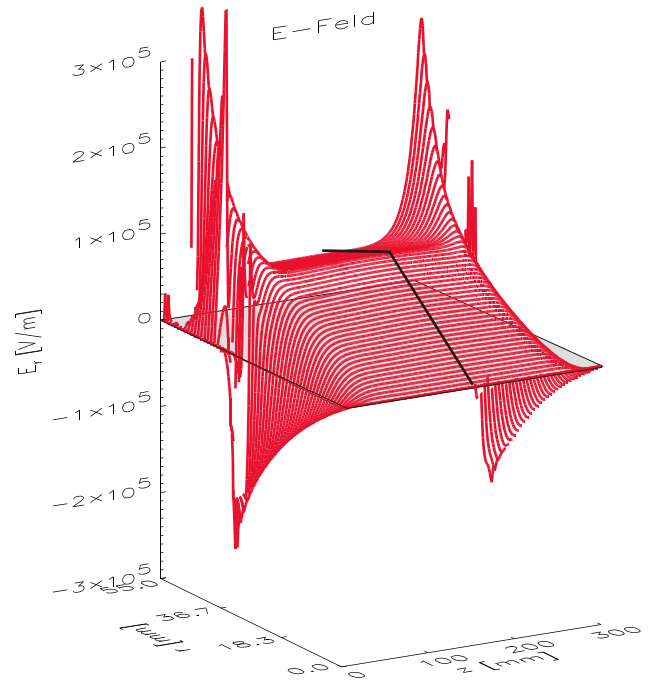
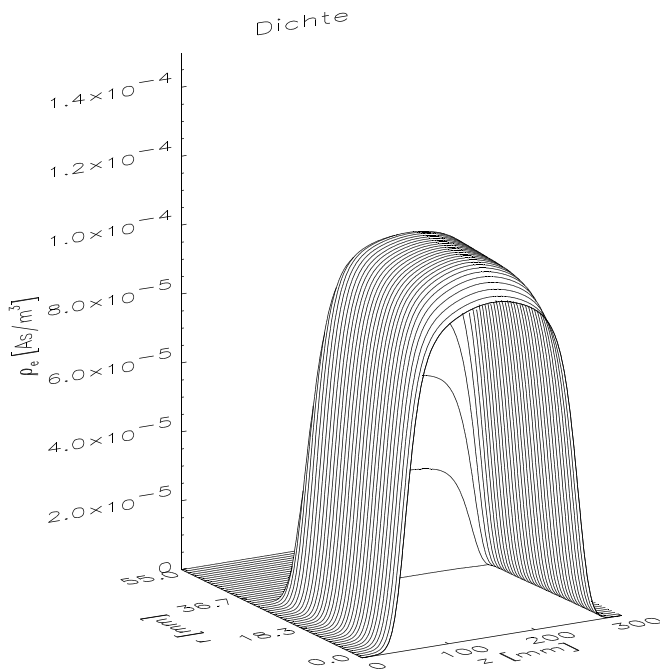




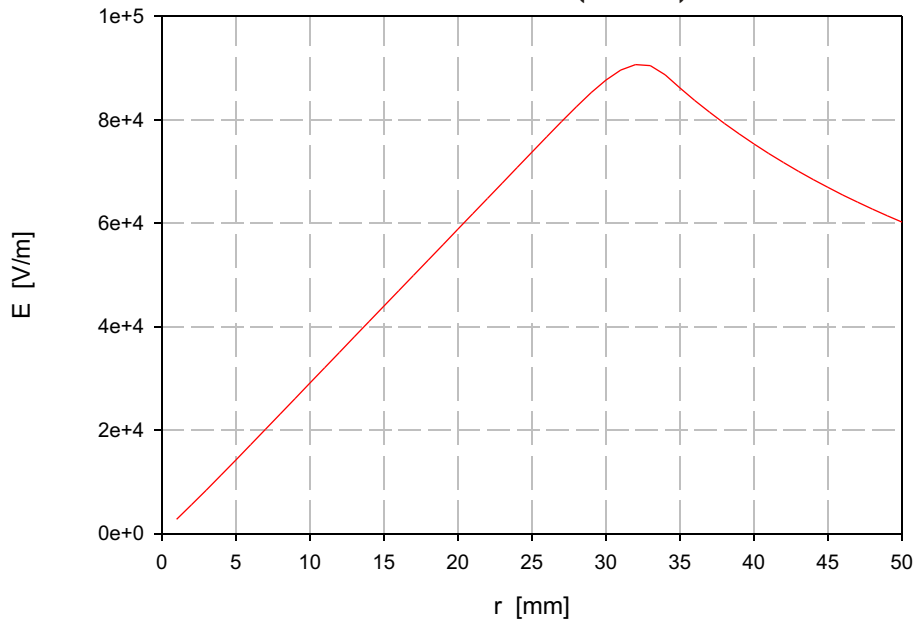
Numerische Simulation der Elektronendichte und des resultierenden elektrischen Feldes

Linienparameter

$B_{z,max} = 0,15 \text{ T}$   
 $\Phi_{max} = 10 \text{ kV}$



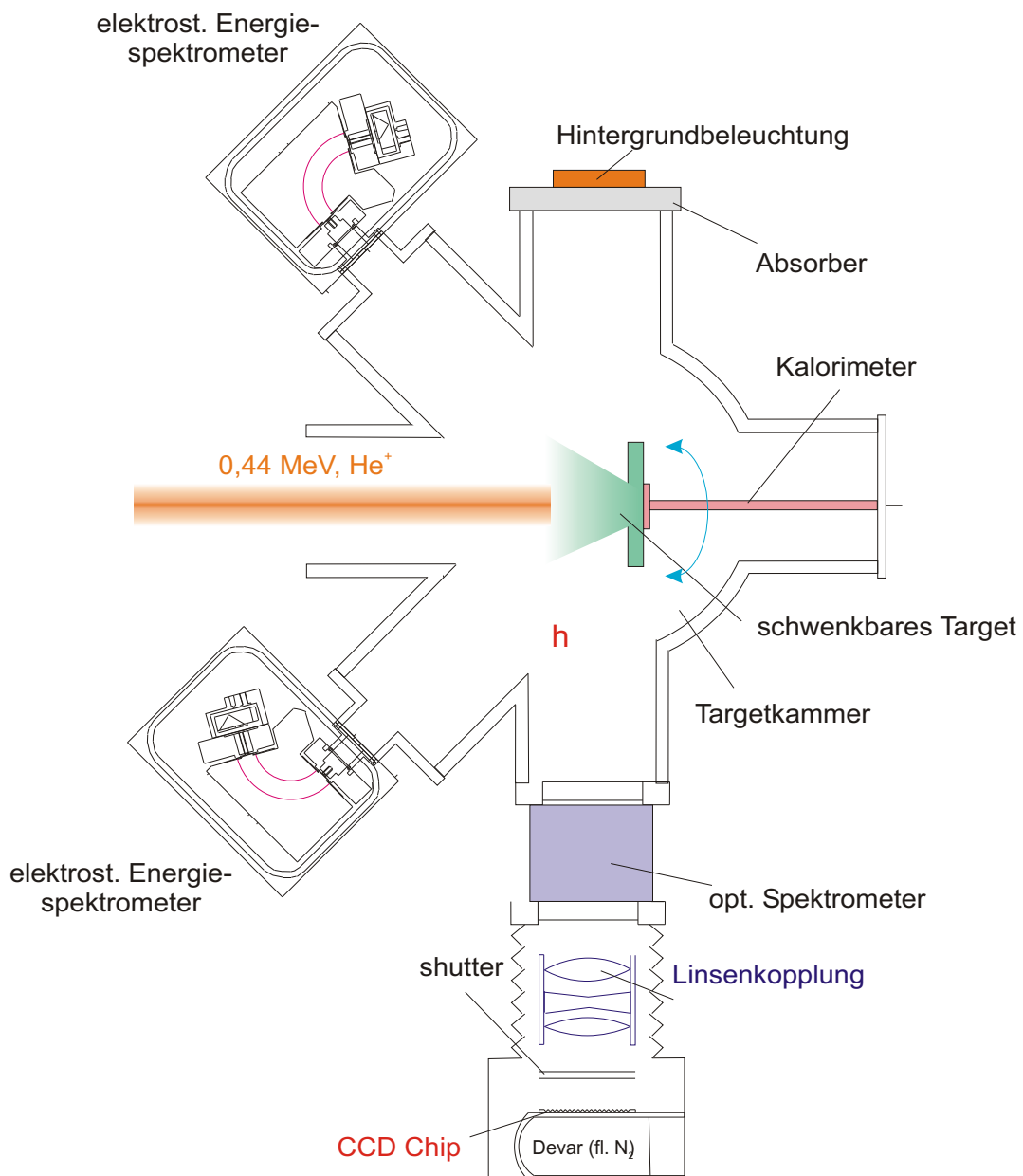
Feldverlauf  $E(r, 150)$



## Ionenstrahlgeneriertes Plasma

Untersuchung der:

- Plasmaeigenschaften
- Wechselwirkungsmechanismen zwischen Ionenstrahl und generiertem Plasma
- Energiebilanz



## Ende des Vortrags und der Entwicklung der Gabor - Linse?

offene Fragen bei der Linsendiagnostik:

- Temperaturbestimmung (opt. Spektroskopie)
- Dichtebestimmung (Mikrowelleninterferometrie)
- Dichteverteilung (Fadenstrahlexperiment)
- Aufbauzeit als Funktion des Restgasdruckes
- Transport gepulster Strahlen

offene Fragen bei den Einsatzmöglichkeiten:

- Hochstrominjektoren
- MEBT - Sektionen
- Ringe
- H<sup>-</sup> - Transport