



Bestimmung der
Korrespondenz
zwischen
Strahlprofil Messungen
mit einer
CCD-Kamera
und der
Emittanz

Beschleunigerpalaver der GSI
06.12.2001

J. Pozimski

- Motivation
- Methodik / Theorie
- Messungen / Auswertungen
- Zusammenfassung



Emittanz

Vollständige Beschreibung des Verhaltens
eines Ionenstrahles aus N Teilchen
im $6N$ dimensionalen Phasenraum

$$\Gamma_{6N}$$

Beschränkung auf den transversalen Unterraum:

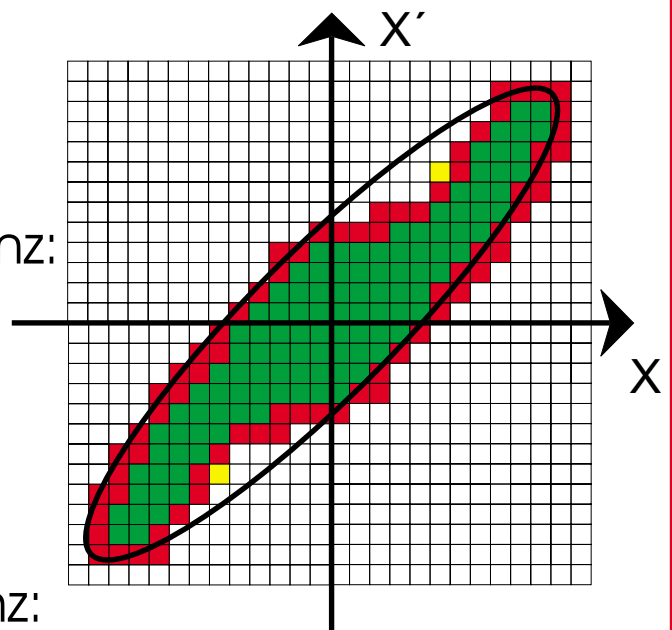
$$f_4 = f(x, y, x', y')$$

Emittanz der einhüllenden Phasenraumellipse:

$$\varepsilon_{n, Ellipse} = \beta\gamma \frac{F_{Ellipse}}{\pi}$$

Normierte Randemittanz:

$$\varepsilon_{n, Rand} = \beta\gamma \frac{N \cdot F_{Zelle}}{\pi}$$



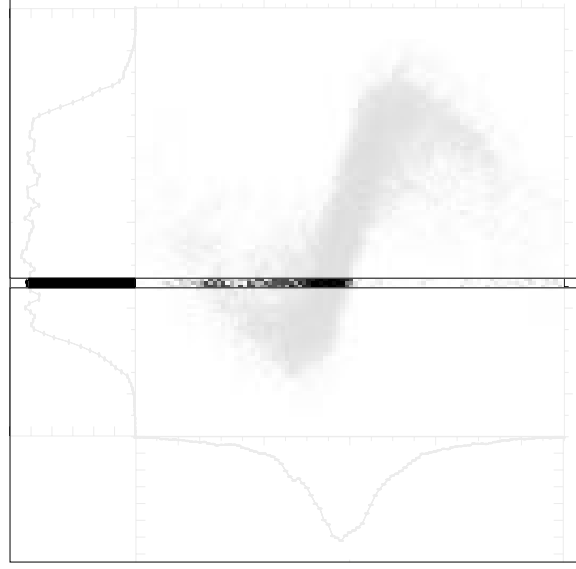
Normierte RMS Emittanz:

$$\varepsilon_{n, RMS, 100\%} = \beta\gamma \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

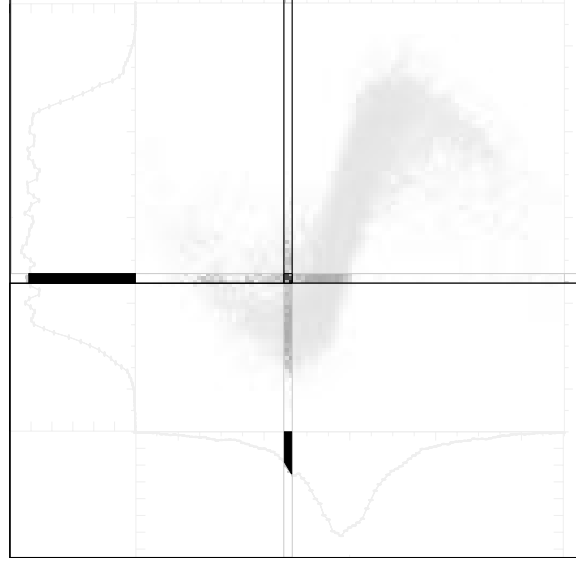


Klassische Bestimmung der Emittanz in einem 2-stufigen, zerstörenden Messprozess

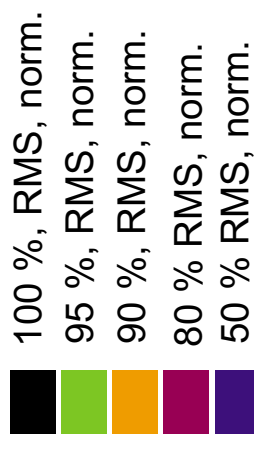
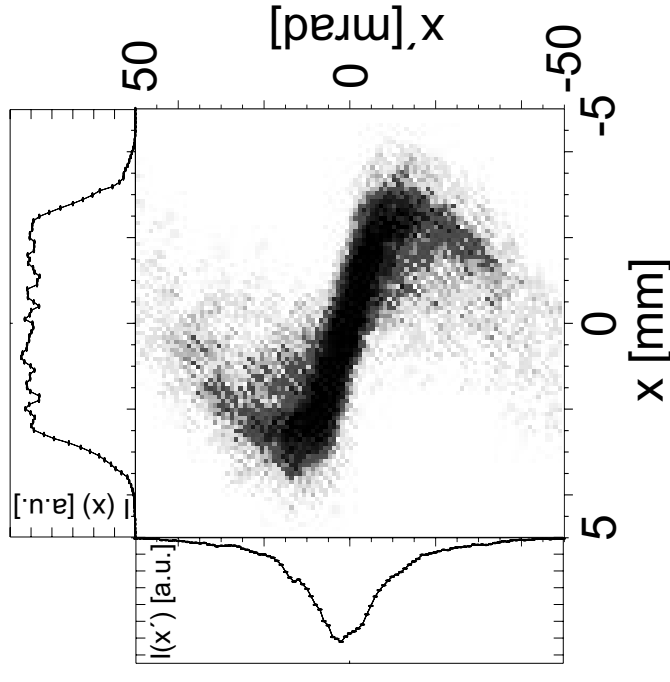
1.) Festlegung des Meßortes



2.) Festlegung des Winkels



3.) Variation von Ort und Winkel

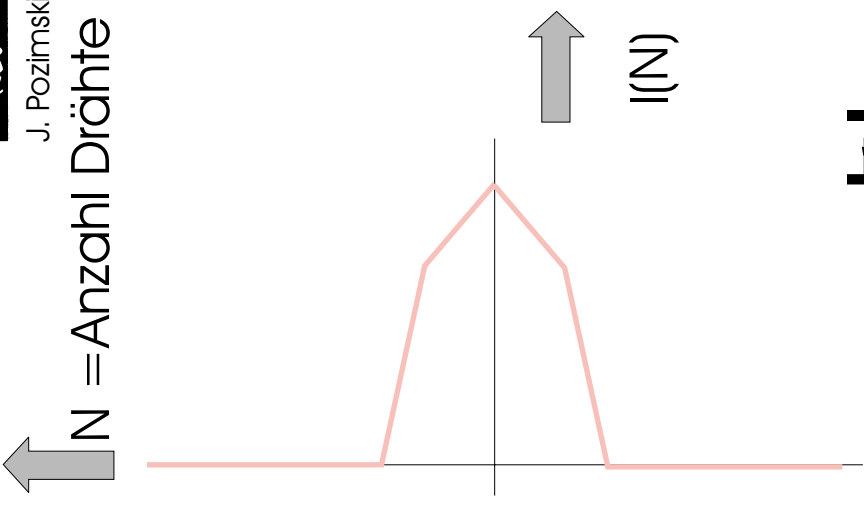
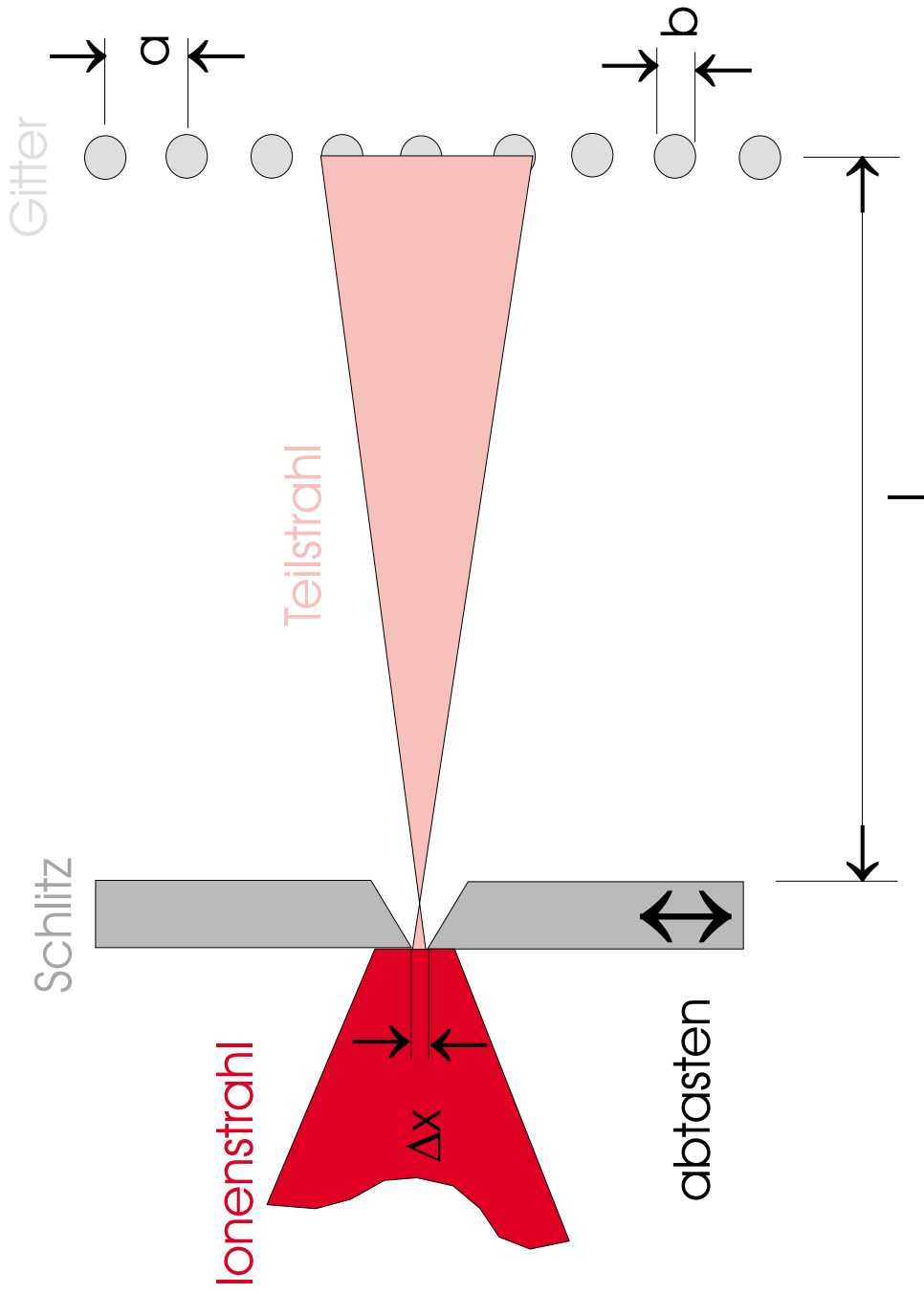


Emittanzmessung Schlitz - Gitter Anordnung



J. Pozimski

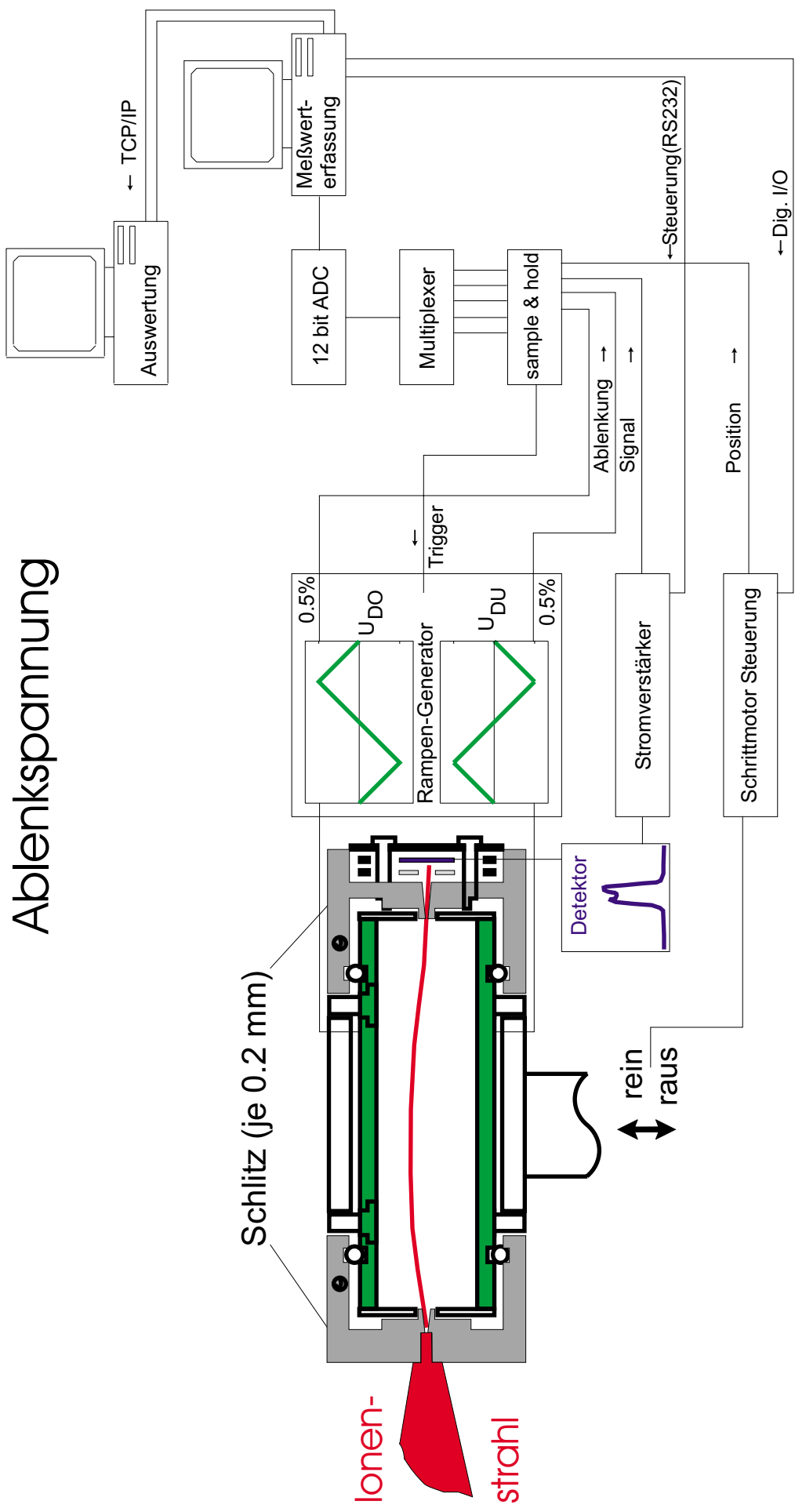
N = Anzahl Drähte



$$\Delta x' = \arctan \frac{b}{l}$$

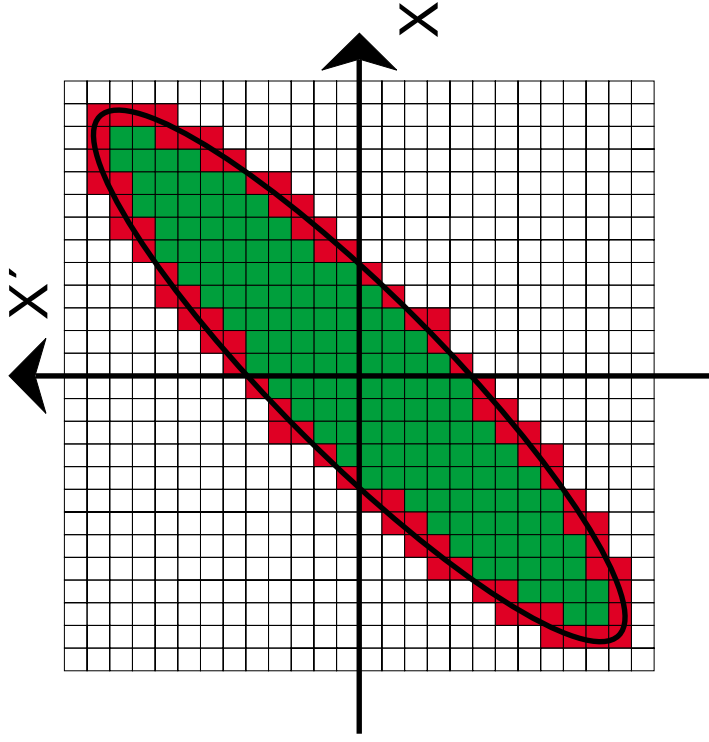
$$\alpha_{\max} \cong \arctan \frac{N \cdot a}{2 \cdot l}$$

Allison-Prinzip: Winkelselektion durch Plattenkondensator mit variabler Ablenkspannung





Diskretisierungsfehler bei Emittanzmessungen



■ = Innenzelle

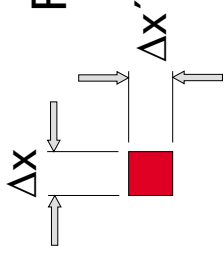
■ = Randzelle

Δx = Ortsauflösung

$\Delta x'$ = Winkelauflösung

N = Anzahl belegter Zellen

M = Anzahl belegter Randzellen



Fläche einer Phasenraumzelle:

$$F_{Zelle} = \Delta x \cdot \Delta x'$$

Belegte Phasenraumfläche:

$$\pi \varepsilon \simeq F = N \cdot F_{Zelle}$$

Beispiel :

$$\Delta x = 1 \text{ mm}$$

$$\Delta x' = 1 \text{ mrad}$$

$$N = 220$$

$$M = 78$$

$$\varepsilon_{\text{Feh dr}} < 48 \text{ } (\sim 25 \%)$$

Belegte Randfläche im Phasenraum:

$$2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{\text{Fehler}} \simeq F_{\text{Rand}} = M \cdot F_{\text{Zelle}}$$

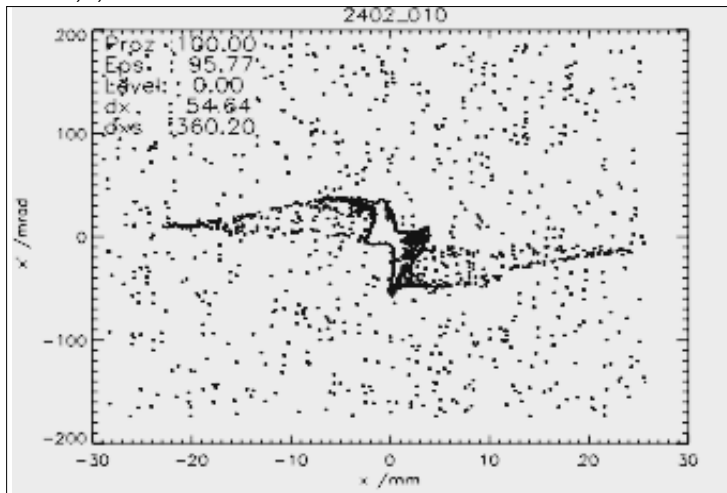
Maximaler Fehler durch Diskretisierung:

$$\varepsilon_{\text{Fehler}} < \frac{2 \mathbf{a}_{\text{max}} \Delta x' + x'_{\text{max}} \Delta x}{\pi}$$



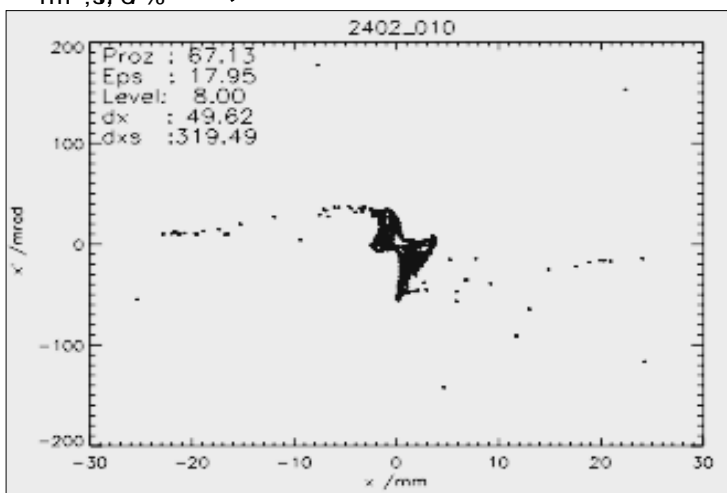
Der Einfluss des Messwerttrauschens auf die RMS - Emittanz

$$\epsilon_{\text{rm}, \text{st} 100\%} = 0,0957 \pi \text{ mmmrad}$$



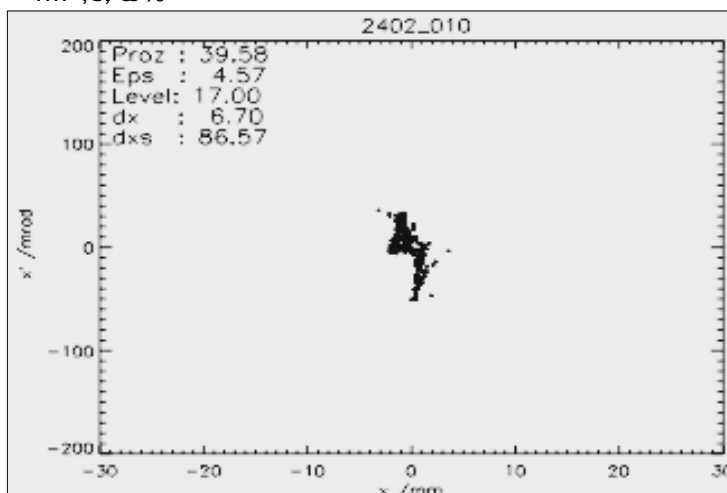
Das Messwerttrauschen dominiert die RMS - Emittanz.

$$\epsilon_{\text{rm}, \text{st} 6\%} = 0,0179 \pi \text{ mmmrad}$$



Das Messwerttrauschen trägt nur unwesentlich zur RMS - Emittanz bei, die Phasenraumverteilung bleibt erhalten.

$$\epsilon_{\text{rm}, \text{st} 3\%} = 0,0045 \pi \text{ mmmrad}$$



Die vollständige Reduktion des Messwerttrauschens führt zu einem Informationsverlust.



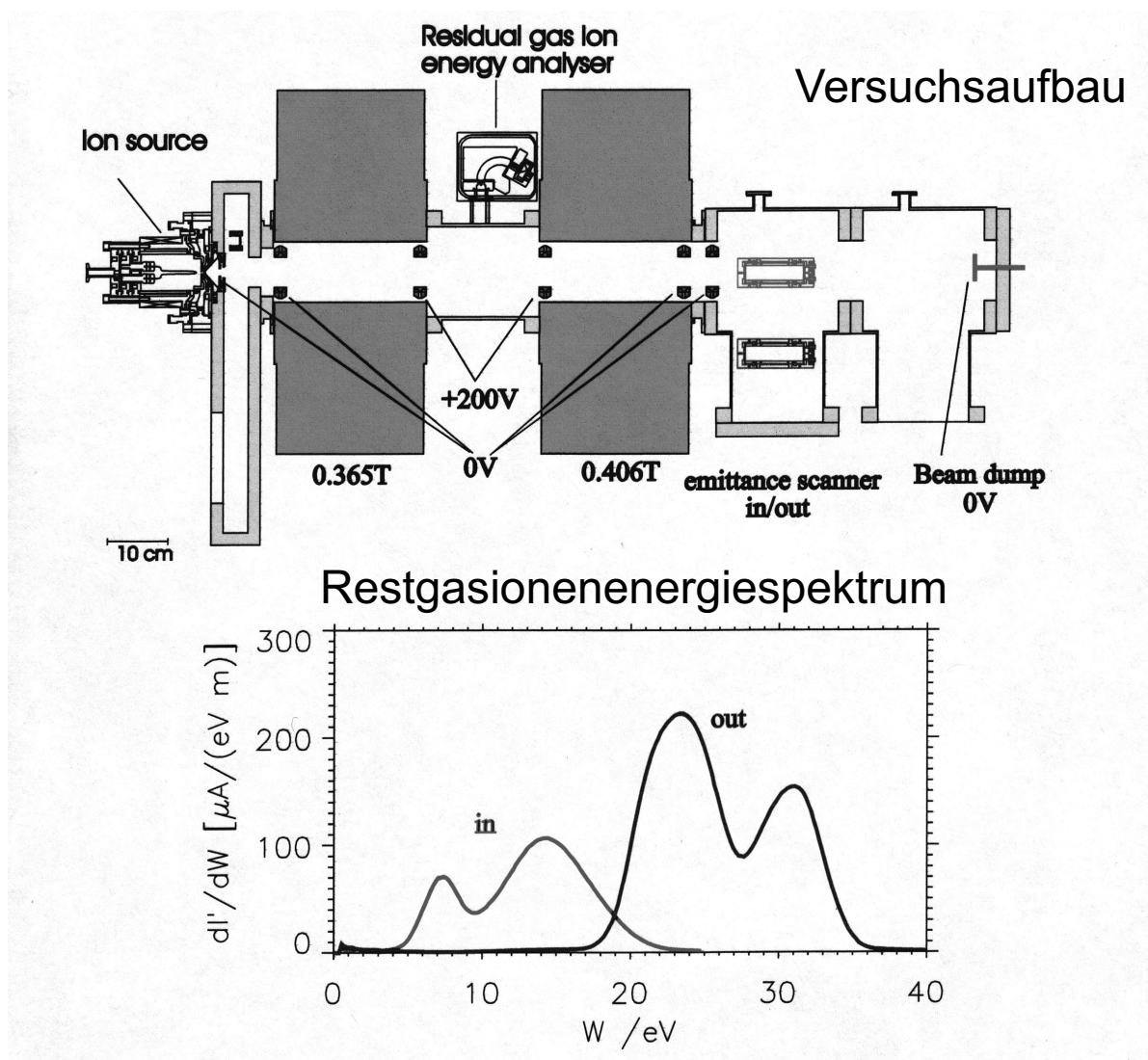
Systembedingte Messfehler :

Bei der Wechselwirkung zwischen Strahl und Messaparatur werden Sekundärelektronen erzeugt, die das Strahlpotential und damit den Strahltransport beeinflussen.

=>

Die Messung verändert die Emittanz.

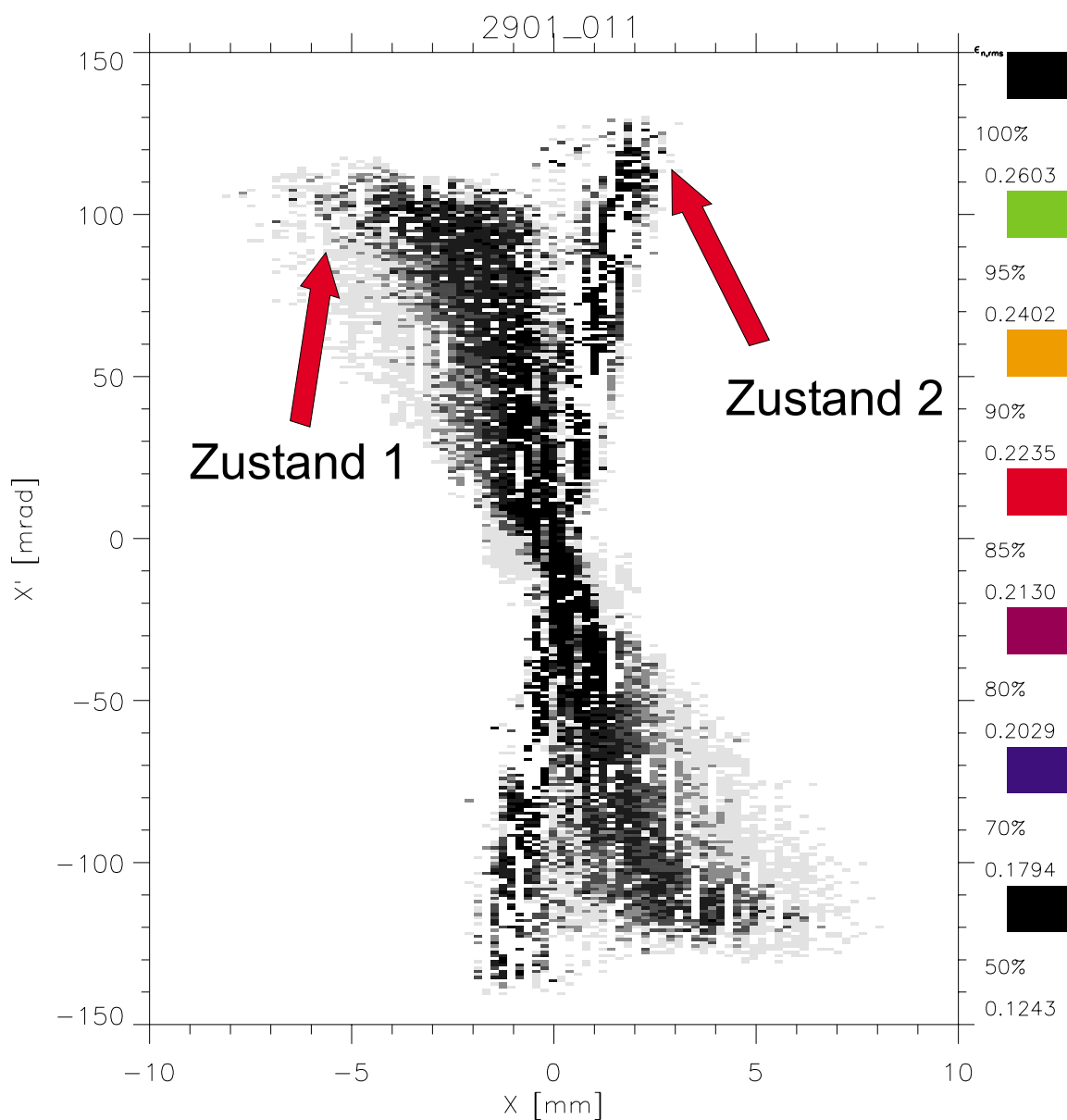
Beispiel : He^+ , 10 keV , 3 mA





Systembedingte Messfehler : Erzeugung von Strahlrauschen und bistabilen Zuständen.

Beispiel :
Emittanzmessung an einem
 He^+ , 10 keV, 4 mA Strahl
hinter einer Gabor Linse.



Sekundärelektronen erhöhen die Elektronendichte in der Linse
und verringern dadurch die Brennweite.
Dies wiederum führt zu einer Änderung der Elektronenerzeugung.



Technische Probleme :

A) Leistungsdeposition auf Schlitz : (& Gitter)

z. B. IFMIF: D^+ , 100 keV, 140 mA

$r < 2$ mm (Einschuss in RFQ)

=> Leistungsdichte $> 1 \text{ kW/mm}^2$

kann zur Zerstörung des Messkopfes führen.

B) Hochspannungsüberschläge :

Detektoren der Emittanzmessköpfe sind
"Antennen", die Spannungspulse
aus dem Strahlrohr in die
Messelektronik leiten.

(Insb. Ist die Schlitz-Gitter Anordnung in Quellennähe betroffen !)

c) Sekundärteilchen (Elektronen)

=> Hochspannungsüberschläge

=> Fehlmessung der Ionenströme (Gitter !)

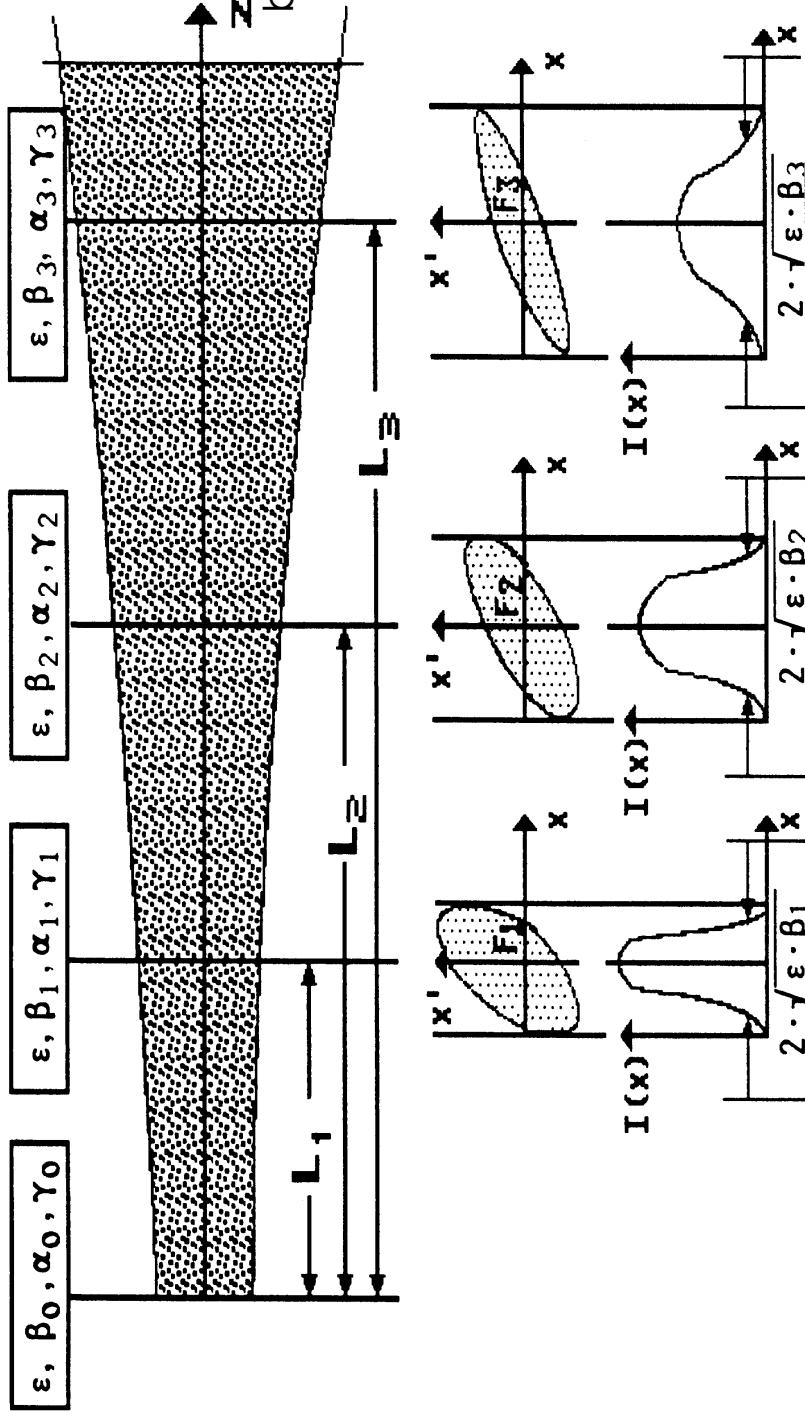
Ist eine Bestimmung der Emittanz
ohne eine Störung (Zerstörung)
des Strahles möglich ?



J. Pozimski

Berechnung der Phasenraumellipse aus dem Strahlprofil an 3 Messpunkten

(nach Sittinger)



Unter der Voraussetzung, daß die Determinanten $D_x; D_y; D_z; D$ der Transportmatrizen bekannt sind (Raumladung!) sowie ε konstant ist, gilt:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{D_x \cdot D_z - D_y^2}{D^2}}$$

Literatur:

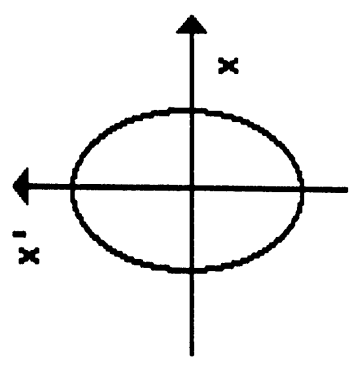
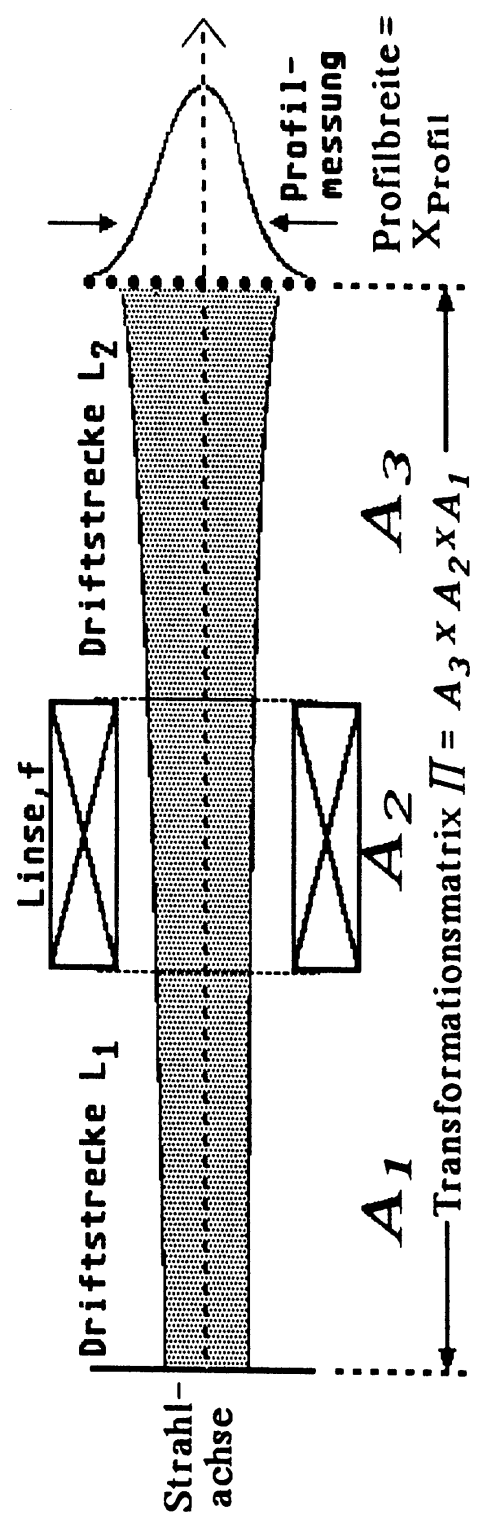
- Schaa, Diplomarbeit THD 1978
- Strahl, CAS CERN 87-10



J. Pozimski

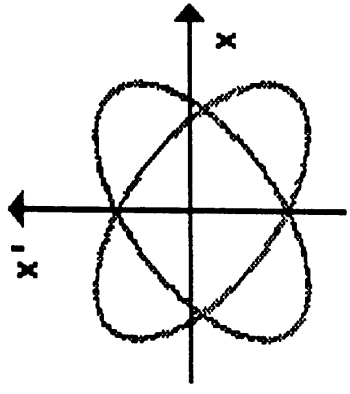
Berechnung der Phasenraumellipse aus dem Strahlprofil an einem Ort für 3 verschiedene Linseneinstellungen

(nach Sittinger)



$\epsilon, \beta_0, \alpha_0, \gamma_0$

$$\begin{pmatrix} \beta_\mu \\ \alpha_\mu \\ \gamma_\mu \end{pmatrix} = \Pi_\mu \cdot \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \alpha_0 \\ \gamma_0 \end{pmatrix}$$



$\epsilon, \beta_\mu, \alpha_\mu, \gamma_\mu$

Neuere Literatur :
R. Ferdinand et. al
ICIS 99
verwendet
Envelopengleichung
zur Auswertung

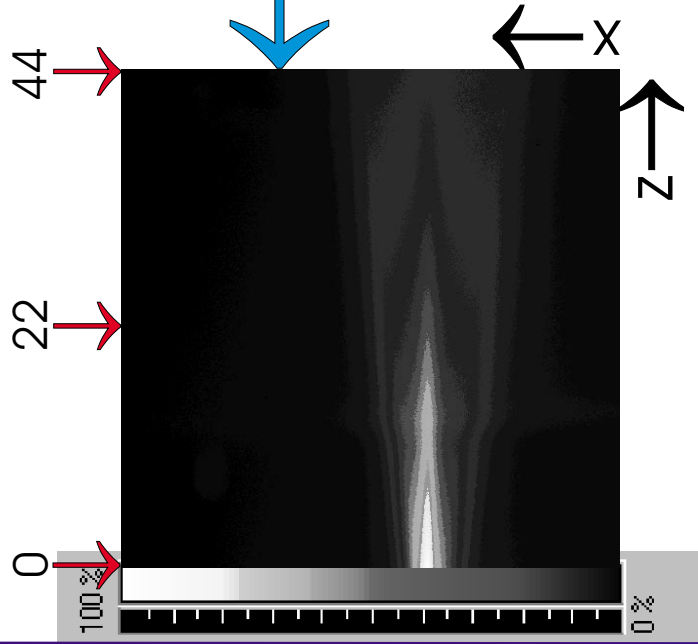


J. Pozimski

CCD Aufnahme des Restgasleuchtens enthält multiple Strahlprofile

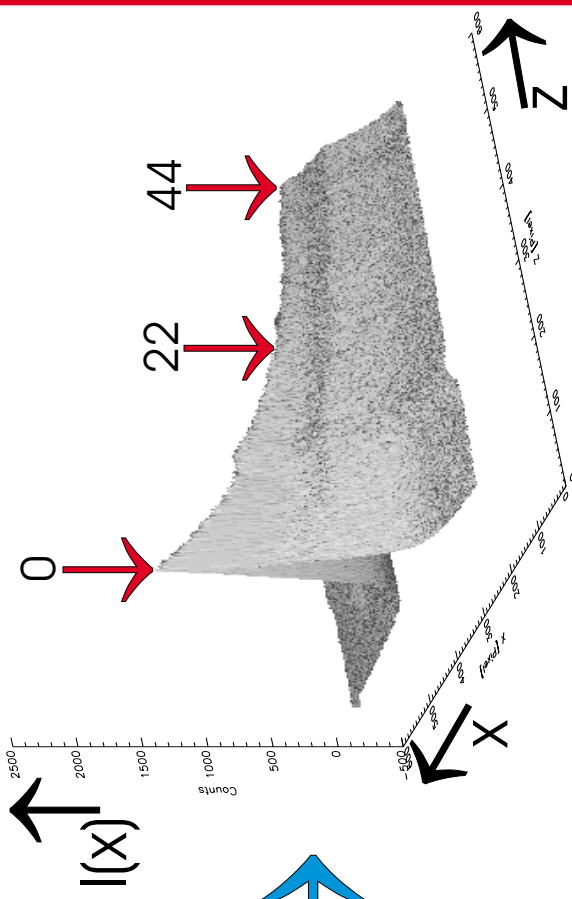
Beispiel : He^+ , 10 keV , 3 mA bei $p=1 \cdot 10^{-5}$

Auflösung : 0.081 mm
Anzahl Pixel : 512

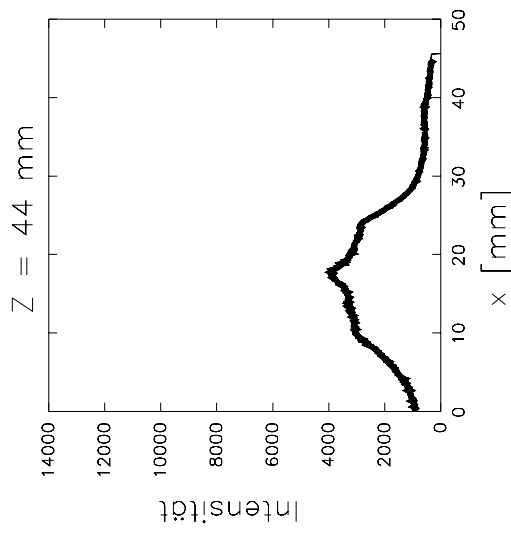
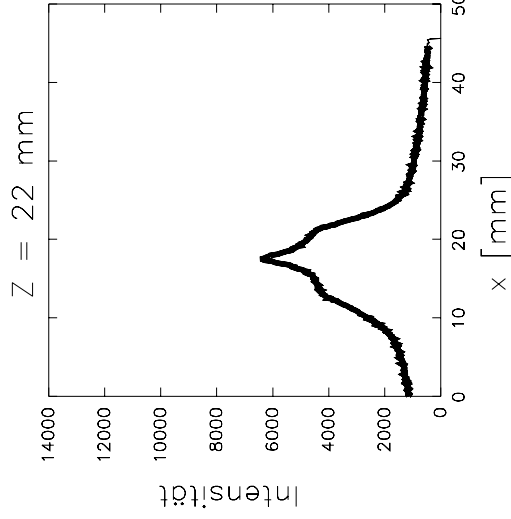
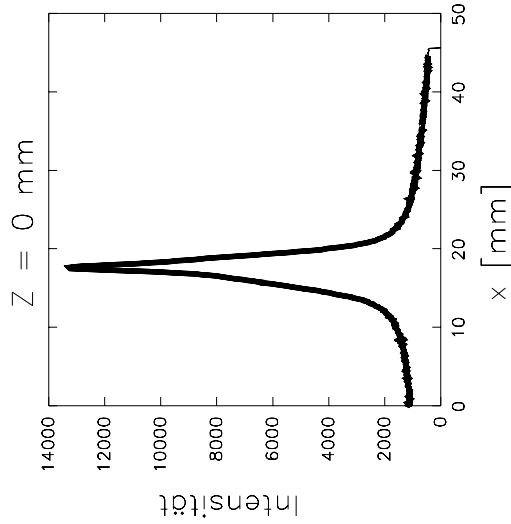


Fehlfarbdarstellung

3 D - Plot

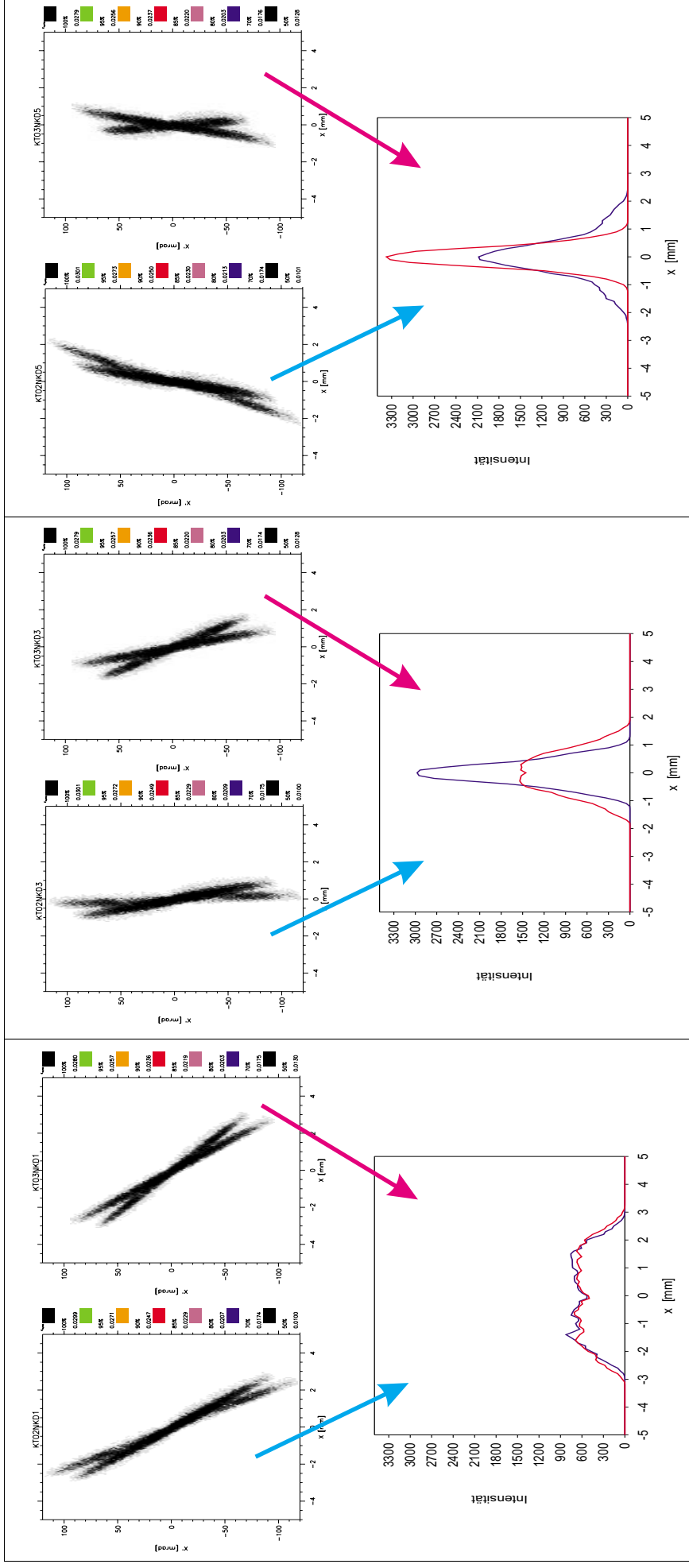


Profile entlang des Strahlweges





Einfluss der Phasenraumverteilung auf die Entwicklung der Strahlprofile entlang des Strahlweges (ohne Raumladung)



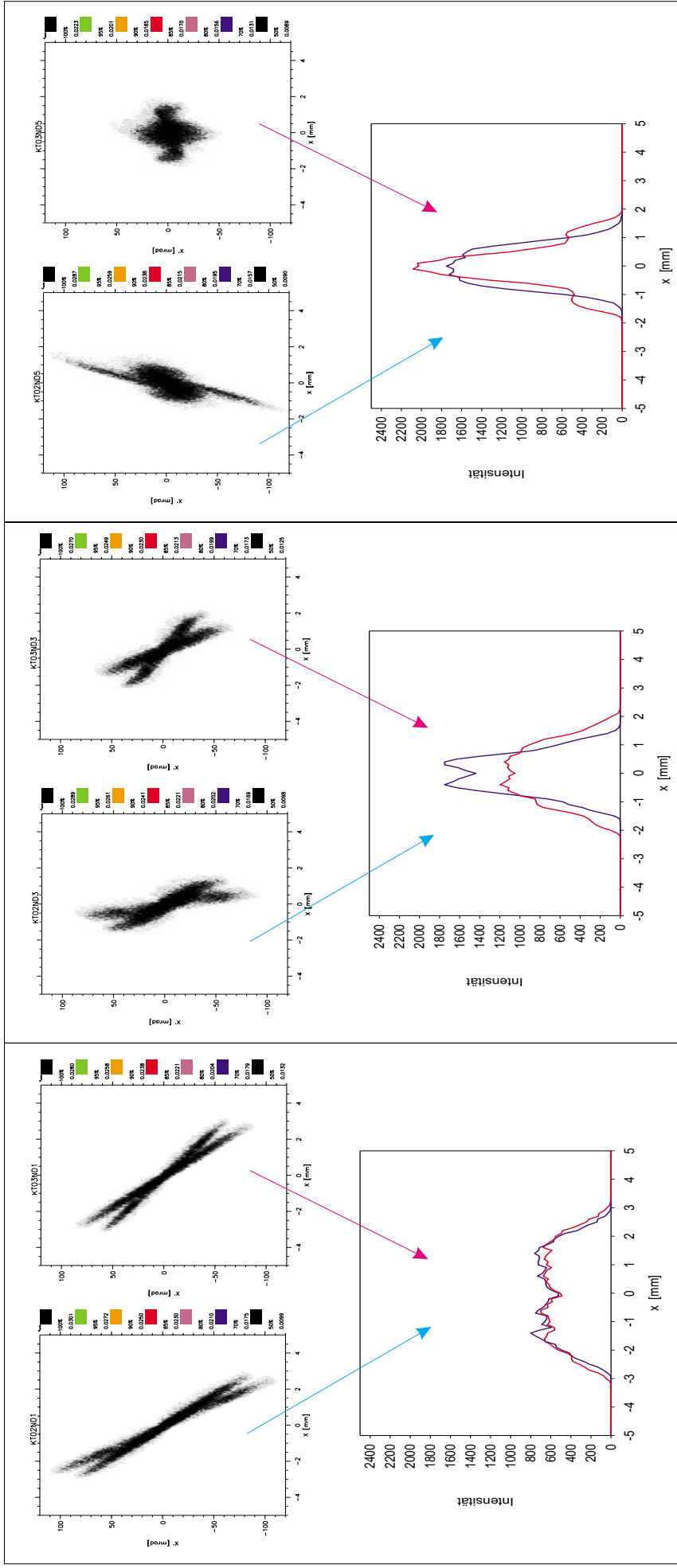
$z = 0 \text{ mm}$

$z = 30 \text{ mm}$

$z = 60 \text{ mm}$



Einfluss der Phasenraumverteilung auf die Entwicklung der Strahlprofile entlang des Strahlweges (mit Raumladung)



$z = 0$ mm

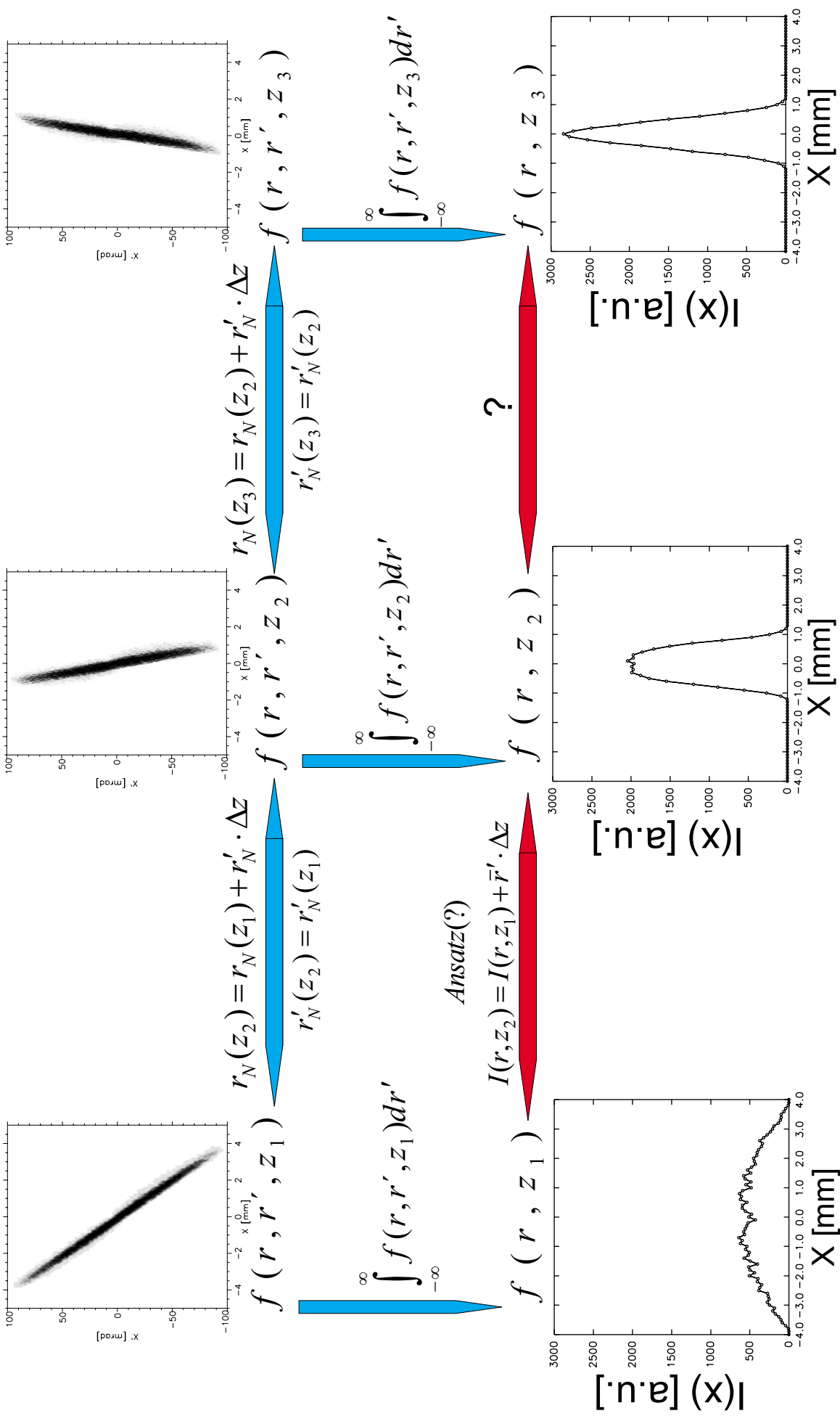
$z = 30$ mm

$z = 60$ mm



Transformation von Emittanz in Profile (Annahme : Rotationssymmetrie, kräfte- & stoßfrei)

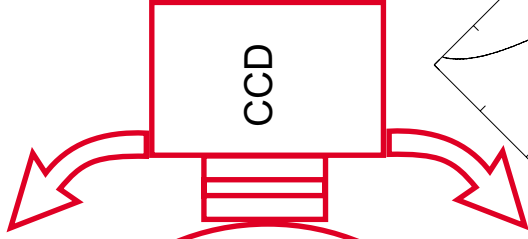
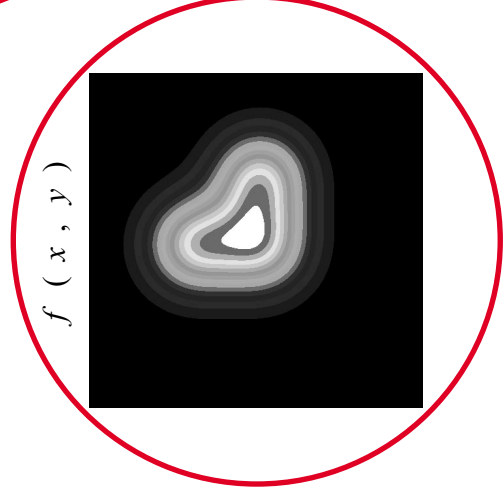
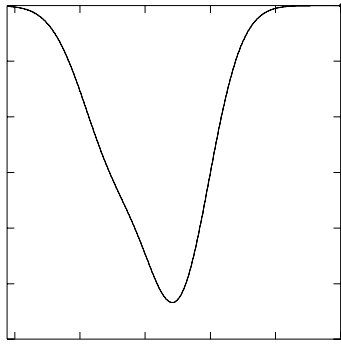
J. Pozimski





Analogon Tomographie: Berechnung einer 2-dimensionalen Dichteverteilung aus Profilmessungen

$$P_{\Theta}(t) = \int_{(\Theta,t)\text{line}} f(x,y) ds$$



$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-j2\pi (ux+vy)} dx dy$$

$$S_{\Theta}(w) = \int_{-\infty}^{\infty} P_{\Theta}(t) e^{-j2\pi wt} dt$$

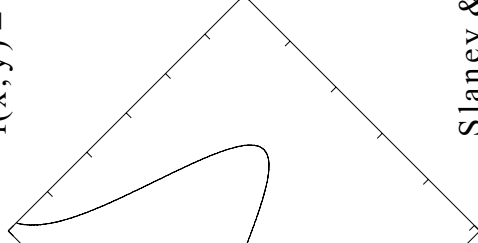
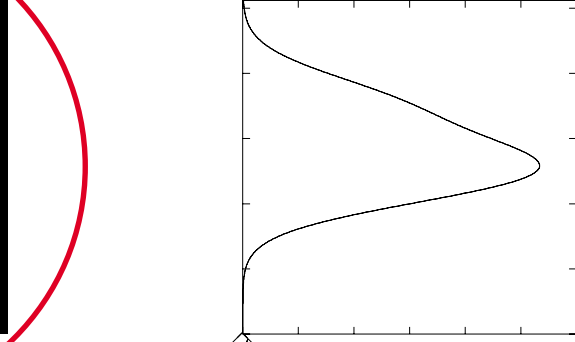
 \Rightarrow

$$S_{\Theta}(w) = F(w, \Theta)$$

 \Rightarrow

(Fourier Slice Theorem)

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} \left[\int_{-\infty}^{\infty} S_{\Theta}(w) |w| e^{j2\pi wt} dw \right] d\Theta$$



Slaney & Kak

Principles of Computerized Tomographic Imaging

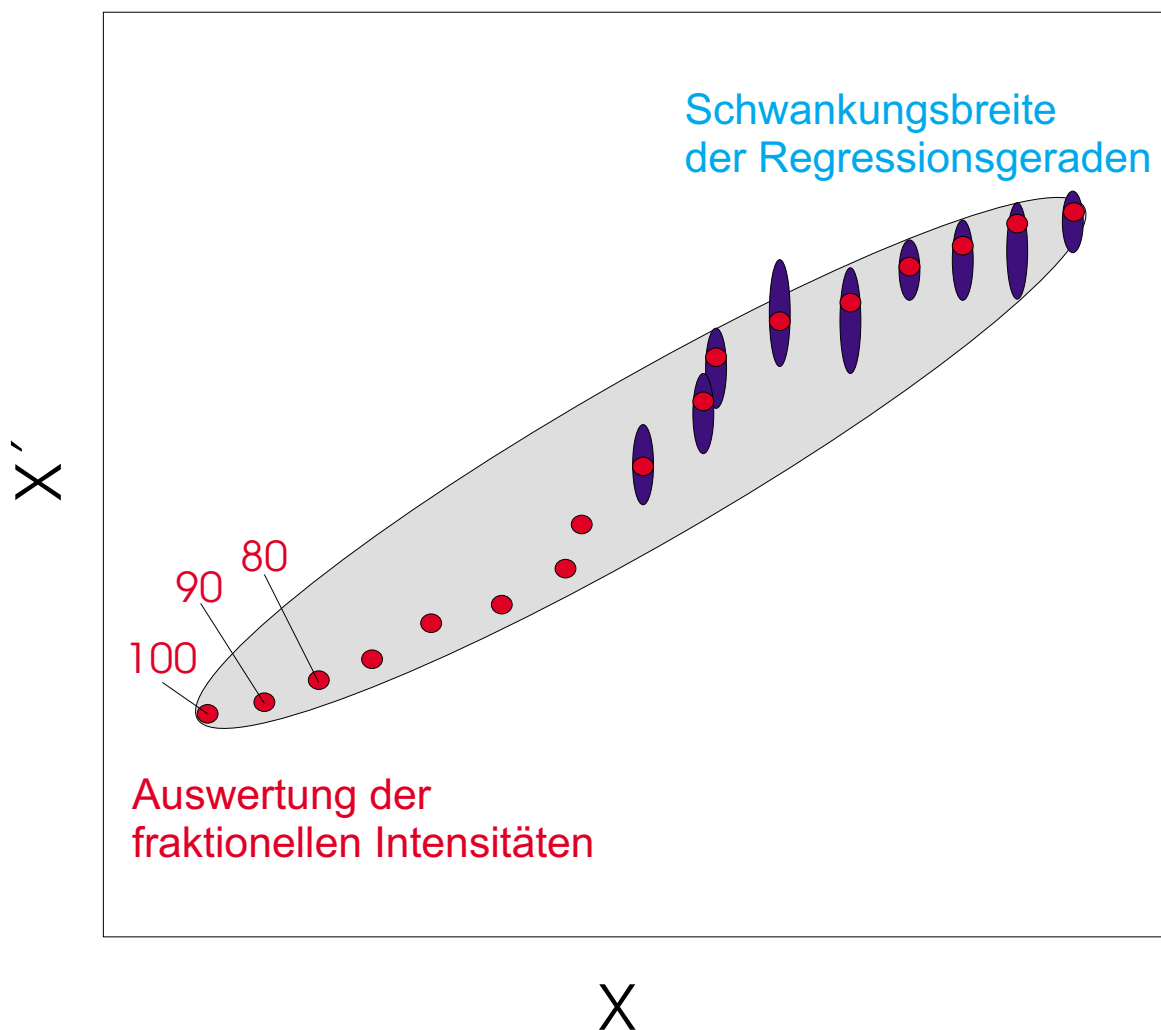
IEEE Press (1987)

ISBN 0 - 87942 - 198 - 3



Ansatz zur Auswertung des Verlaufs der Strahlprofile entlang z:

- 1.) Analyse des Verlaufs der fraktionellen Intensitäten (entsprechend der klassischen Auswertung von 3 Profilen für 100%)
- 2.) Die Überbestimmtheit des Systems wird dazu verwendet, über die Variation der Regressionsgeraden (linearer Ansatz), auf die Breite der Phasenraumverteilung zu schließen.





J. Pozimski

VB-Programm zur Auswertung der CCD Aufnahmen

Ausgabe der Ergebnisse in X, X' im PARMTRA Format

Analyse der Funktion $I(X)=f(z)$

CCD-Abbild in Fehlfarbdarstellung

Analyse der radialen Intensitätsverläufe

Ablaufsteuerung

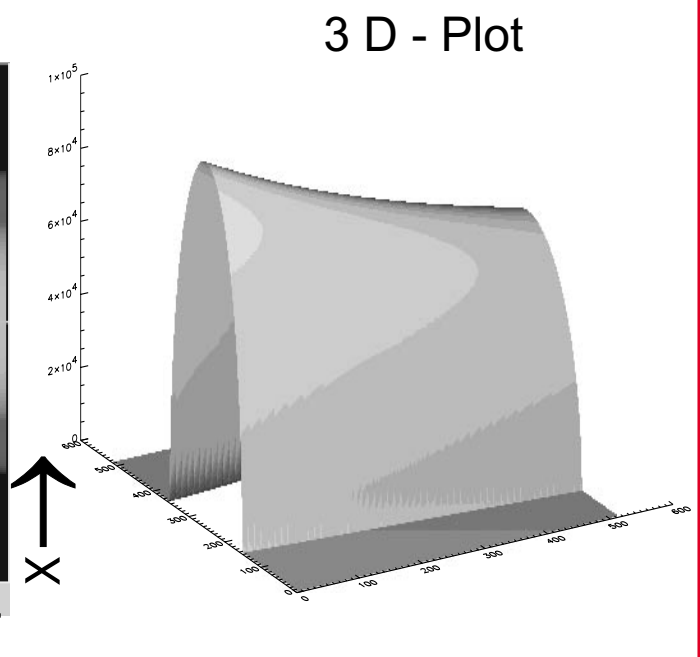
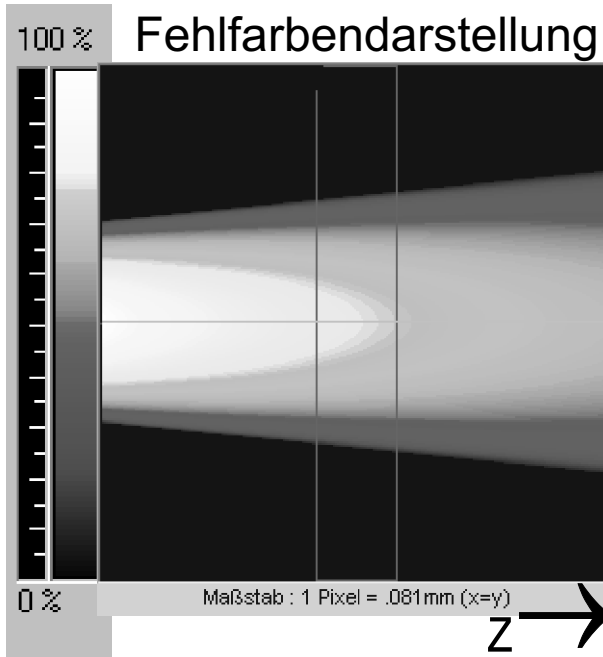


Test der Auswertung :

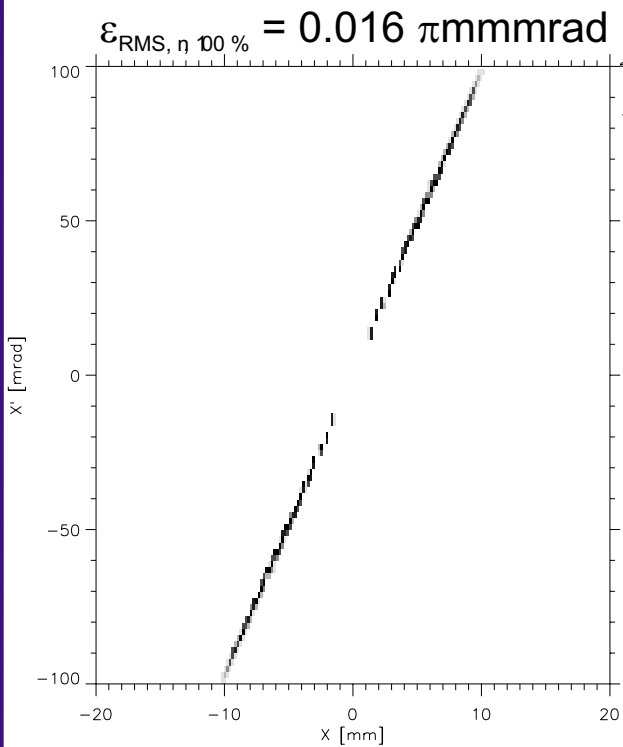
$$\rho(r) = konst. \forall r < r_s \quad (r_s = 10\text{mm})$$

$$r' = \alpha \cdot r \quad (\alpha = 10\text{mrad/mm})$$

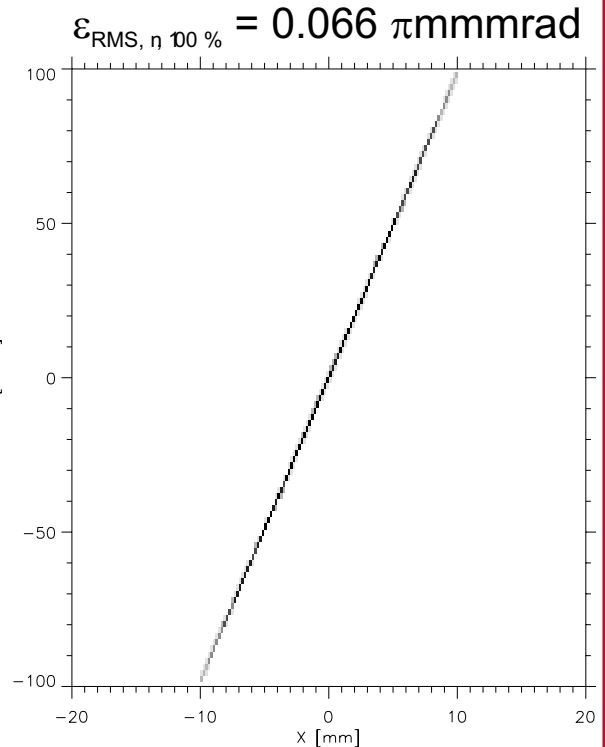
Auflösung : 0.081 mm
Anzahl Pixel : 512



Ohne Interpolation



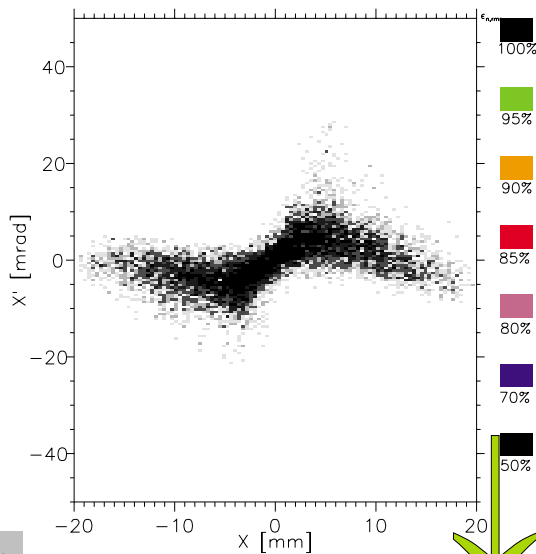
Mit Interpolation





J. Pozimski

Test der Auswertung : Transport einer Phasenraumverteilung ohne Raumladung

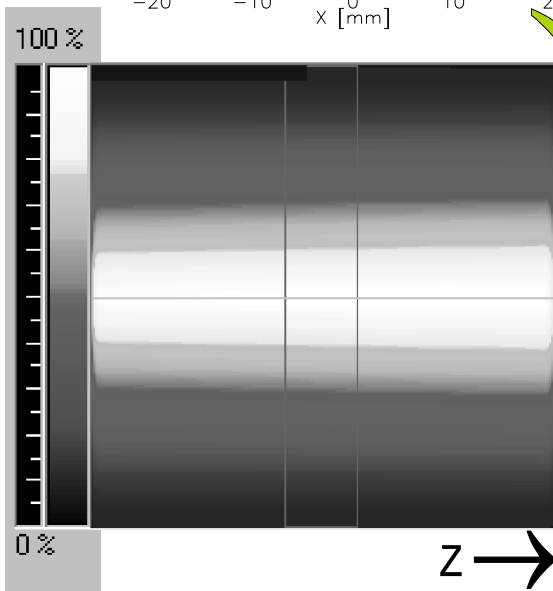


Eingangsverteilung

$$\epsilon_{RM, \mathcal{S}_1 100\%} = 0.0804 \pi \text{ mmmrad}$$

$$\Delta \epsilon_{RM, \mathcal{S}_1 100\%} = 0.0490 \pi \text{ mmmrad}$$

(0.0314 - 0.1294)



CCD-Abbild in
Fehlfarbendarstellung
Auflösung : 0.081 mm
Anzahl Pixel : 512

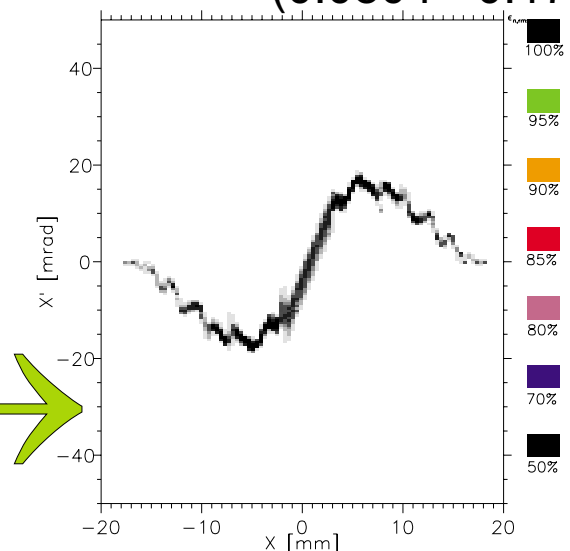
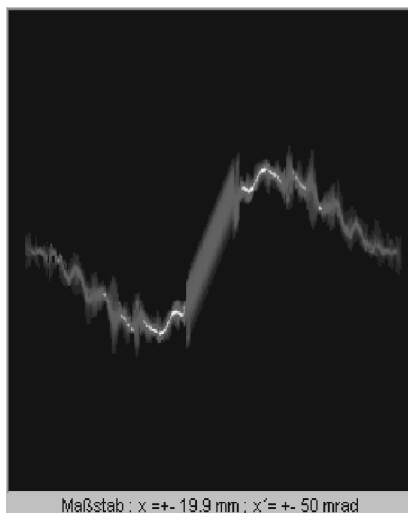
Ausgangsverteilung (PARMTRA)

$$\epsilon_{RM, \mathcal{S}_1 100\%} = 0.1294 \pi \text{ mmmrad}$$

$$\Delta \epsilon_{RM, \mathcal{S}_1 100\%} = 0.0490 \pi \text{ mmmrad}$$

(0.0804 - 0.1784)

CCDEMI

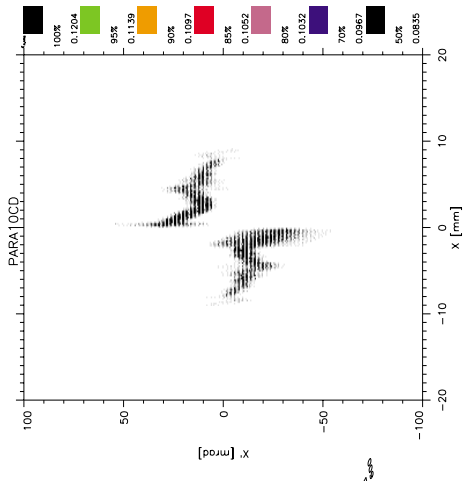
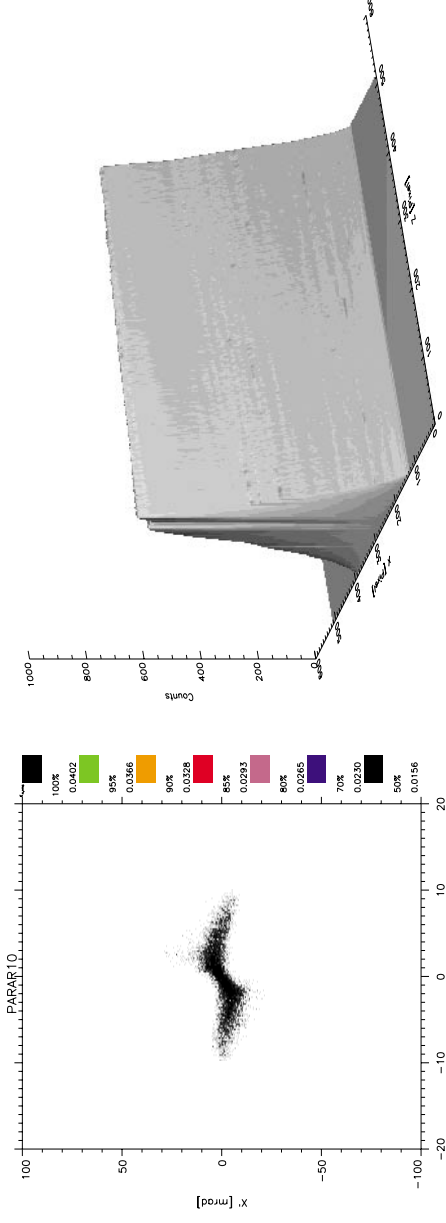




Einfluss von Intensitätsschwankungen auf die Auswertung der CCD Abbilder

Simulation einer Strahldrift unter Verwendung von 10 000 (Makro-)Teilchen

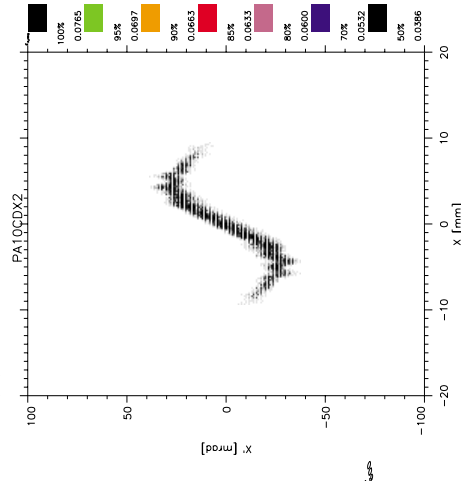
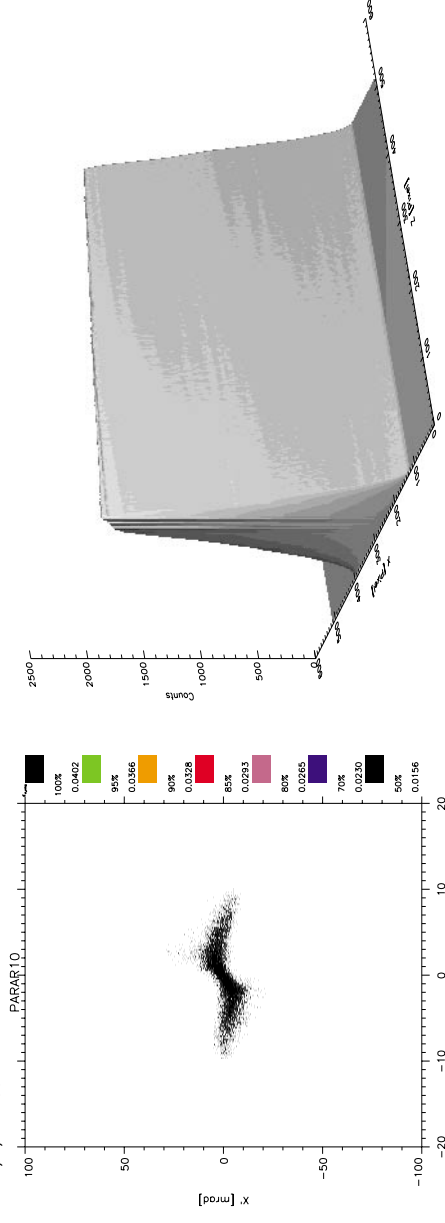
$\epsilon_{RM, 5\% 100\%} = 0.0402 \text{ } \pi\text{mmmrad}$



$\epsilon_{RM, 5\% 100\%} = 0.1204 \text{ } \pi\text{mmmrad}$

Simulation einer Strahldrift unter Verwendung von 30 000 (Makro-)Teilchen

$\epsilon_{RM, 5\% 100\%} = 0.0402 \text{ } \pi\text{mmmrad}$



$\epsilon_{RM, 5\% 100\%} = 0.0765 \text{ } \pi\text{mmmrad}$

Auswertung eines hochqualitativen CCD-Abbildes He⁺, 10 keV, 5 mA, DC

NEST

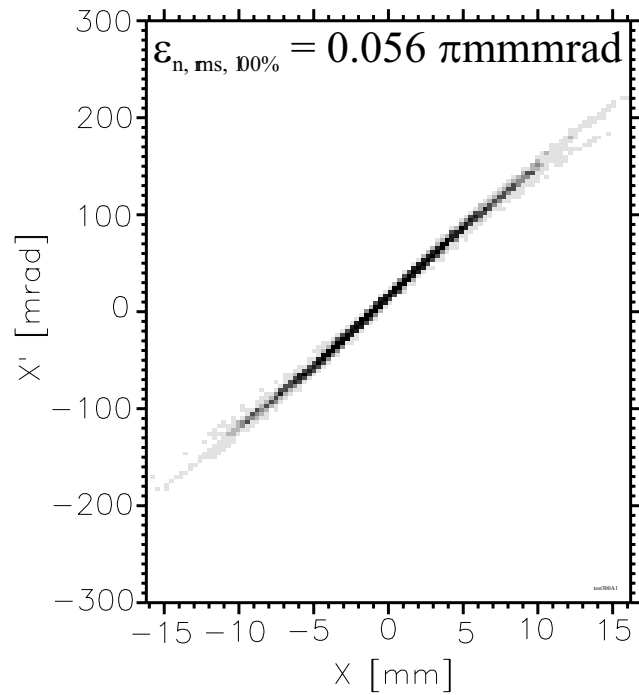
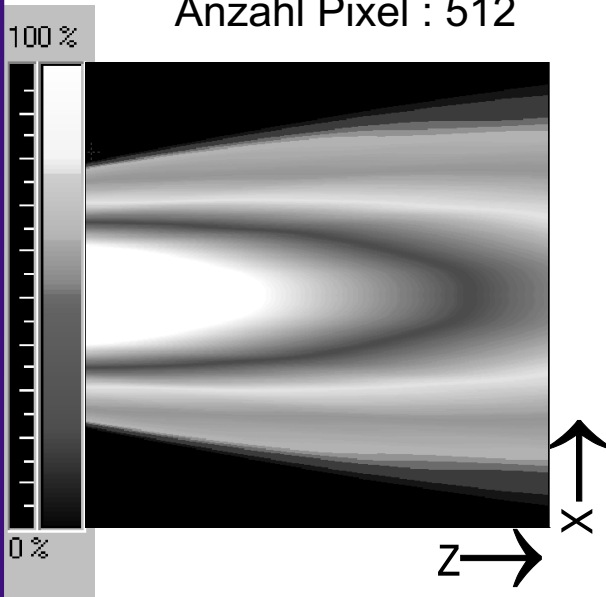


IAP-JWG

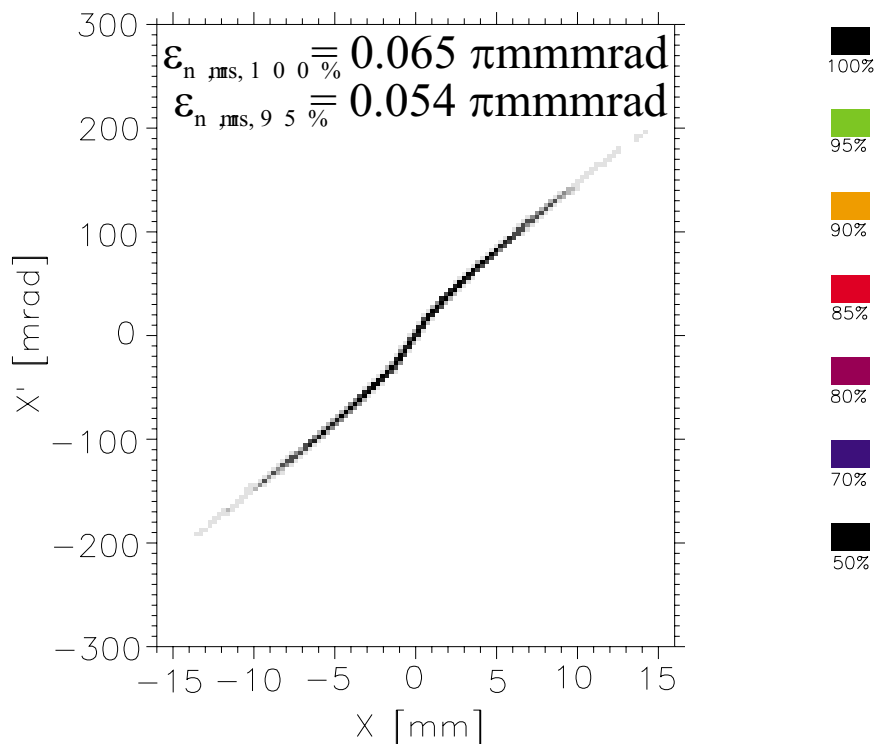
J. Pozimski

CCD-Abbild in
Fehlfarbendarstellung
Auflösung : 0.081 mm
Anzahl Pixel : 512

Messung



Verteilung aus CCD-Abbild





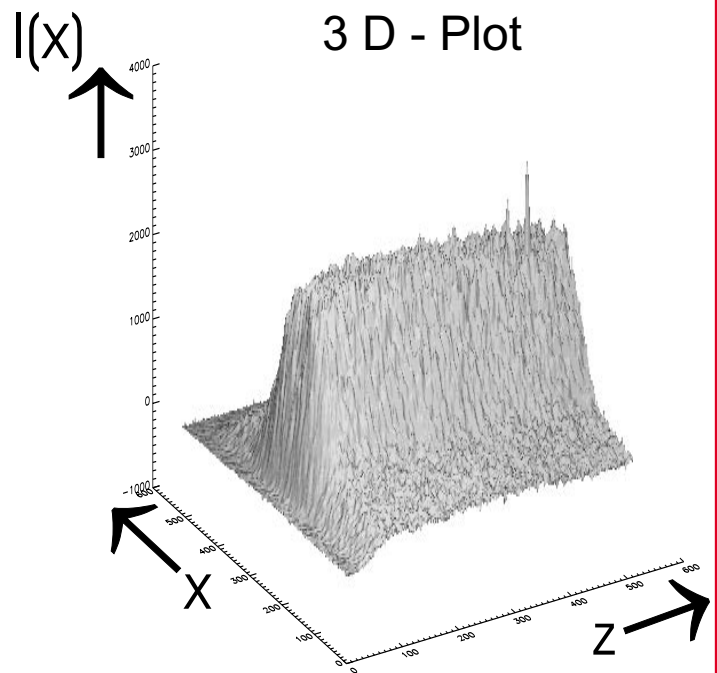
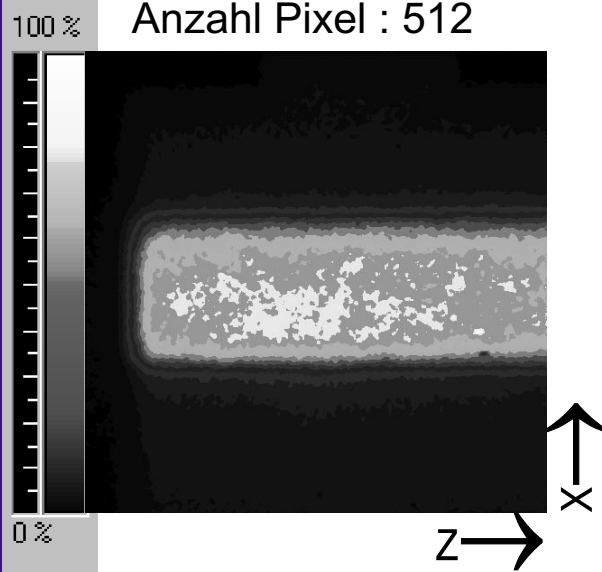
Einfluss des Messwerttrauschens auf die Auswertung.

Beispiel : He⁺ , 10 keV, 2.5 mA

J. Pozimski

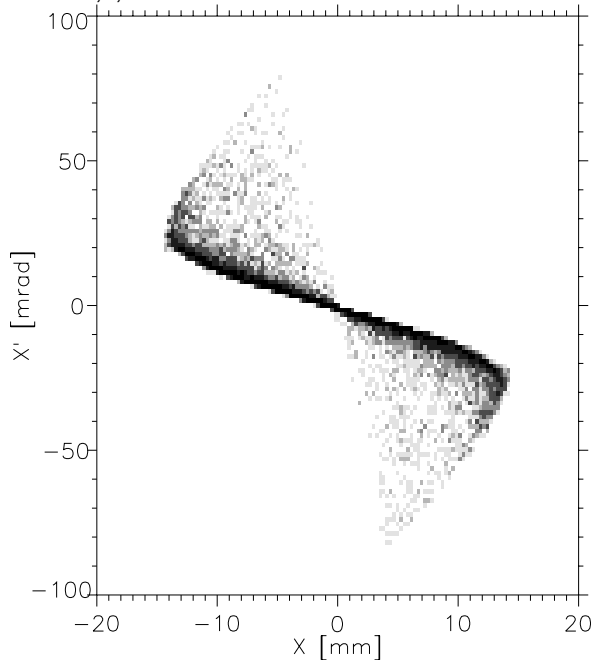
gepulst dekompenziert, $t=100 \mu\text{s}$, $\tau_{\text{RLK}}=200 \text{ mS}$

CCD-Abbild in
Fehlfarbandarstellung
Auflösung : 0.081 mm
Anzahl Pixel : 512



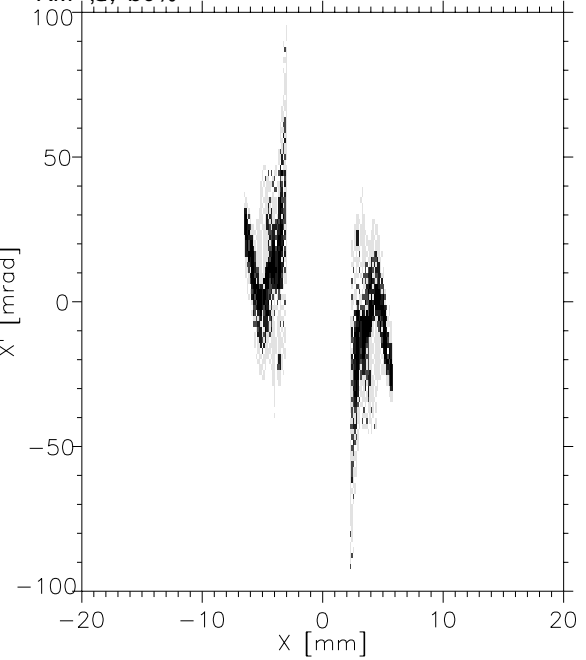
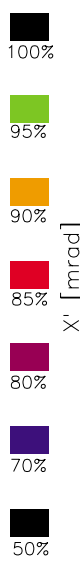
Verteilung aus Simulation

$$\epsilon_{\text{RM}, S_1 100\%} = 0.1774 \pi \text{ mmmrad}$$



Verteilung aus CCD-Messung

$$\epsilon_{\text{RM}, S_1 100\%} = 0.1992 \pi \text{ mmmrad}$$

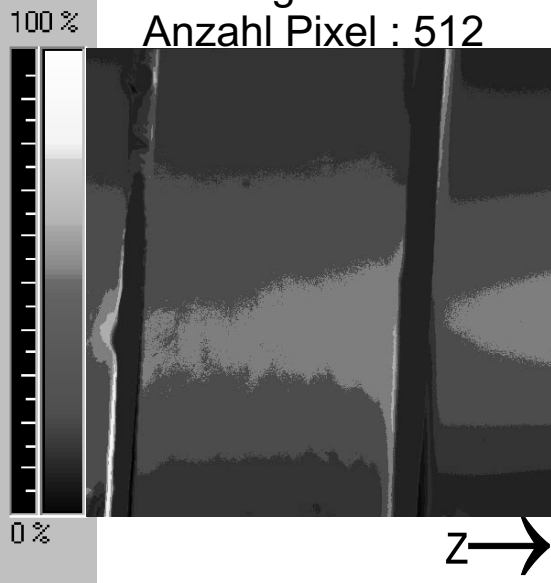




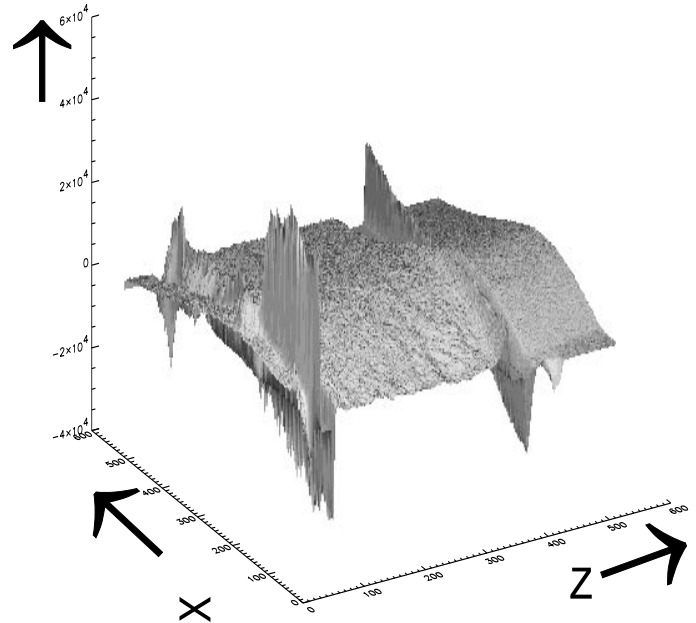
Einfluss von Reflektionen auf die Auswertung

Beispiel Ne^+ , 8 keV, 1 mA, DC J. Pozimski

CCD-Abbild in
Fehlfarbandarstellung
Auflösung : 0.081 mm
Anzahl Pixel : 512



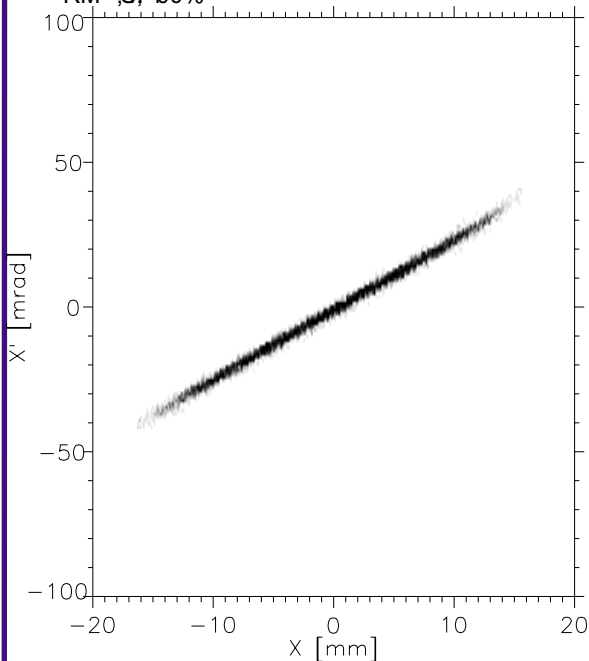
$I(x)$



3 D - Plot

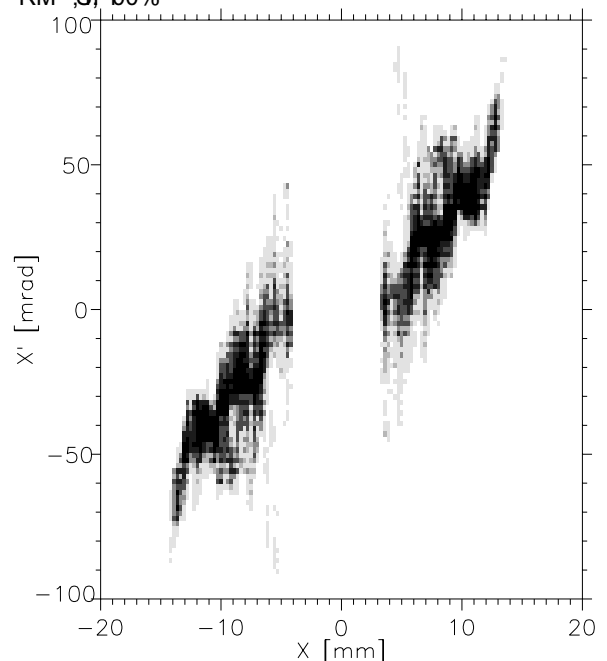
Messung

$$\epsilon_{RM, S_1 100\%} = 0.0094 \pi \text{ mmmrad}$$



Verteilung aus CCD-Messung

$$\epsilon_{RM, S_1 100\%} = 0.1422 \pi \text{ mmmrad}$$





Zusammenfassung

* Klassische Emittanzmessmethoden
leiden unter :

- Dem Einfluss der Messung auf die Messgrösse.
- Einer prinzipbedingten hohen Messunsicherheit.
- Einer hohen Leistungsdichte auf dem Messkopf.

.....

* Die Bestimmung der einhüllenden Ellipse einer
Phasenraumverteilung aus Profilmessungen
ist hinreichend bekannt.

* Mit steigender Anzahl an Strahlprofilen
steigt die verfügbare Information über die

- Phasenraumverteilung
- Raumladung

jedoch fehlt bislang eine eindeutige mathematische
Beschreibung der Rücktransformation.

* Ein stark vereinfachendes numerisches Modell
zeigt gute Ergebnisse für rauscharme
CCD-Abbilder ohne Störungen (Reflektionen).

* Verschiedene weitere Möglichkeiten zur
Verbesserung der optischen Diagnose
sind denkbar

(z. B. Dopplershift, multiple CCD-Kameras
zur Verbesserung der Auflösung).