DESY: Projektbericht 2010

- **Themenbereiche:**
  1. **Strahldynamiksimulationen für die XFEL**
  2. **Wakefeldberechnungen für PETRA III**
  3. **Wakefelder kurzer Bunche in der Undulatorkammer**

DESY: Projektbericht 2010

- **Themenbereiche:**

1. **Strahldynamiksimulationen für die XFEL**
   – Problemstellung
   – Methodik
   – Simulationen
   – Diskussion

1. **Wakefeldberechnungen für PETRA III**

2. **Wakefelder kurzer Bunche in der Undulatorkammer**

Strahldynamiksimulationen

- **Problemstellung**

1. Grundparameter:

Bunch:
$Q = 1nC$
$\sigma_r = 0.75$ mm (uniform)
$\sigma_t \sim 30$ ps (flat-top)

Felder:
Kavität ($E_{max} = 60$ MV/m, $\varphi = -44.724°$)
Solenoid ($B_{max} = 0.1988$ T)
Kathodenemission + Raumladung

2. Ziele:

– Validierung PIC-ASTRA im rotationssymmetrischen Fall

– **Strahldynamik in der Kanone bei transversalen Intensitätsmodulationen**

Strahldynamiksimulationen

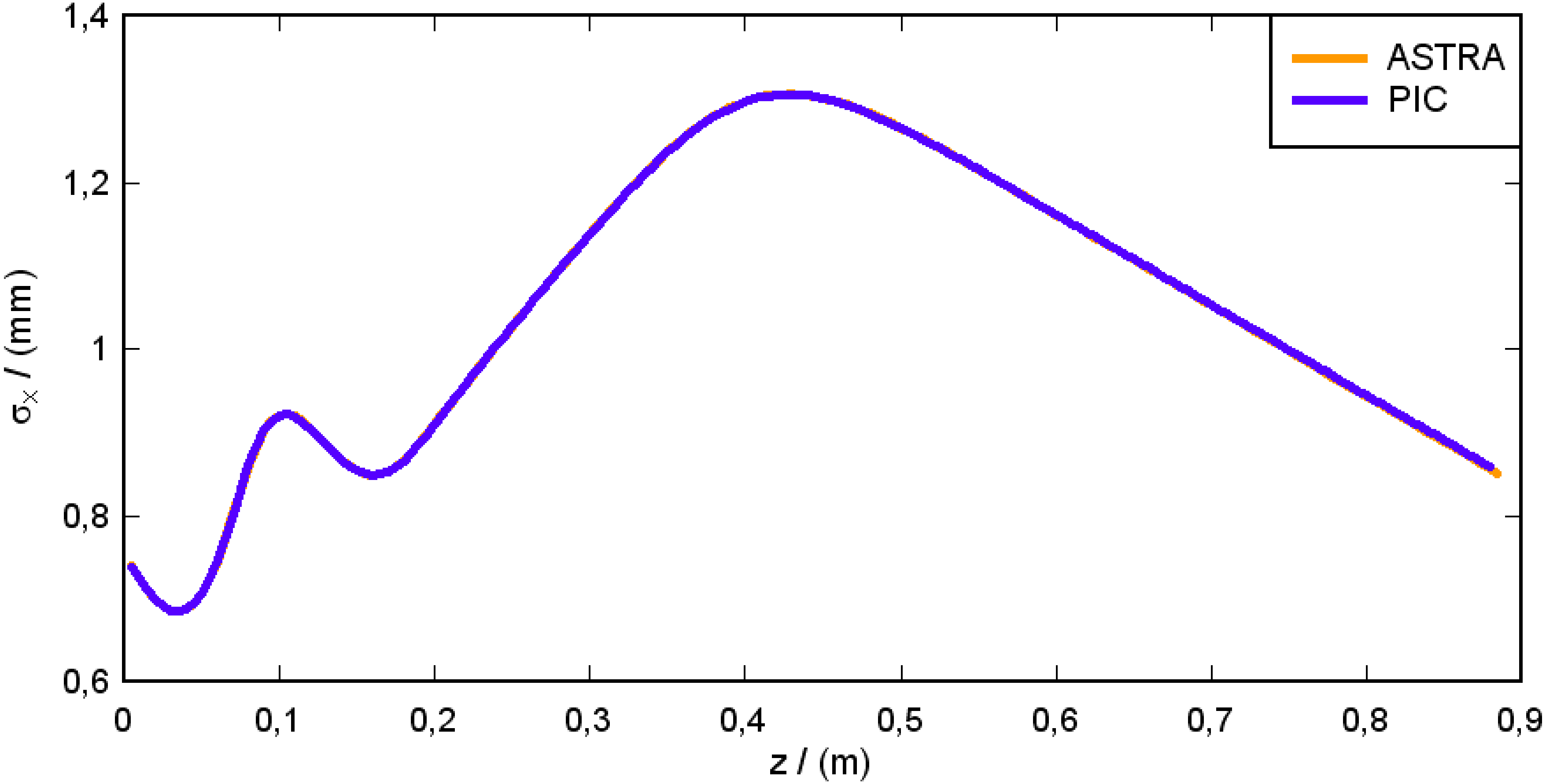
- **Methodik**

  1. Tracking-Tests ohne Raumladung
  2. Konvergenzuntersuchung / Ermittlung numerischer Parameter mit Raumladung
  3. Vergleich mit ASTRA im rotationssymmetrischen Fall
  4. Nichtsymmetrischer Bunch mit 1/3 − 2/3 Q
  5. Nichtsymmetrischer Bunch mit 2/5 − 3/5 Q

Strahldynamiksimulationen

- **Tracking-Tests ohne Raumladung**

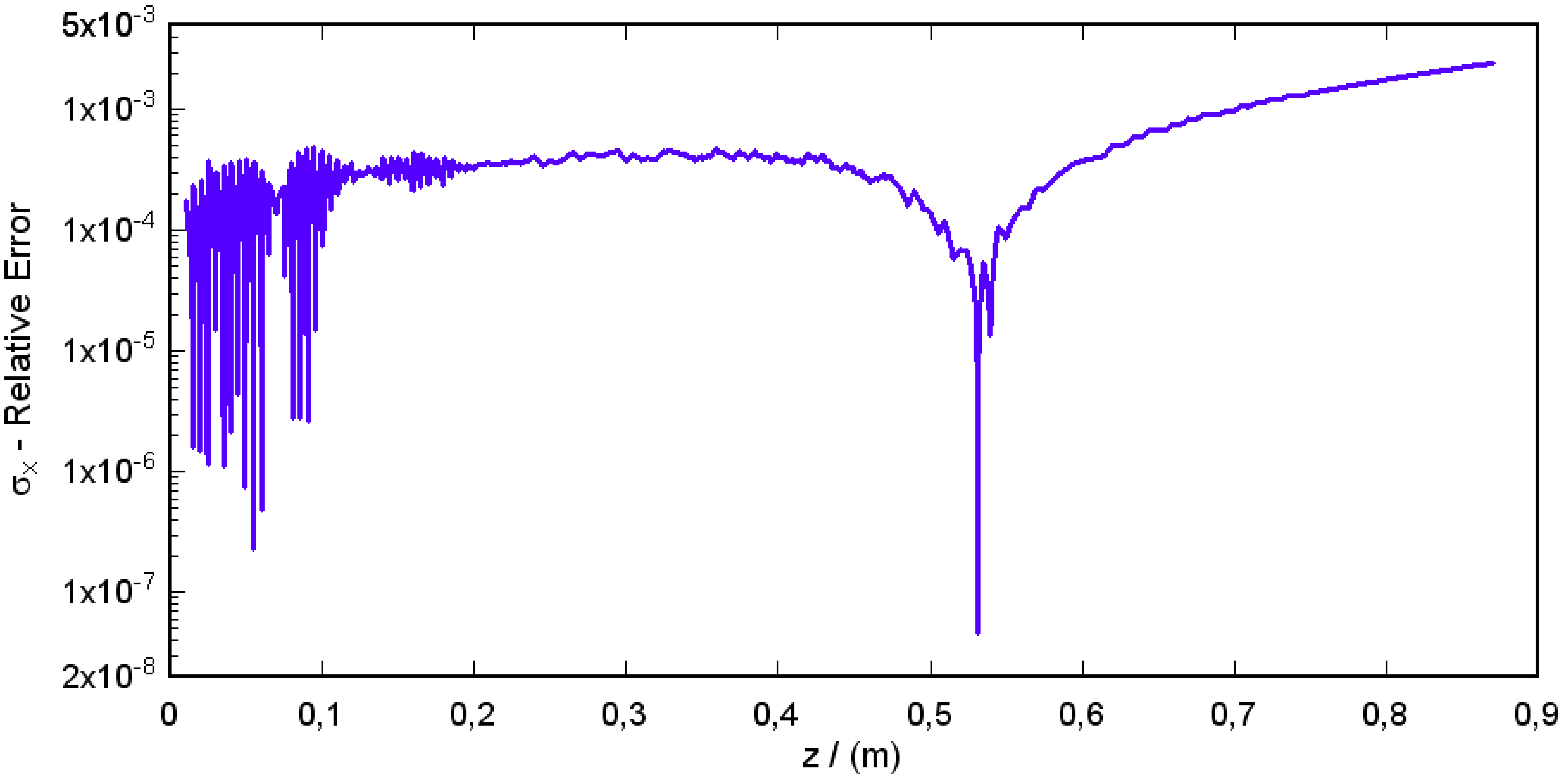
Transversale Bunchausdehnung



Strahldynamiksimulationen

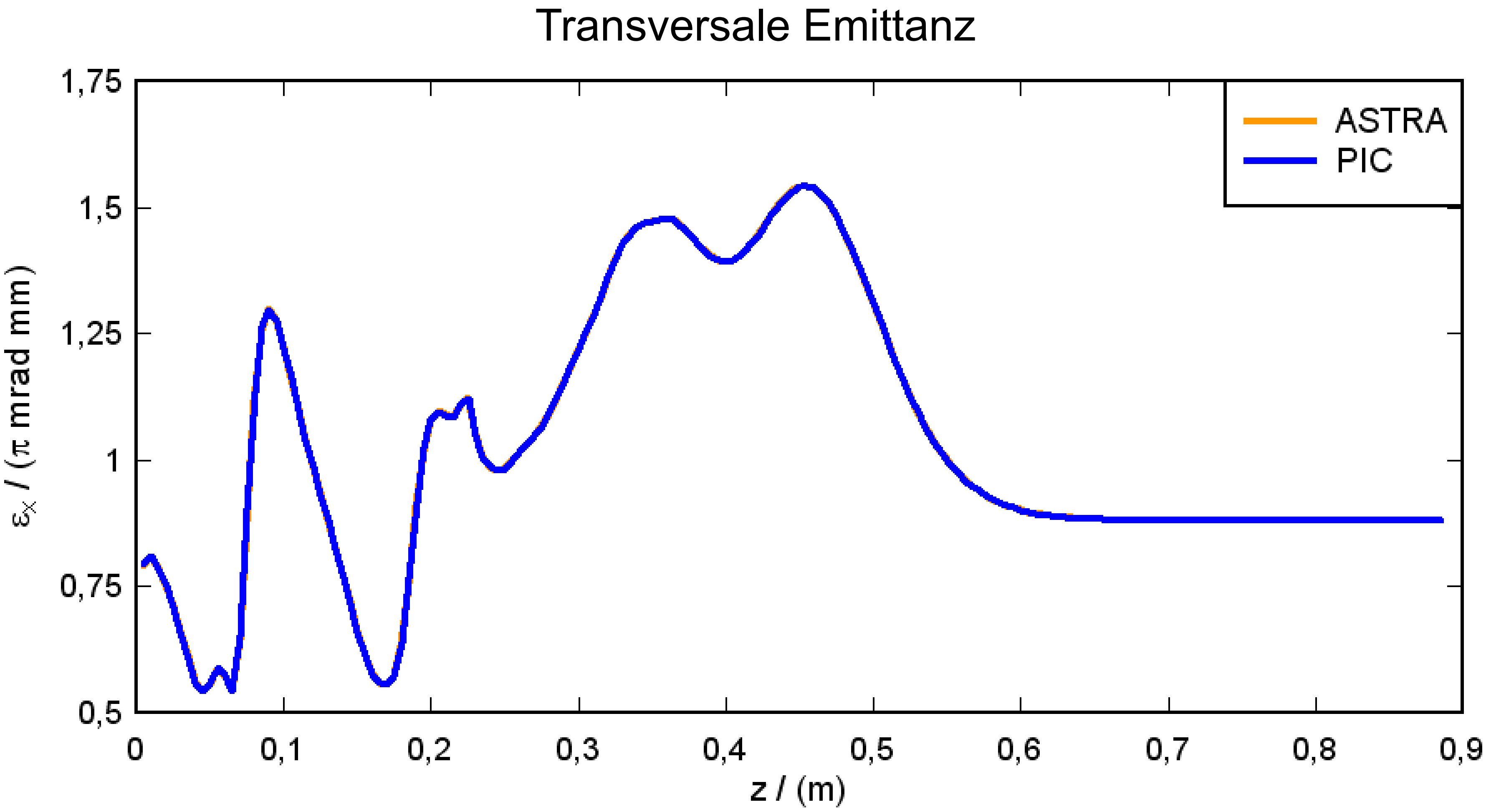
- **Tracking-Tests ohne Raumladung**

Abweichung der transversalen Bunchausdehnung



Strahldynamiksimulationen

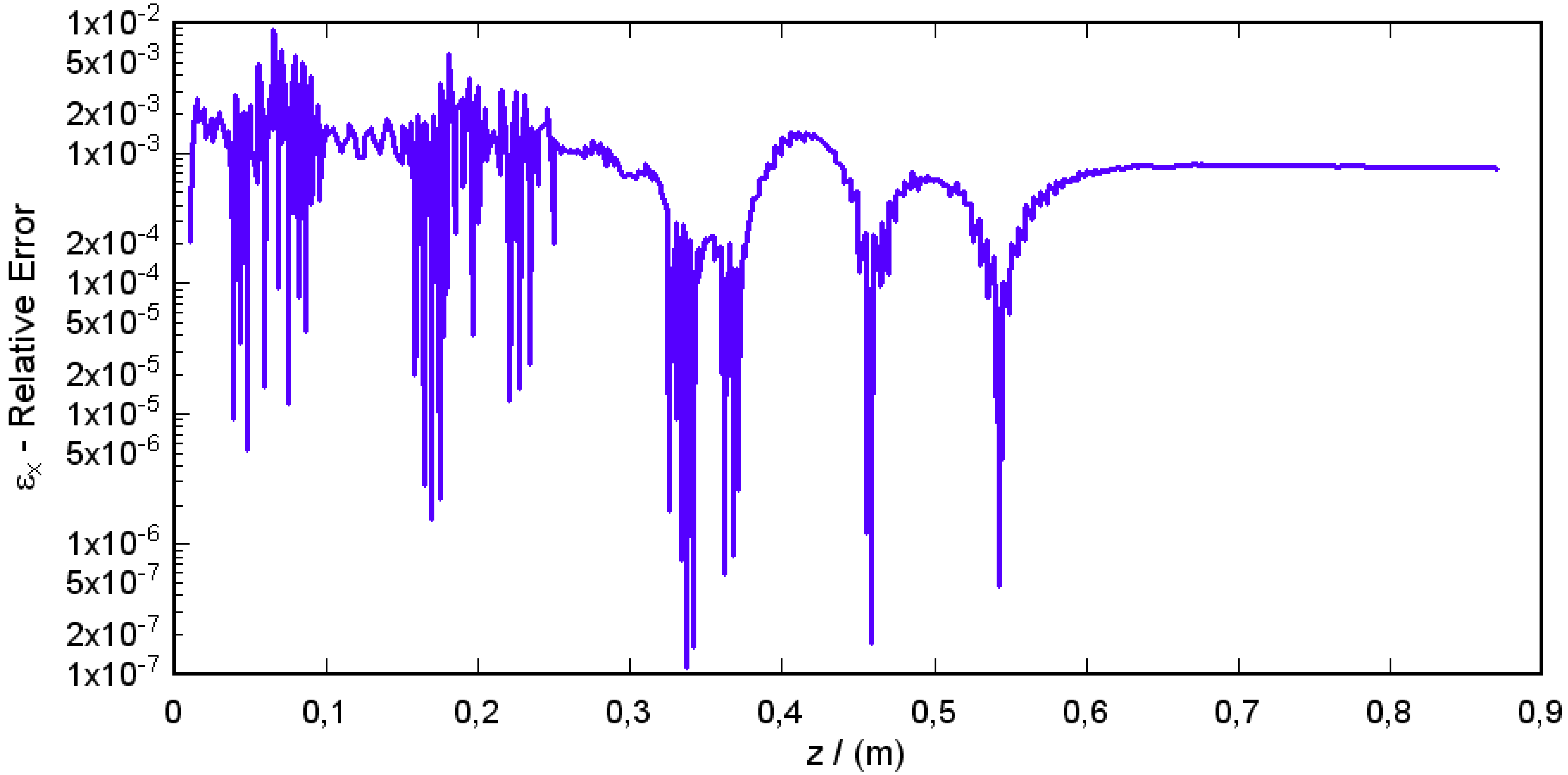
- **Tracking-Tests ohne Raumladung**



Strahldynamiksimulationen

- **Tracking-Tests ohne Raumladung**

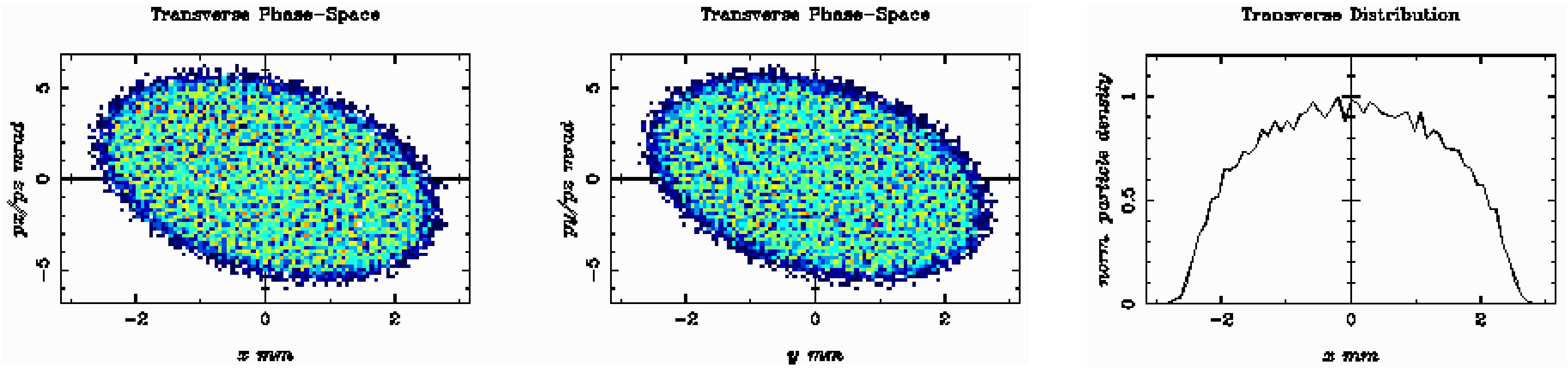
Abweichung der transversalen Emittanz



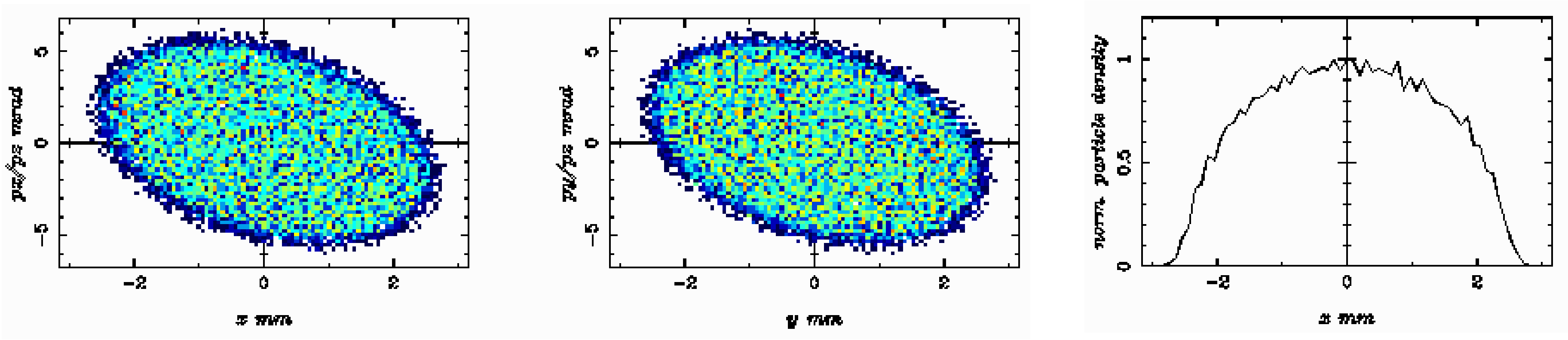
Strahldynamiksimulationen

- **Tracking-Tests ohne Raumladung**

ASTRA: z = 0.4998 m



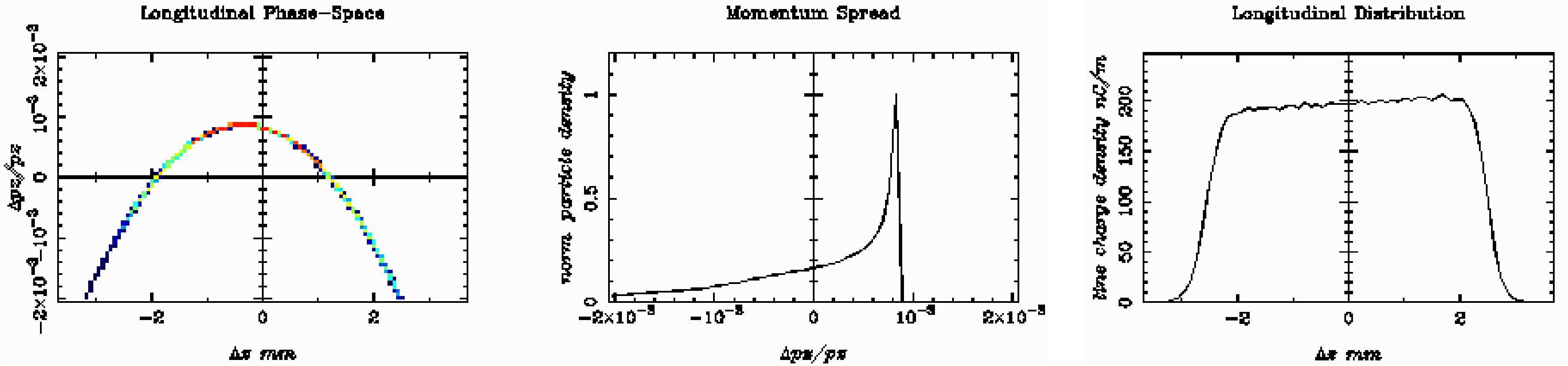
PIC-Code: z = 0.5 m



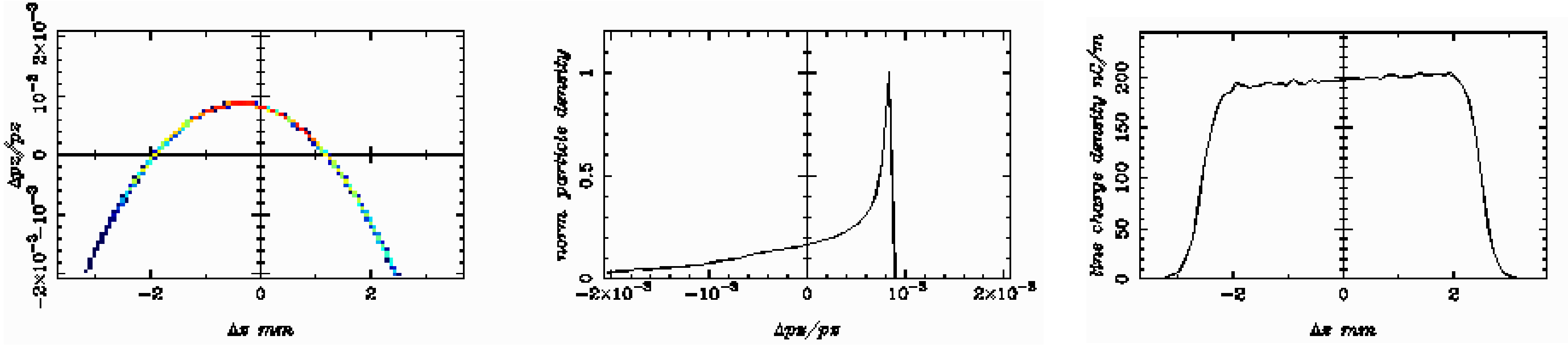
Strahldynamiksimulationen

- **Tracking-Tests ohne Raumladung**

ASTRA: z = 0.4998 m

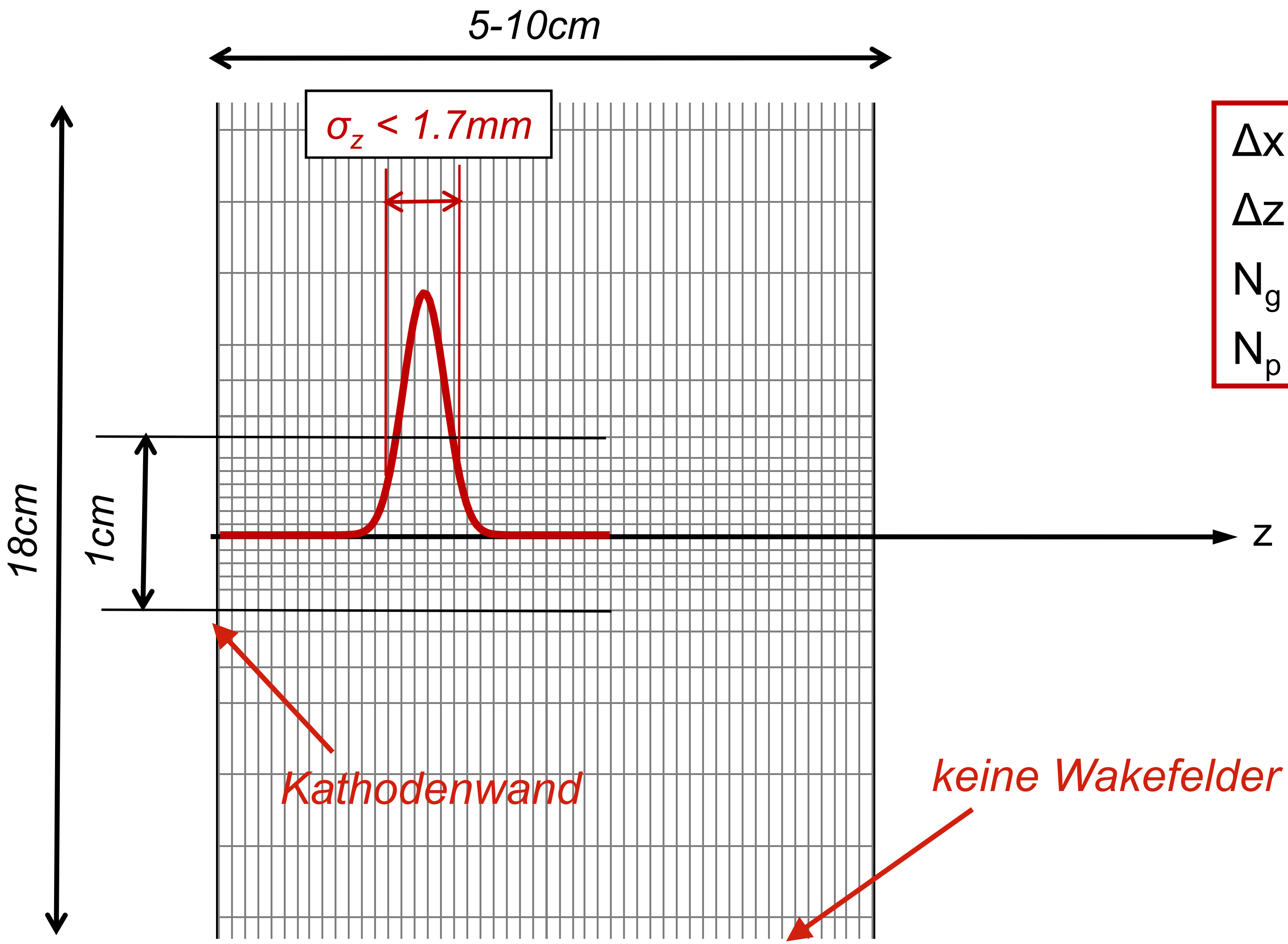


PIC-Code: z = 0.5 m



Strahldynamiksimulationen

- **Simulationsschema mit Raumladung**



Δx , Δy = 200µm…50µm

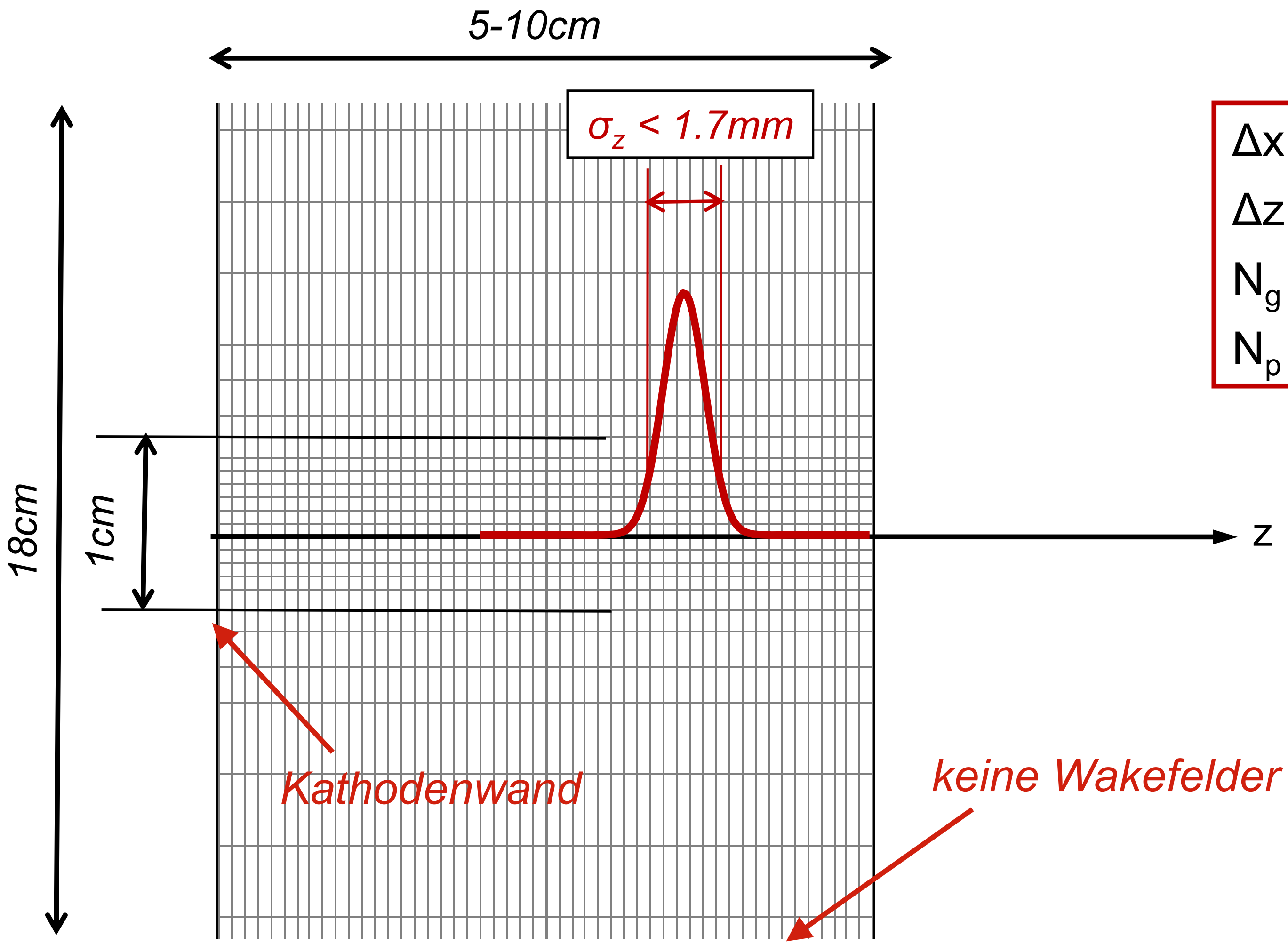
Δz = 200µm…12.5µm

$N_g = 2 \cdot 10^6 \ldots 9 \cdot 10^8$

$N_p = 20 \cdot 10^5 \ldots 10^6$

Strahldynamiksimulationen

- **Simulationsschema mit Raumladung**



Δx , Δy = 200µm…50µm

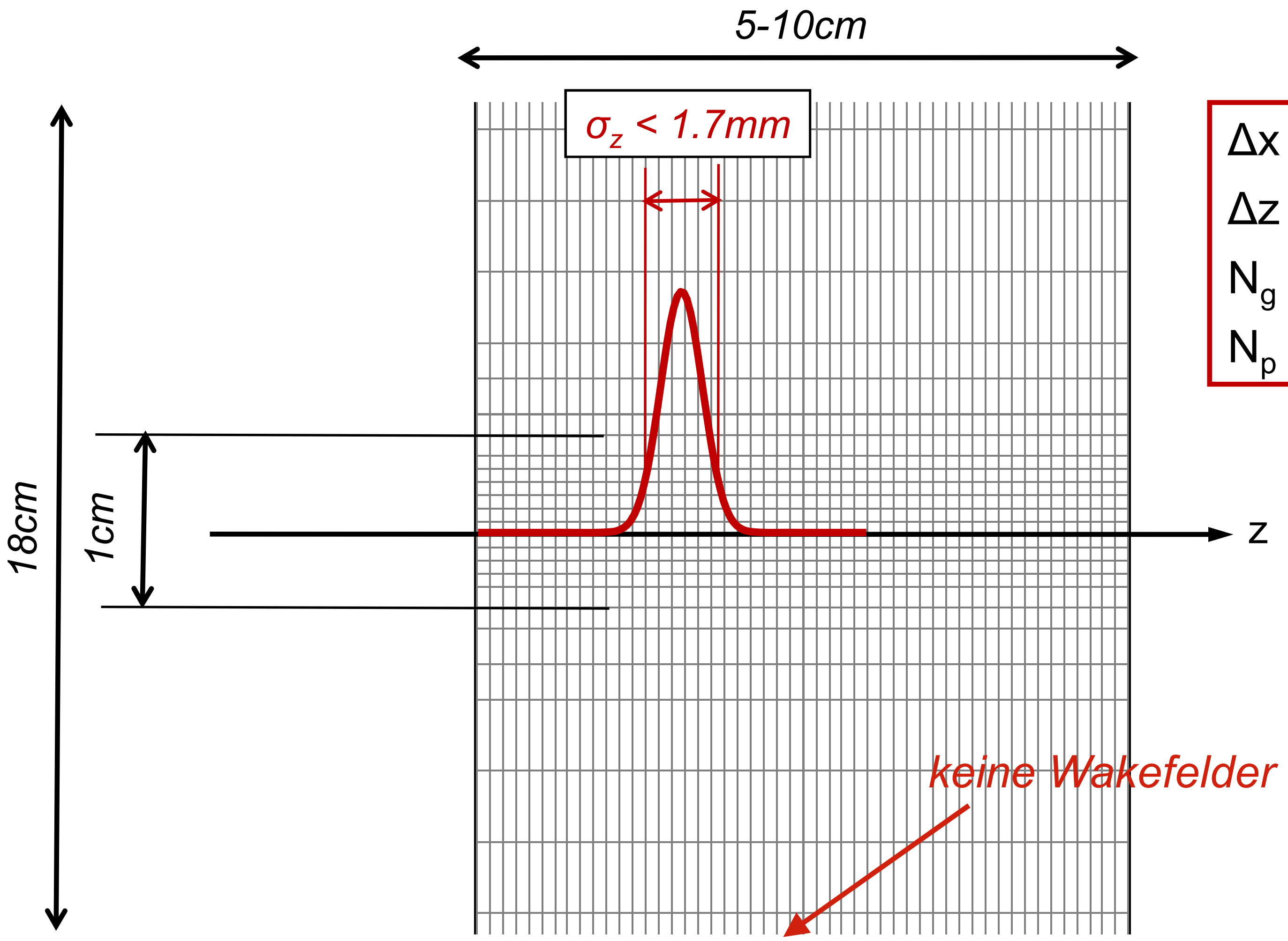
Δz = 200µm…12.5µm

$N_g = 2 \cdot 10^6 \ldots 9 \cdot 10^8$

$N_p = 20 \cdot 10^5 \ldots 10^6$

Strahldynamiksimulationen

- **Simulationsschema mit Raumladung**



Δx , Δy = 200μm…50μm

Δz = 200μm…12.5μm

$N_g = 2 \cdot 10^6 \ldots 9 \cdot 10^8$

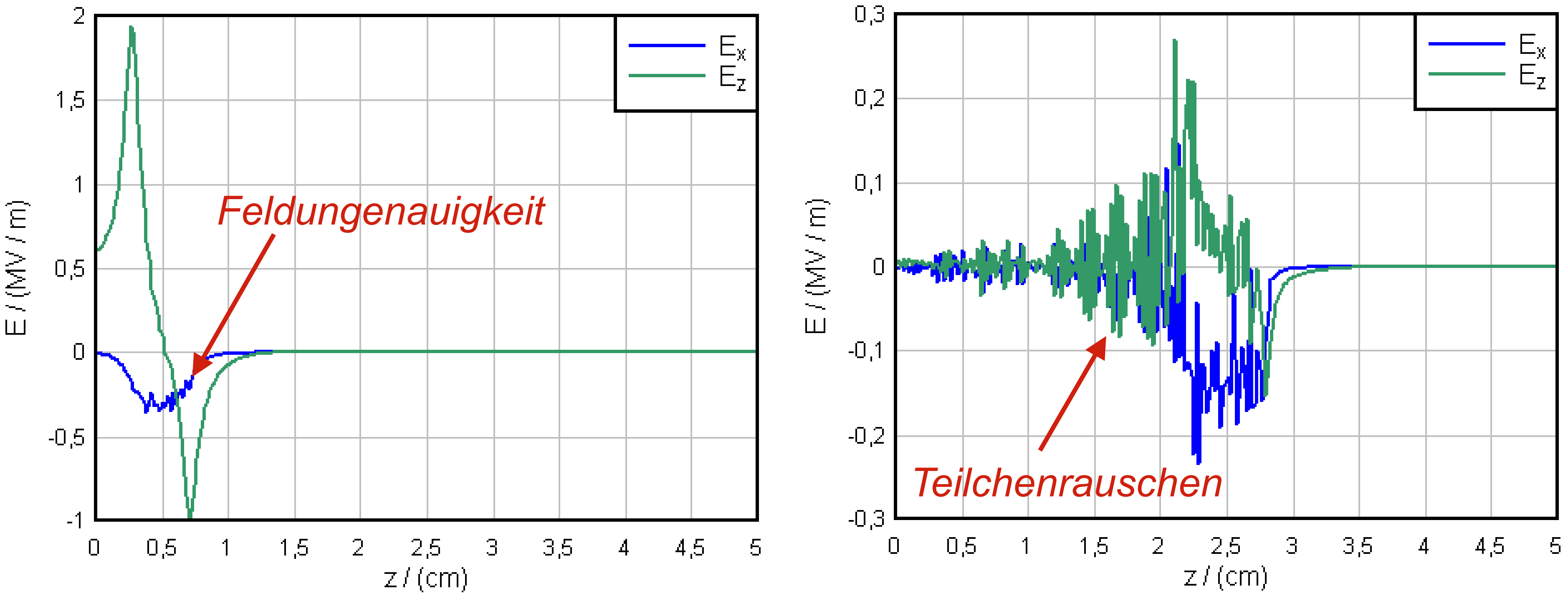
$N_p = 20 \cdot 10^5 \ldots 10^6$

Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

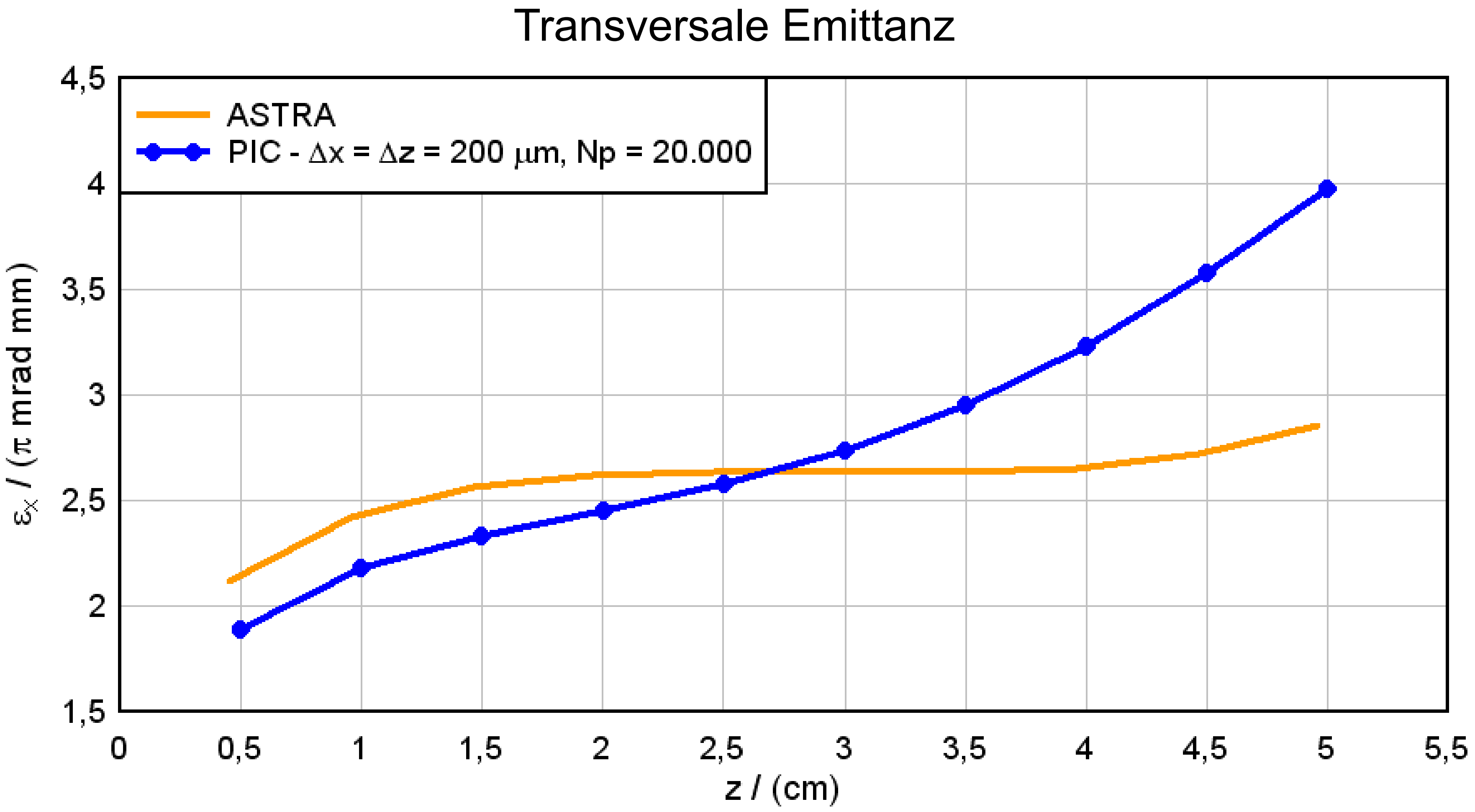
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 200\mu m, N_p = 20.000$



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

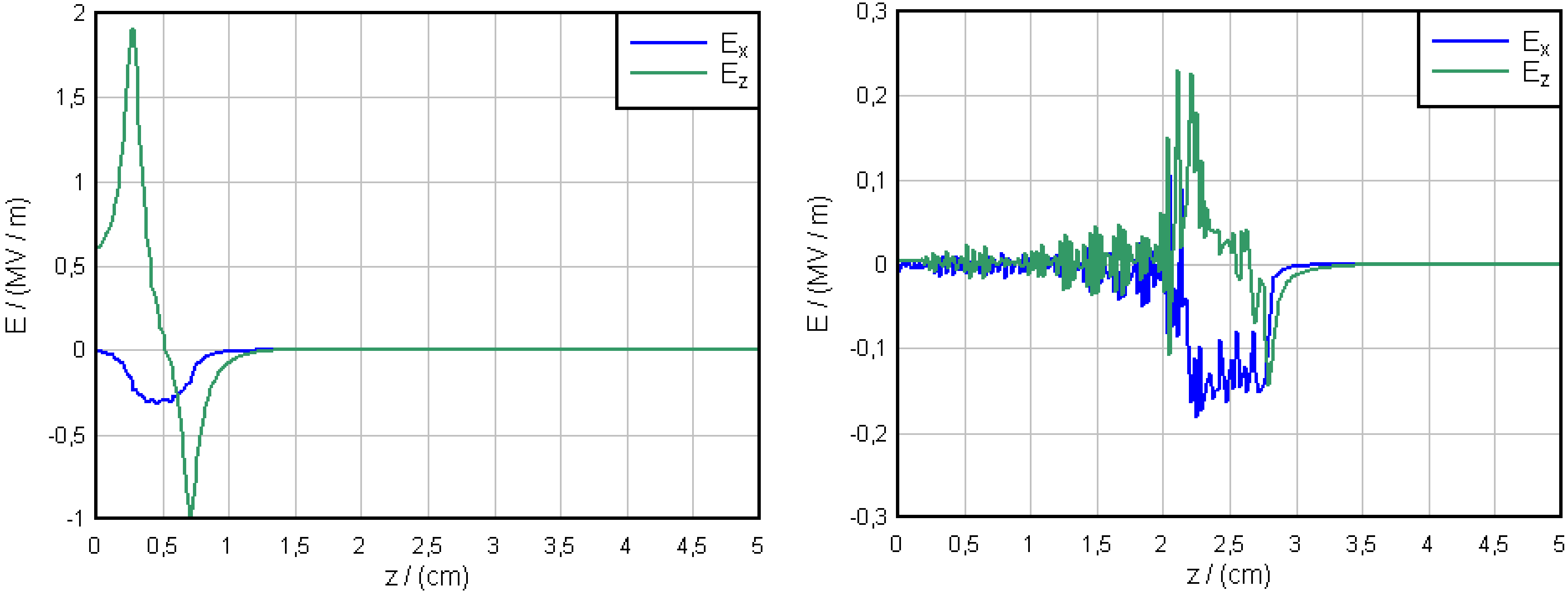


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

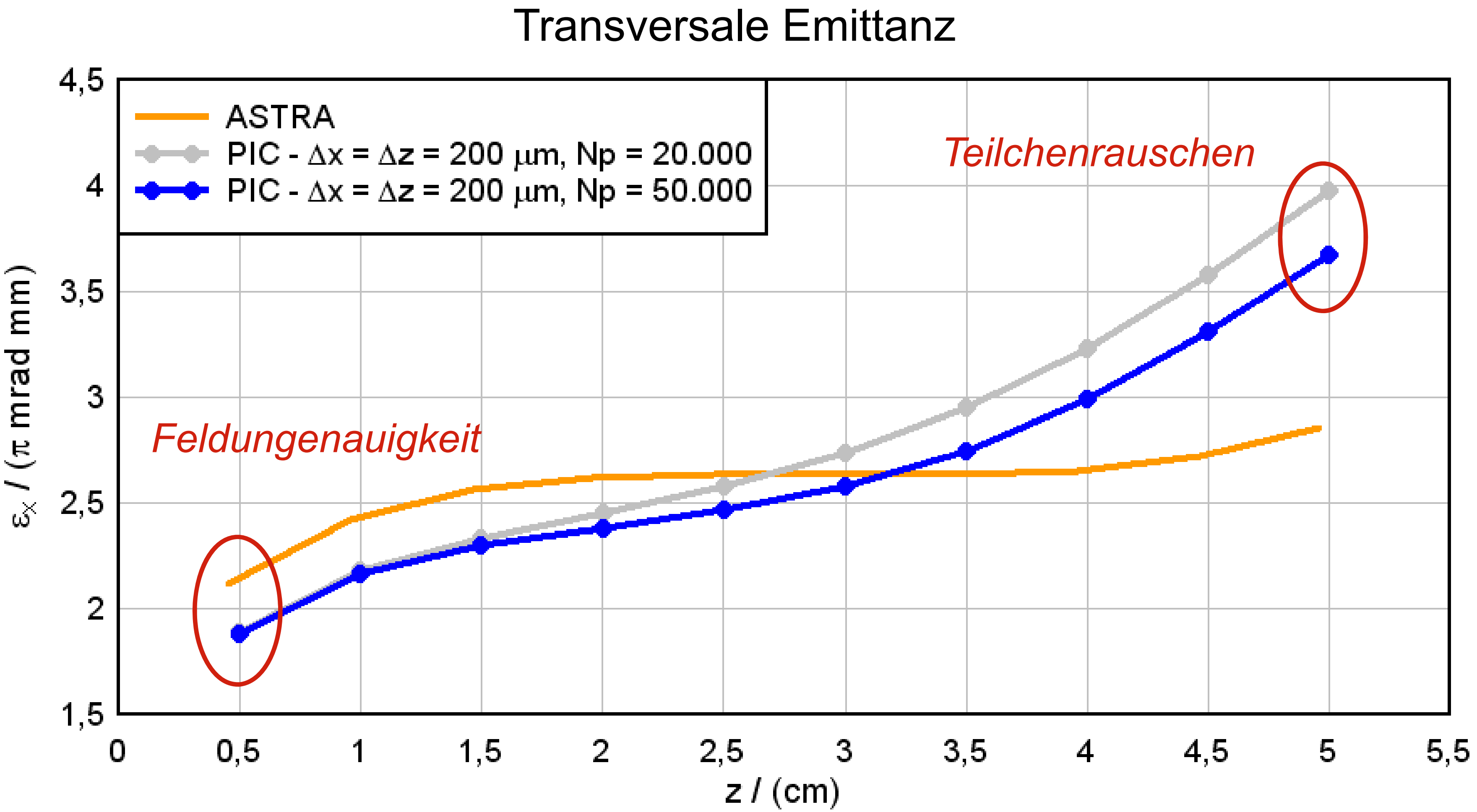
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 200\mu m$, N_p = 50.000



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

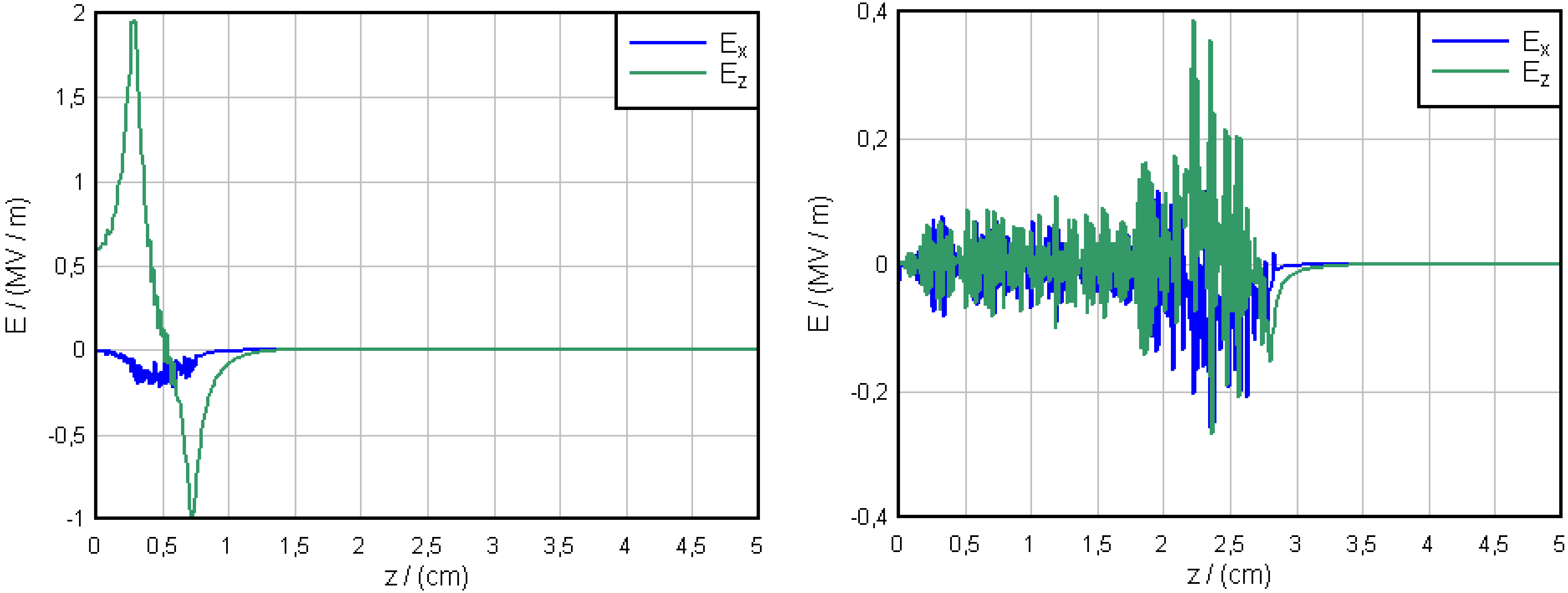


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

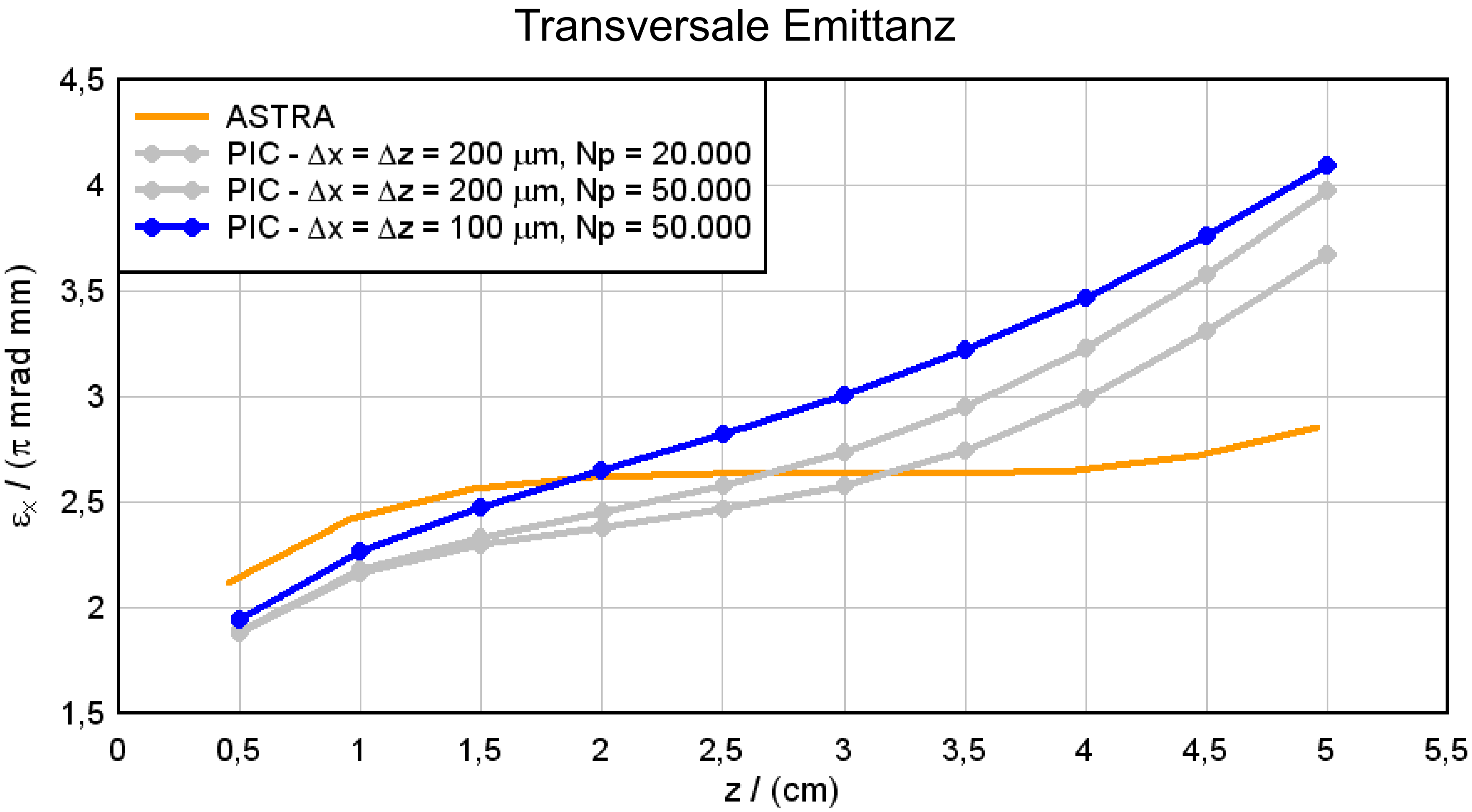
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 100\mu m$, $N_p = 50.000$



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

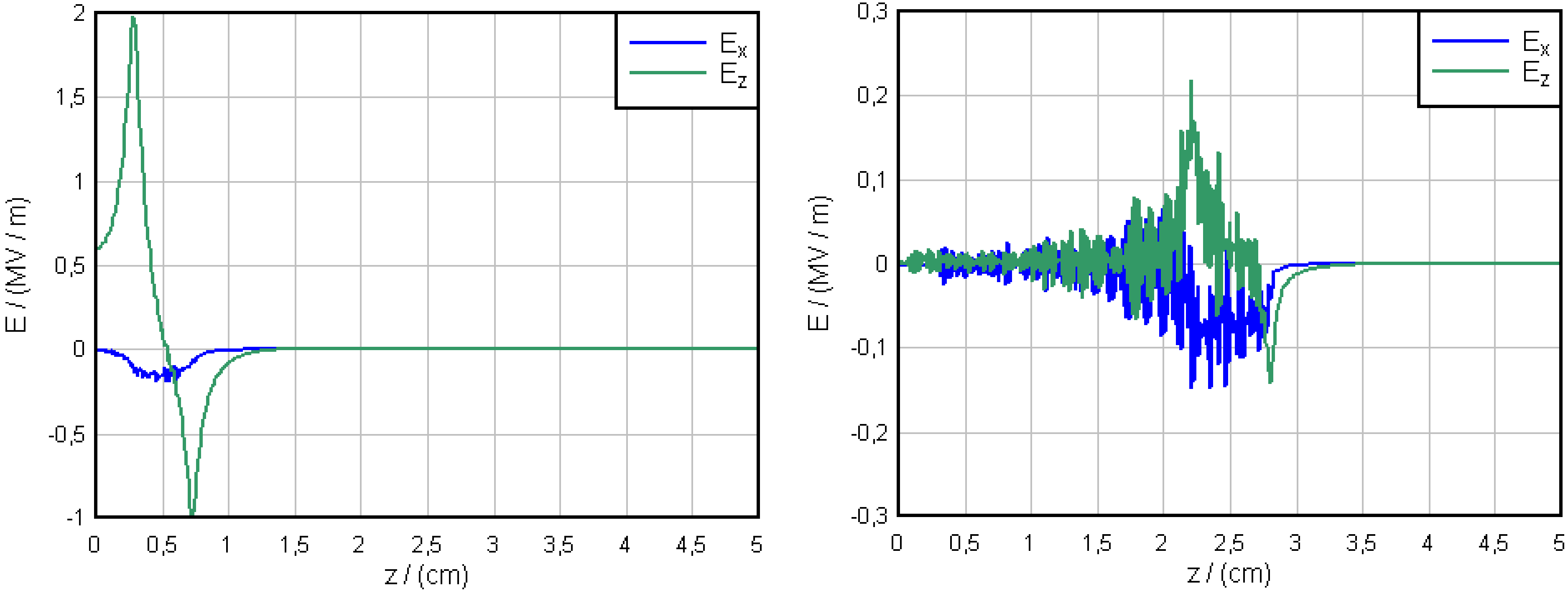


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

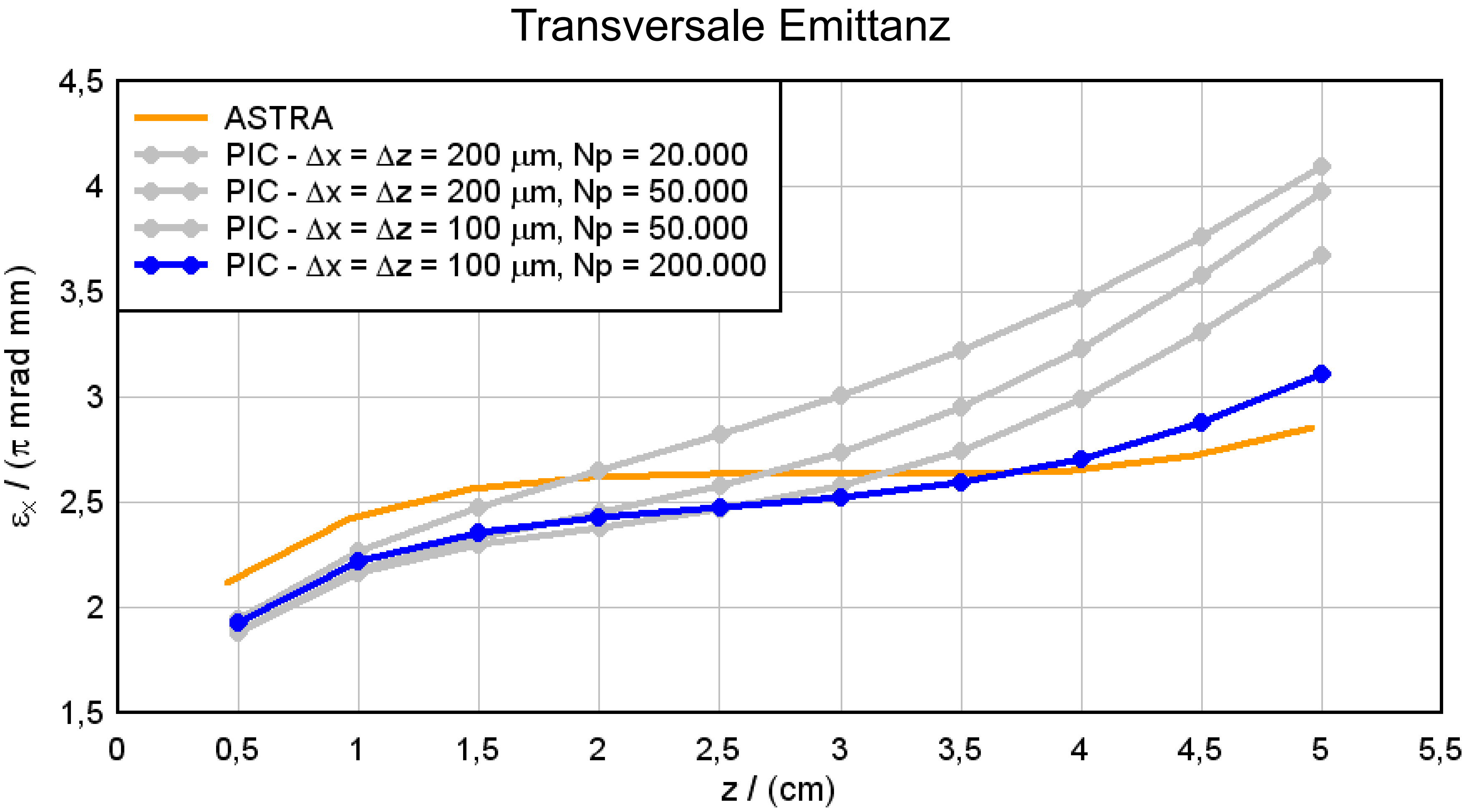
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 100\mu m$, $N_p = 200.000$



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

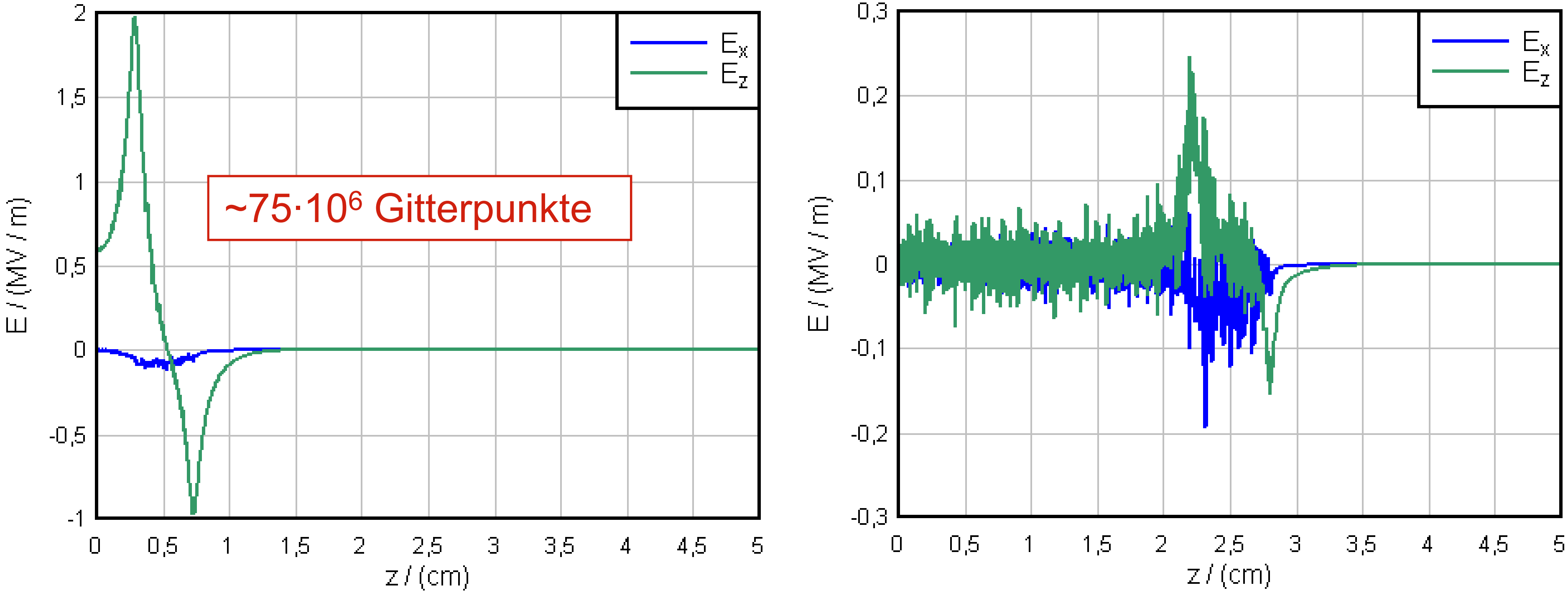


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

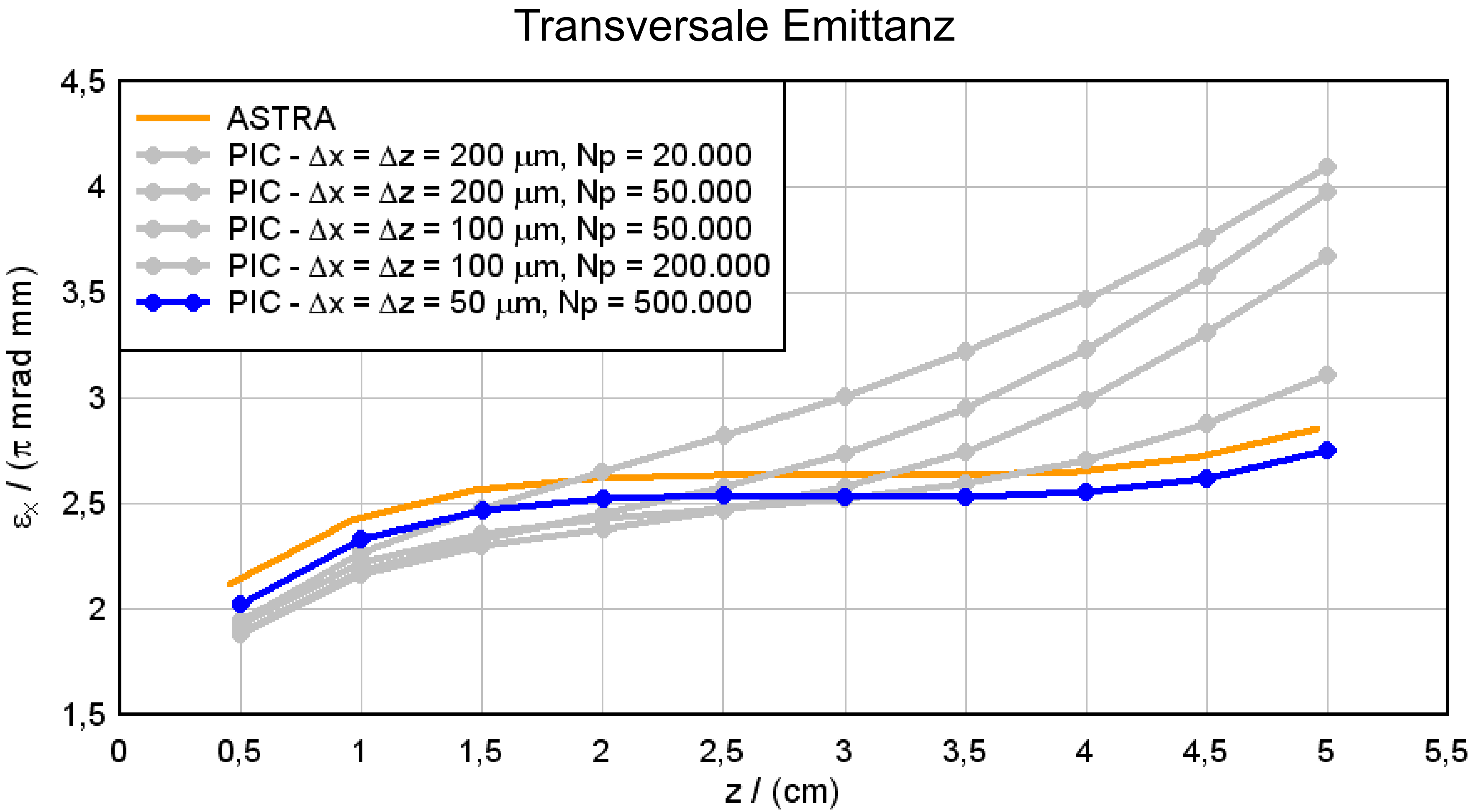
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 50 \mu m$, $N_p = 500.000$



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

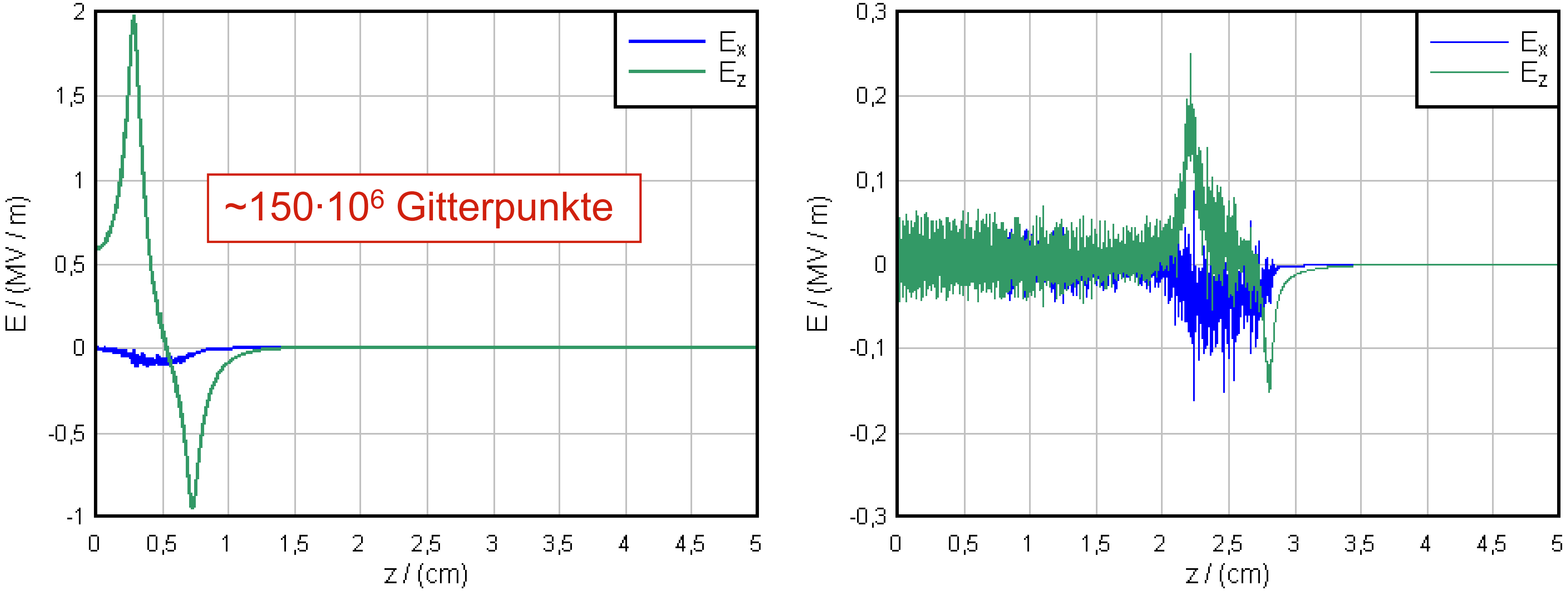


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenztests mit Raumladung**

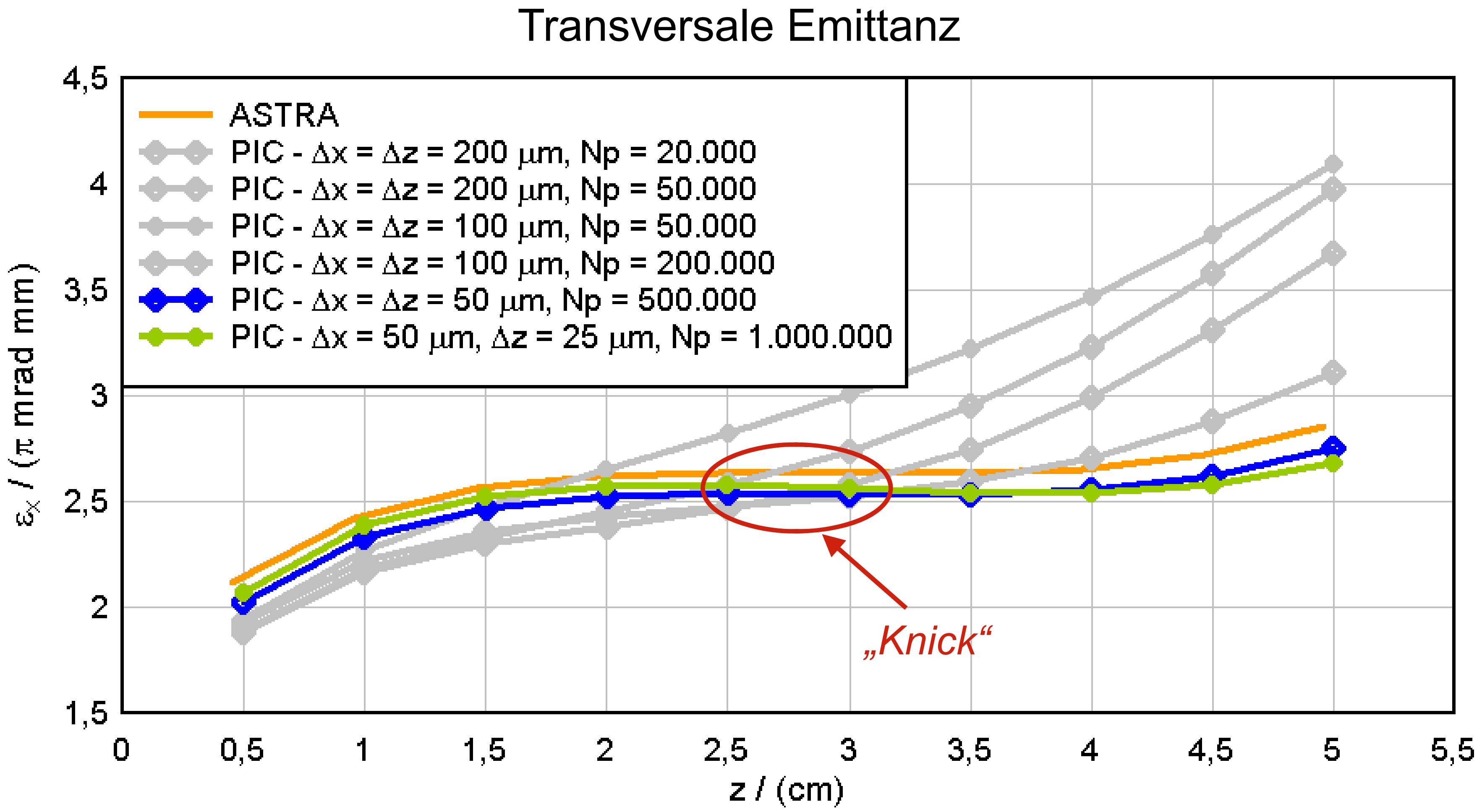
Feld auf der Achse

Δx = 50µm, Δz = 25µm, N_p = 1.000.000


~$150 \cdot 10^6$ Gitterpunkte

Strahldynamiksimulationen

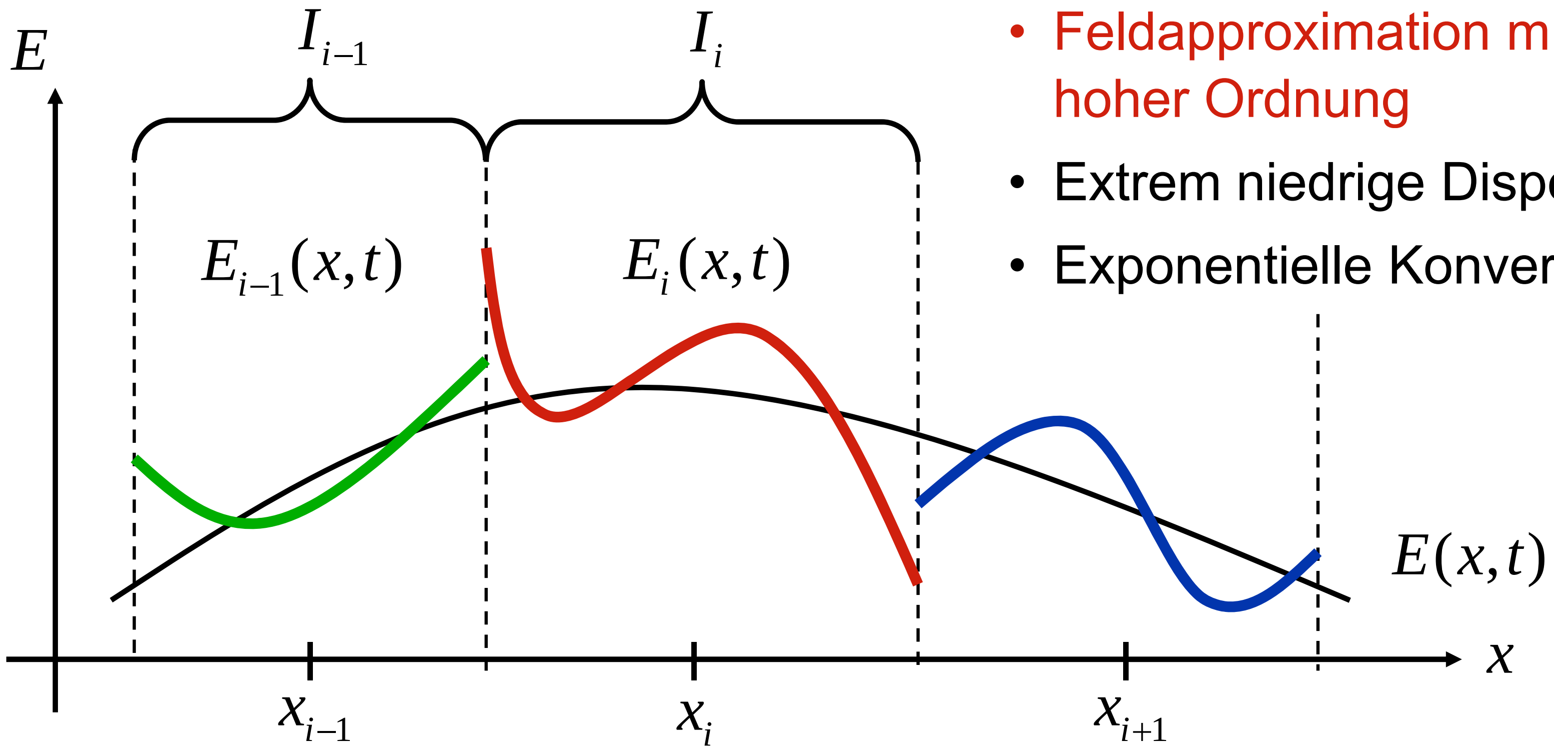
- **Konvergenztests mit Raumladung**



Strahldynamiksimulationen

- **Hoher Ordnung PIC**

$$\vec{E}(\vec{x},t)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{p=0}^{P}\vec{e}_{i;p}(t)\,\varphi_{i;p}(\vec{x}),\quad \vec{H}(\vec{x},t)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{p=0}^{P}\vec{h}_{i;p}(t)\,\varphi_{i;p}(\vec{x})$$

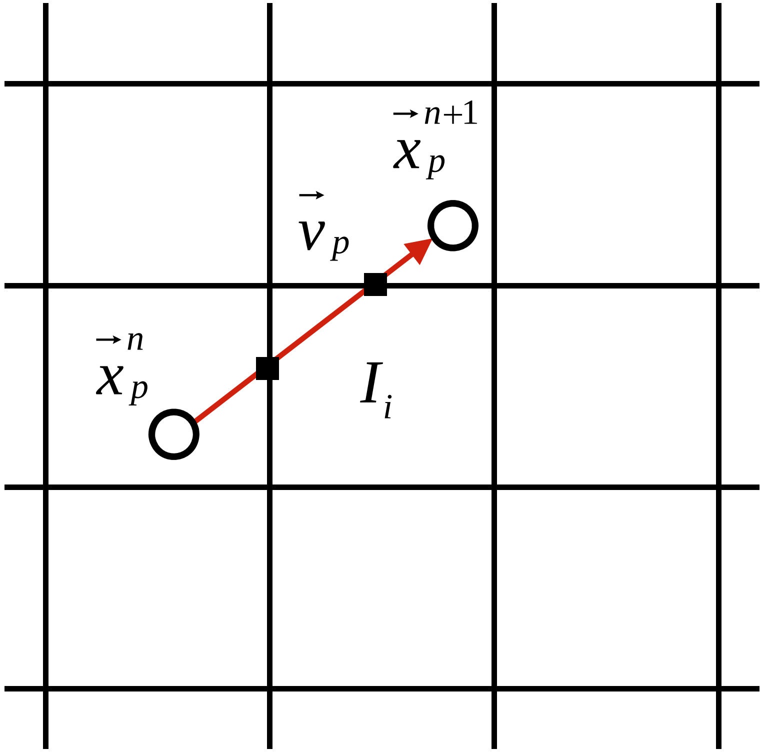


- Feldapproximation mit Polynome hoher Ordnung
- Extrem niedrige Dispersion
- Exponentielle Konvergenz

Strahldynamiksimulationen

- **Hoher Ordnung PIC**

„NGP“–Strominterpolation mit hoher Ordnung:



$$\boxed{\vec{j}_{i;p} = q\vec{v}_p \int_{t^n}^{t^{n+1}} dt \int d^3\vec{x}\, \delta\left(\vec{x}-\vec{x}_p\right) \varphi_{i;p}(\vec{x})}$$

Ladungserhaltene Stromintegration über Schnittpfade für:

a) jedes Teilchen

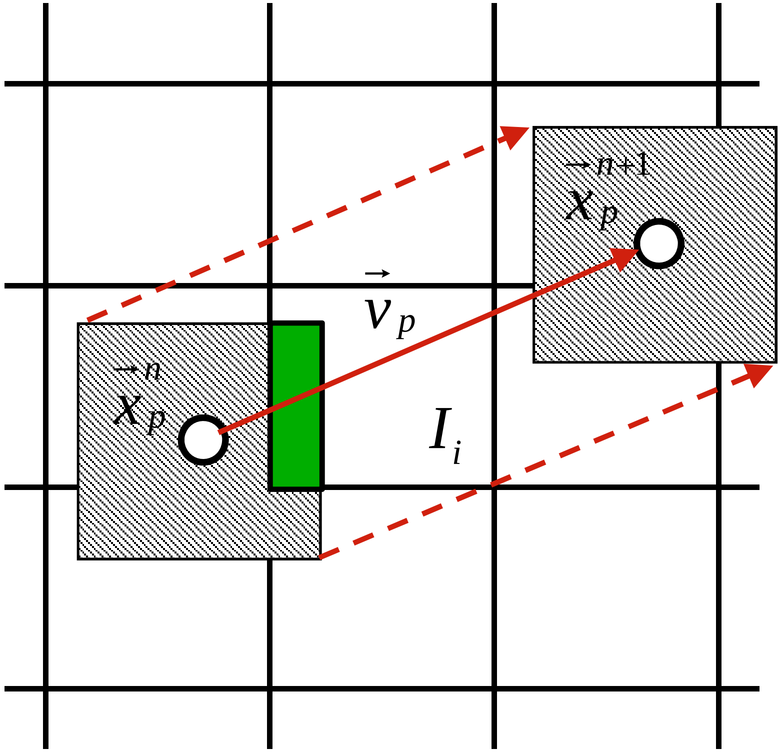
b) jede Zelle und

c) jede Approximationsfunktion

Strahldynamiksimulationen

- **Hoher Ordnung PIC**

„CIC“–Strominterpolation mit hoher Ordnung (seit 2010):



$$\vec{j}_{i;p} = q\vec{v}_p \int_{t^n}^{t^{n+1}} dt \int d^3\vec{x}\,\theta_{\Delta x}\left(\vec{x}-\vec{x}_p\right)\varphi_{i;p}(\vec{x})$$

Ladungserhaltene Stromintegration über Schnittvolumina für:

a) jedes Teilchen

b) jede Zelle und

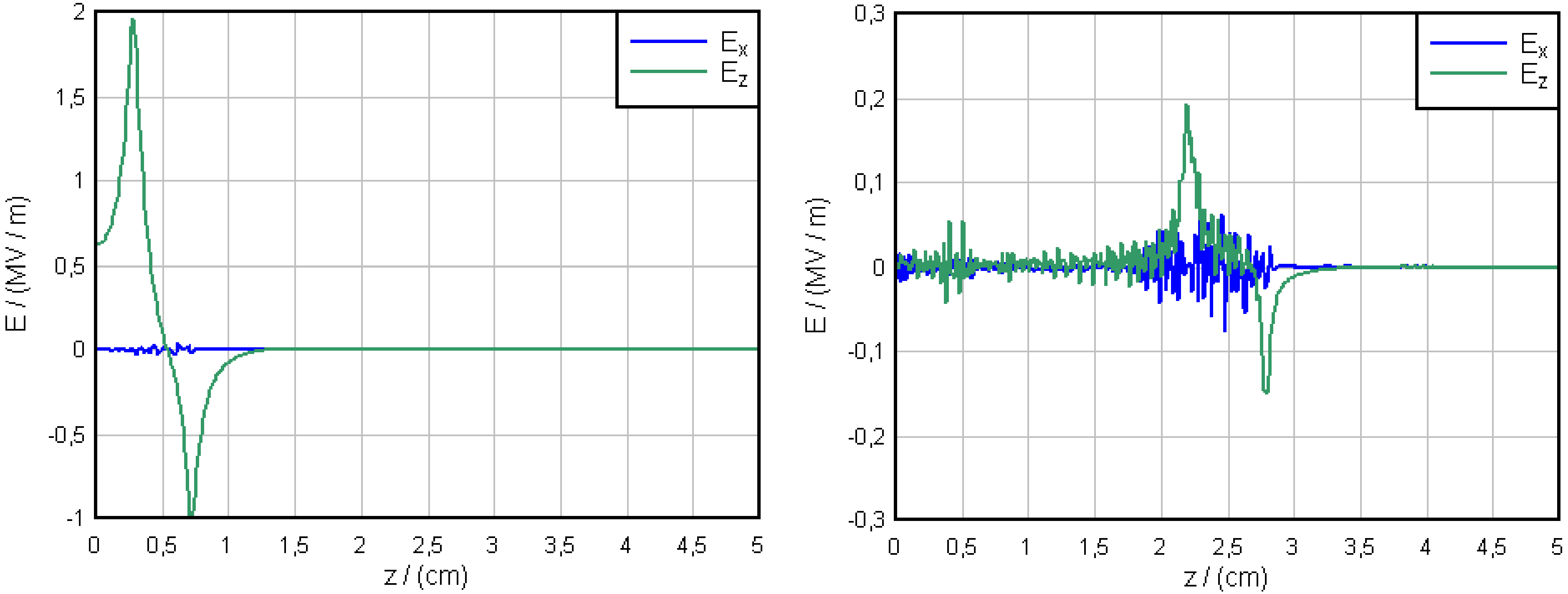
c) jede Approximationsfunktion

Strahldynamiksimulationen

- **Hoher Ordnung PIC**

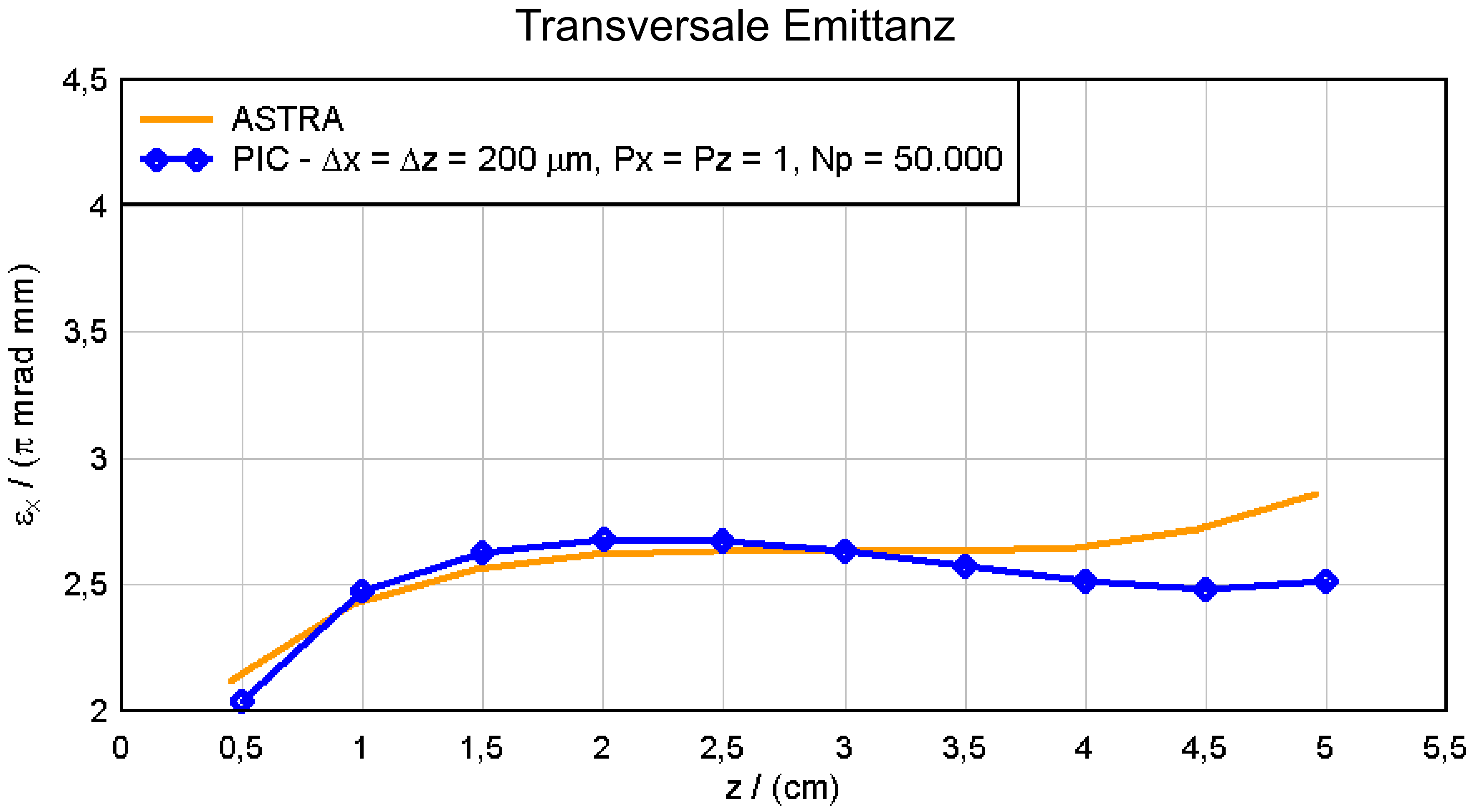
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 200\mu m$, $P_x = P_z = 1$, $N_p = 50.000$



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenz bei hoher Ordnung PIC**

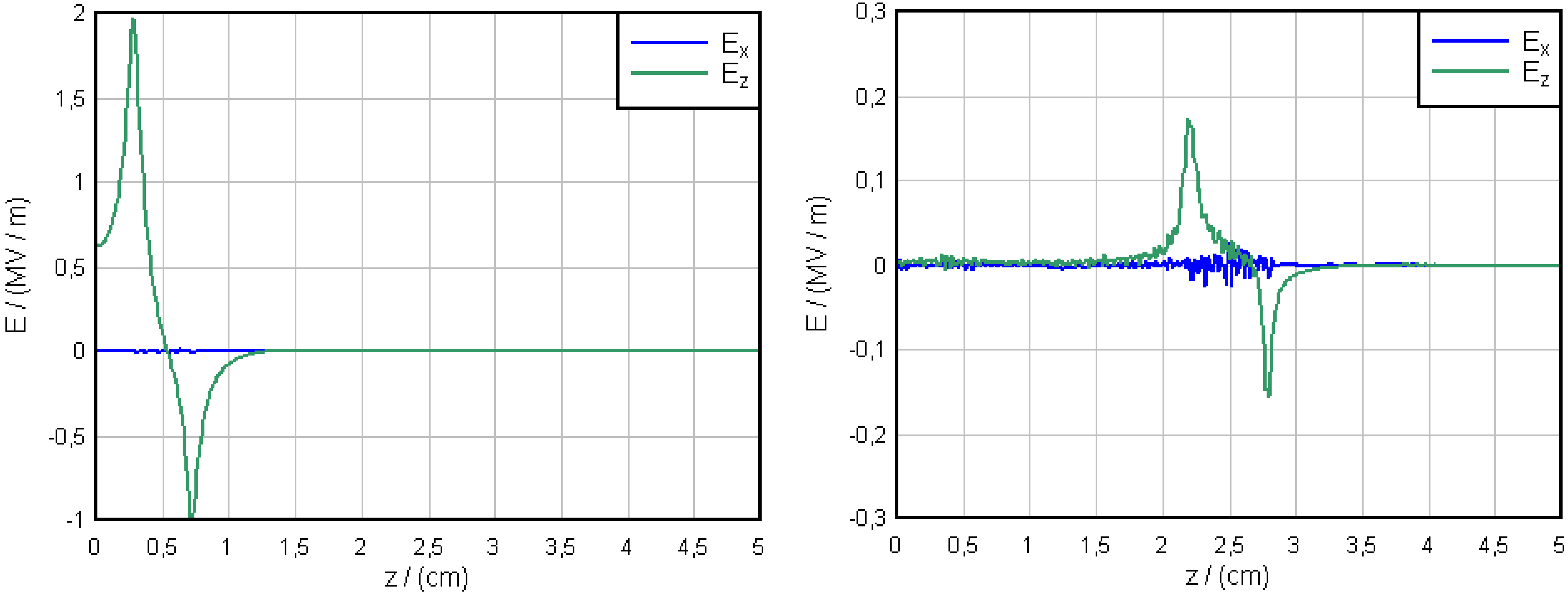


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenz bei hoher Ordnung PIC**

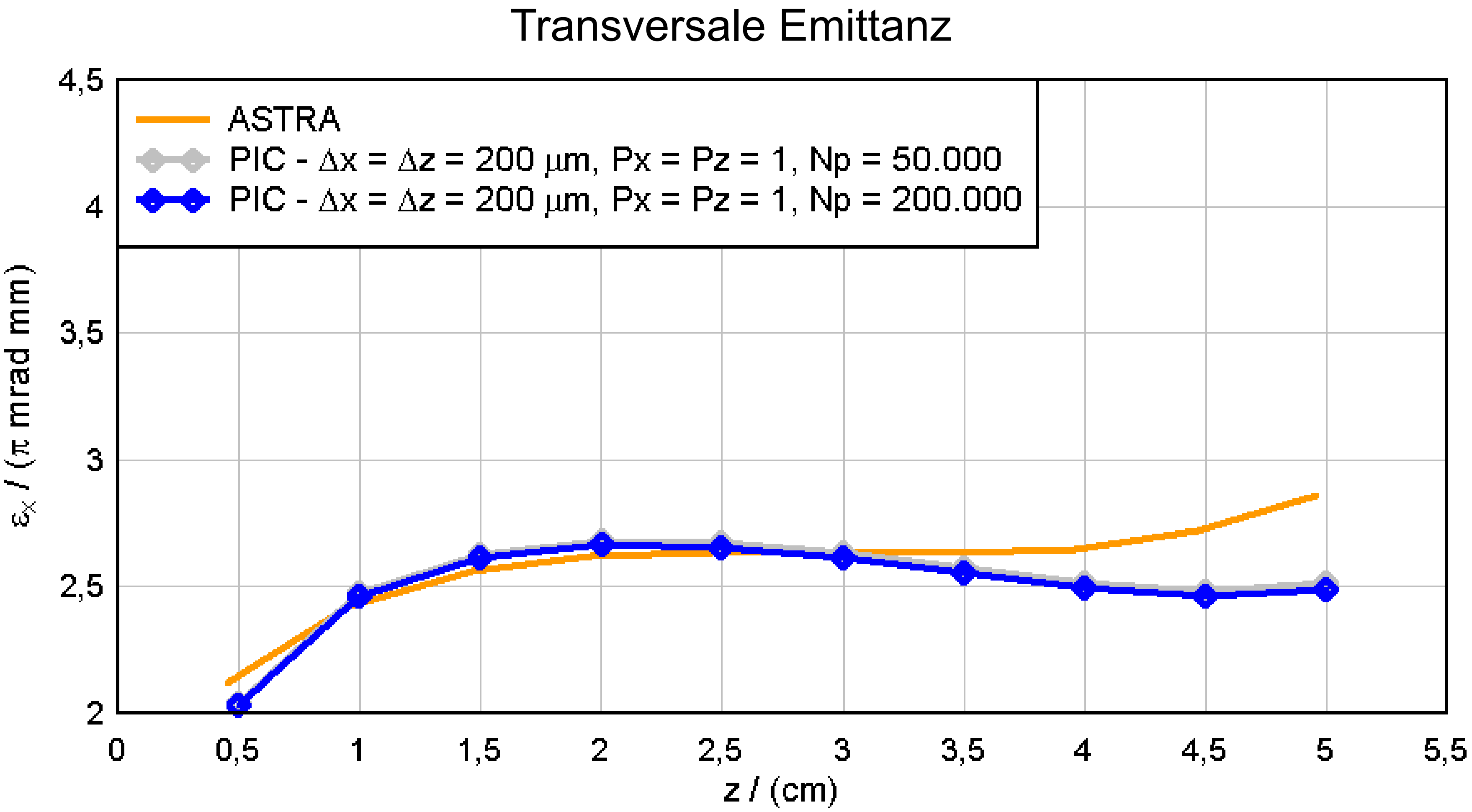
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 200\mu m, P_x = P_z = 1, N_p = 200.000$



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenz bei hoher Ordnung PIC**

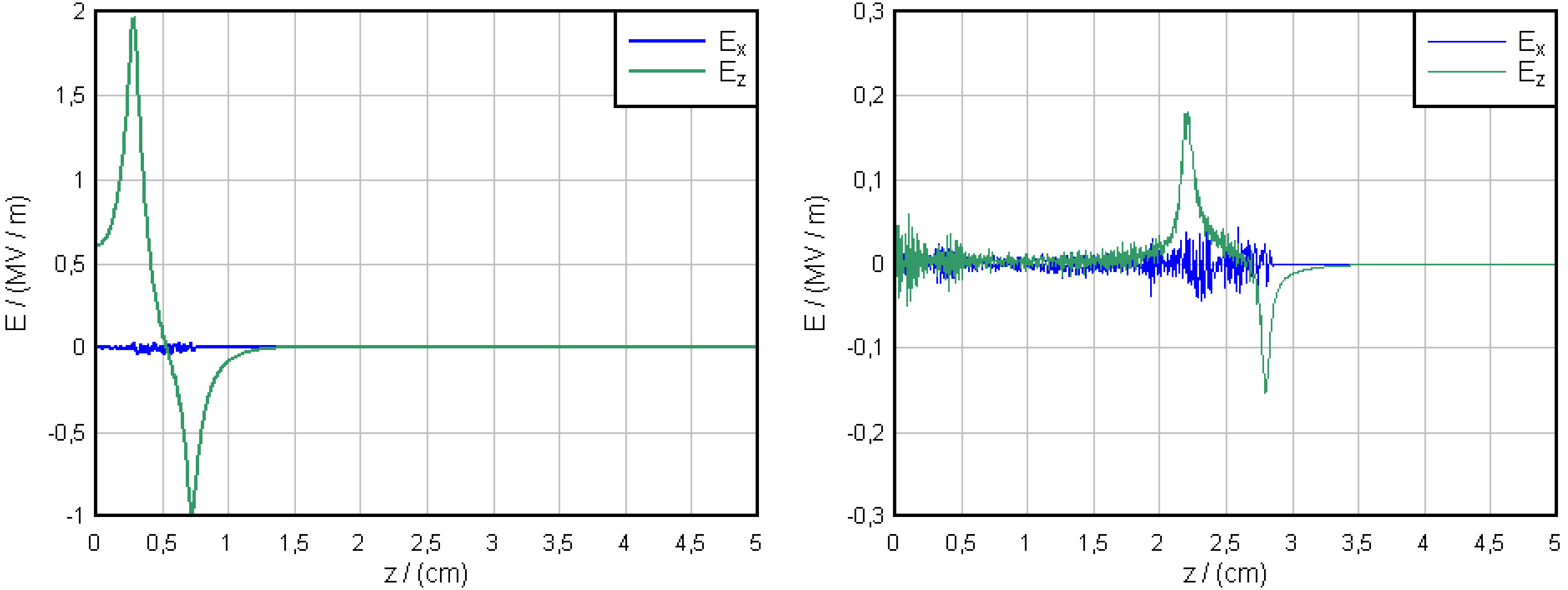


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenz bei hoher Ordnung PIC**

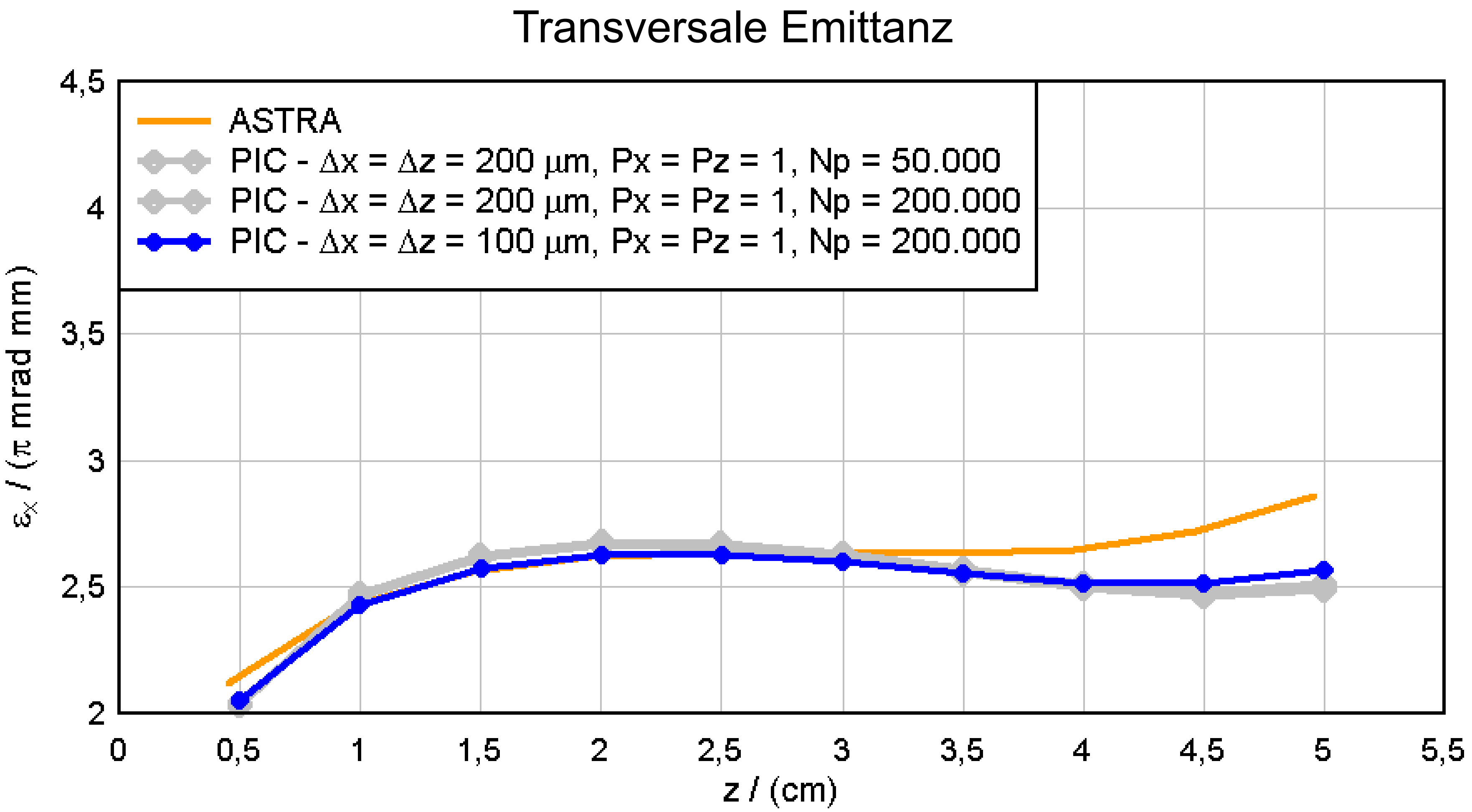
Feld auf der Achse

$\Delta x = \Delta z = 100\mu m$, $P_x = P_z = 1$, $N_p = 200.000$



Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenz bei hoher Ordnung PIC**

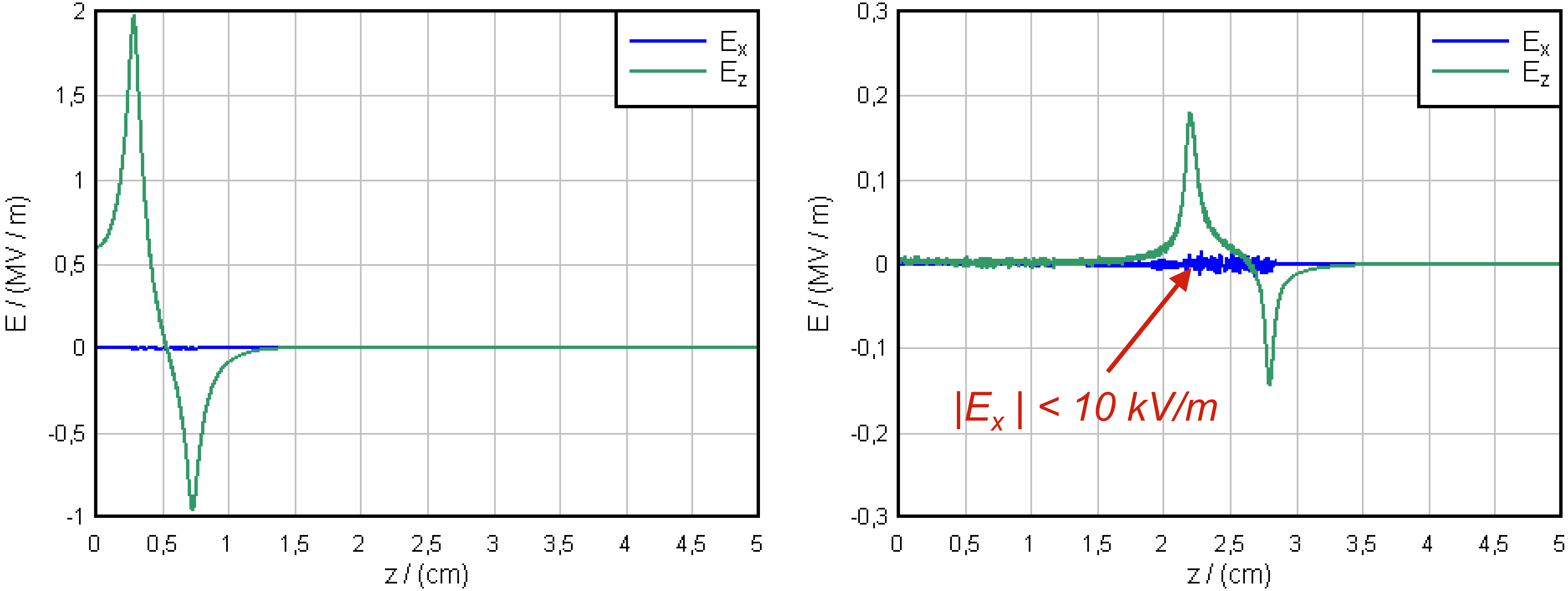


Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenz bei hoher Ordnung PIC**

Feld auf der Achse

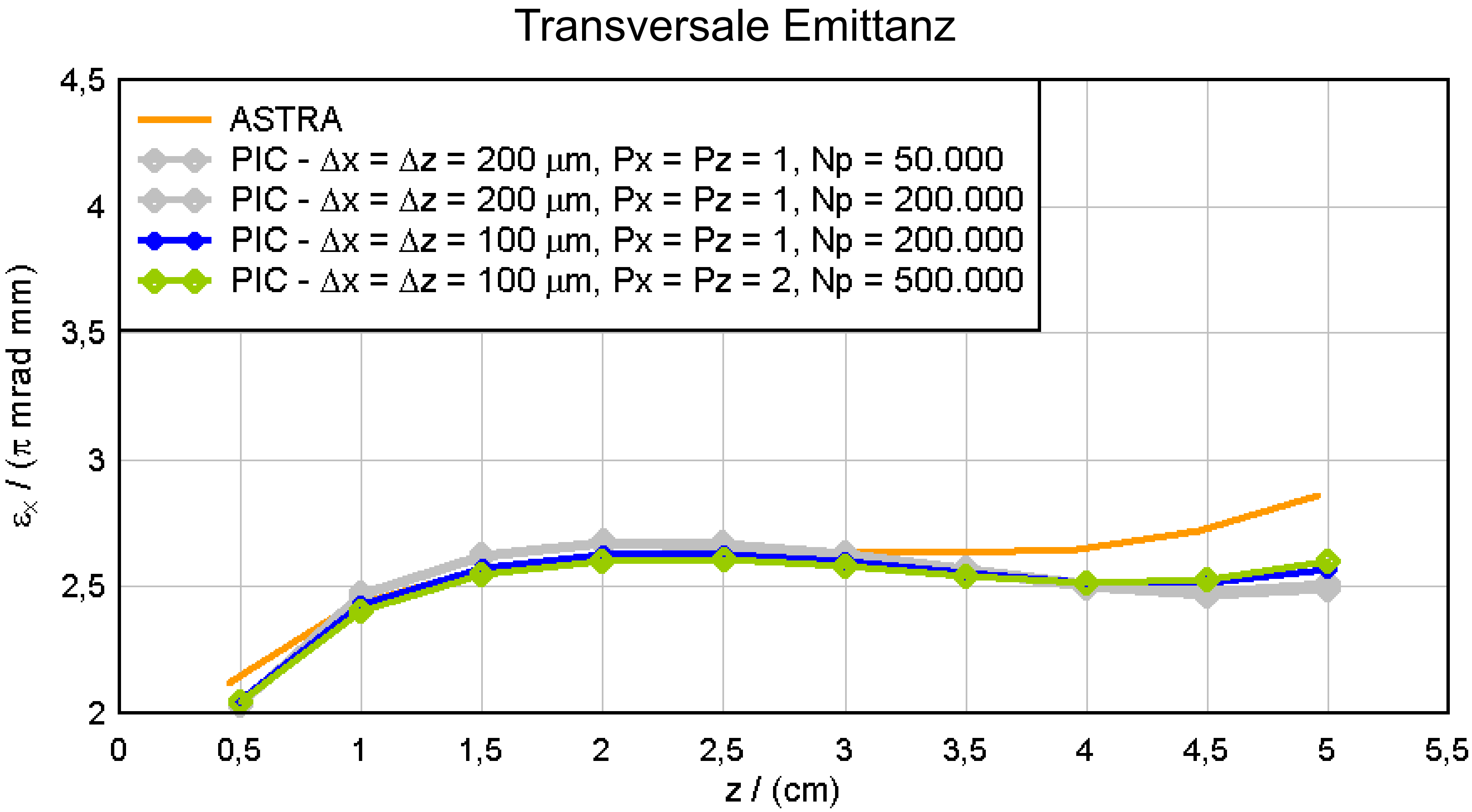
$\Delta x = \Delta z = 100 \mu m$, $P_x = P_z = 2$, $N_p = 500.000$



$|E_x| < 10$ kV/m

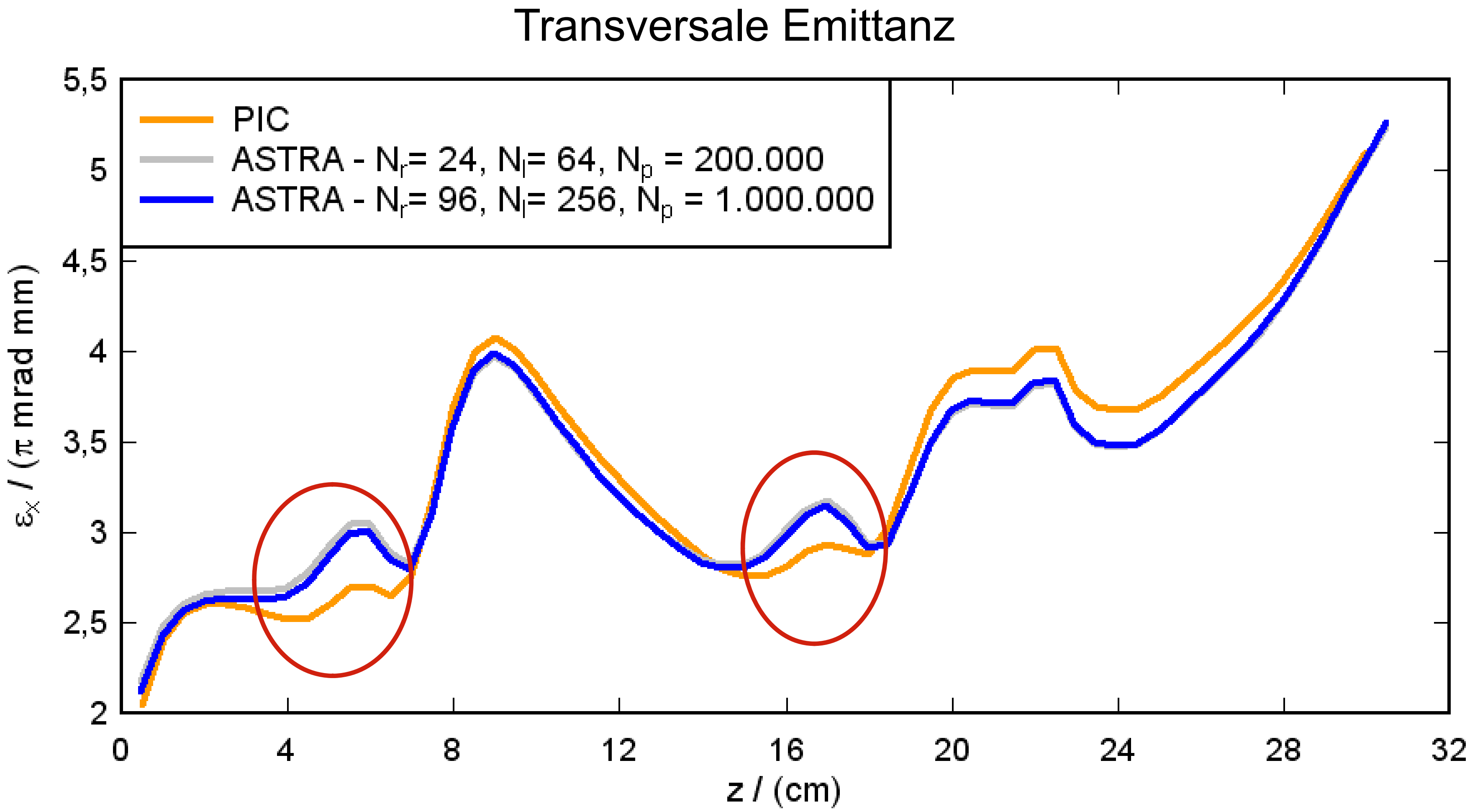
Strahldynamiksimulationen

- **Konvergenz bei hoher Ordnung PIC**



Strahldynamiksimulationen

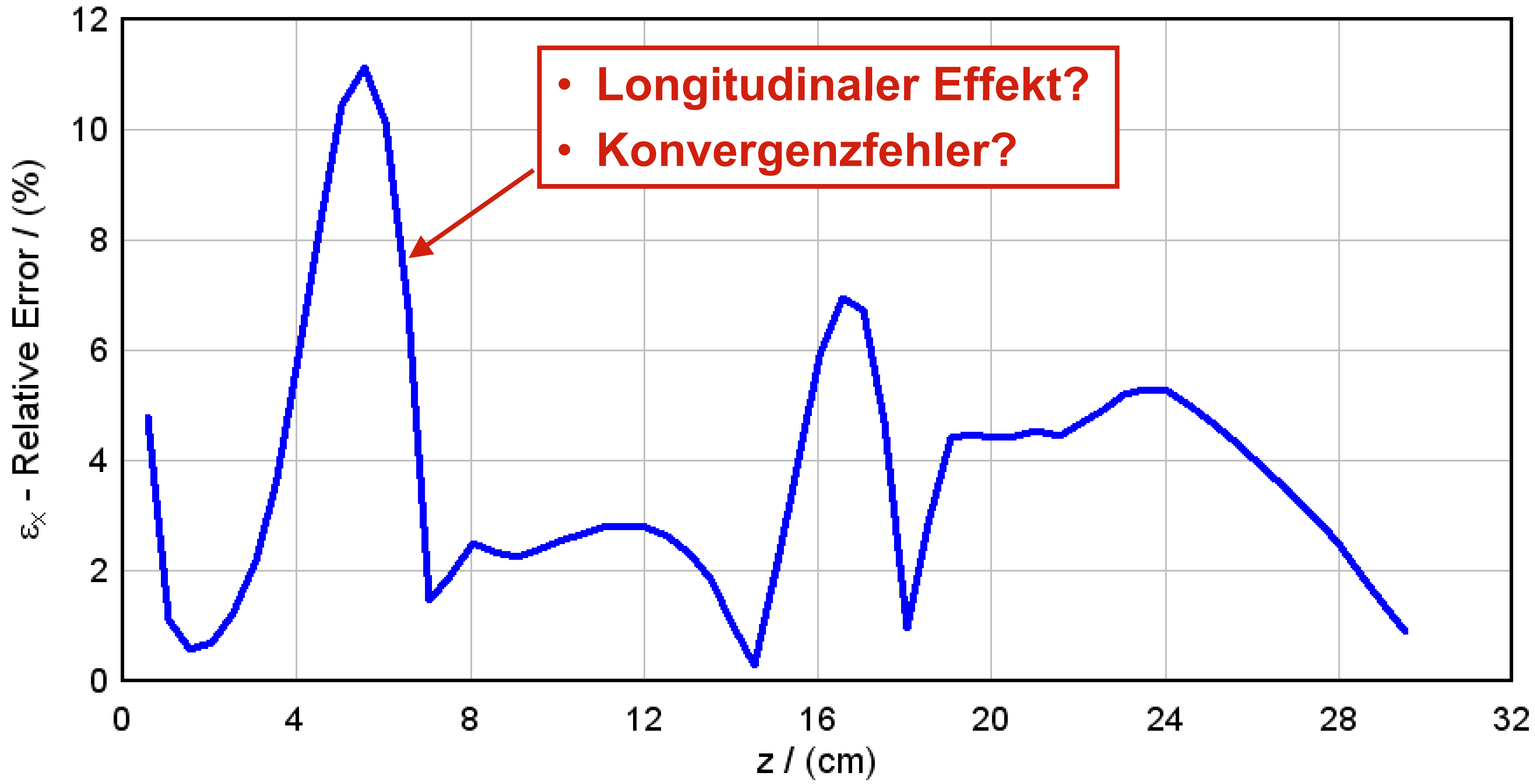
- **Vergleich ASTRA - PIC**



Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

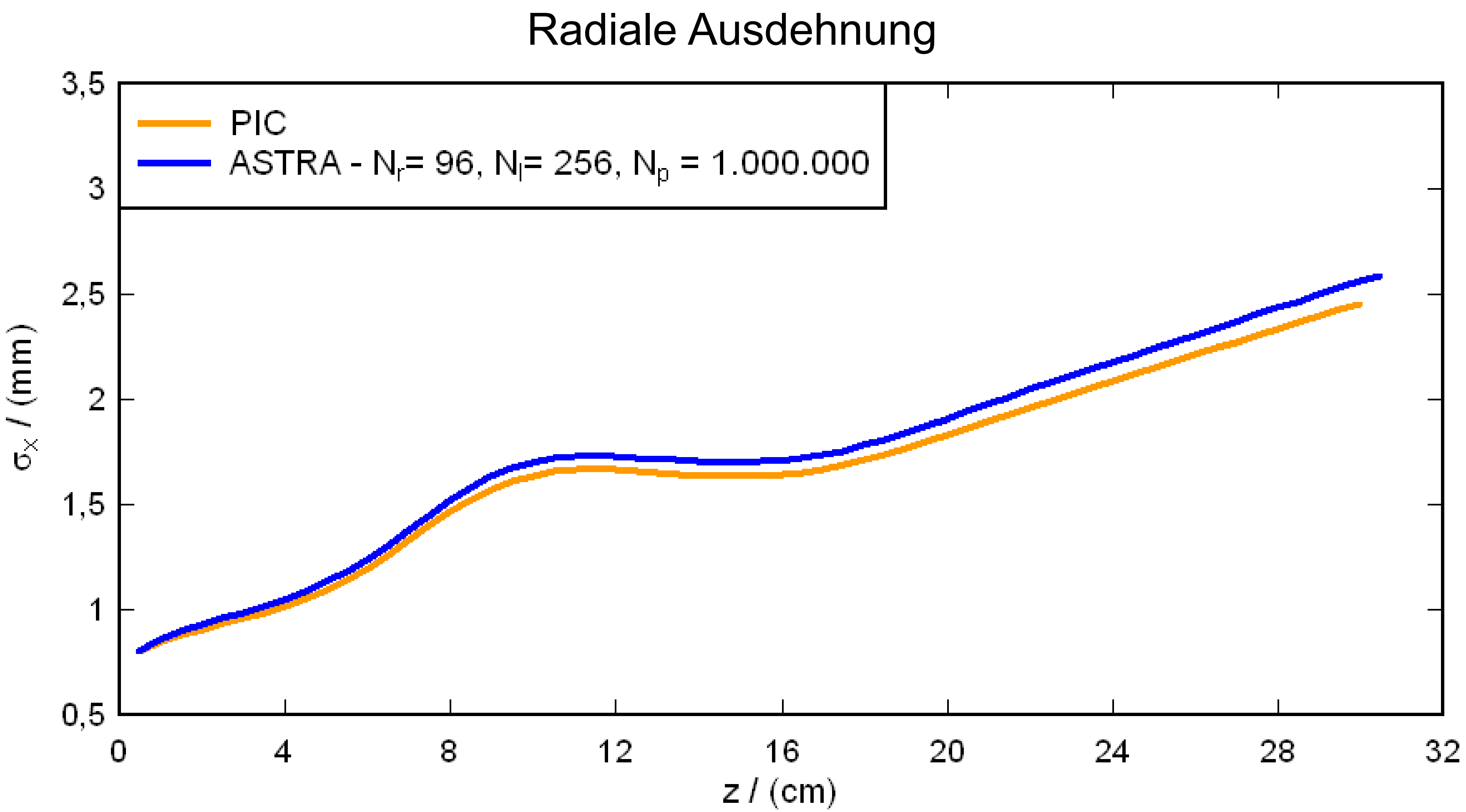
Abweichung des transversalen Emittanz



- **Longitudinaler Effekt?**
- **Konvergenzfehler?**

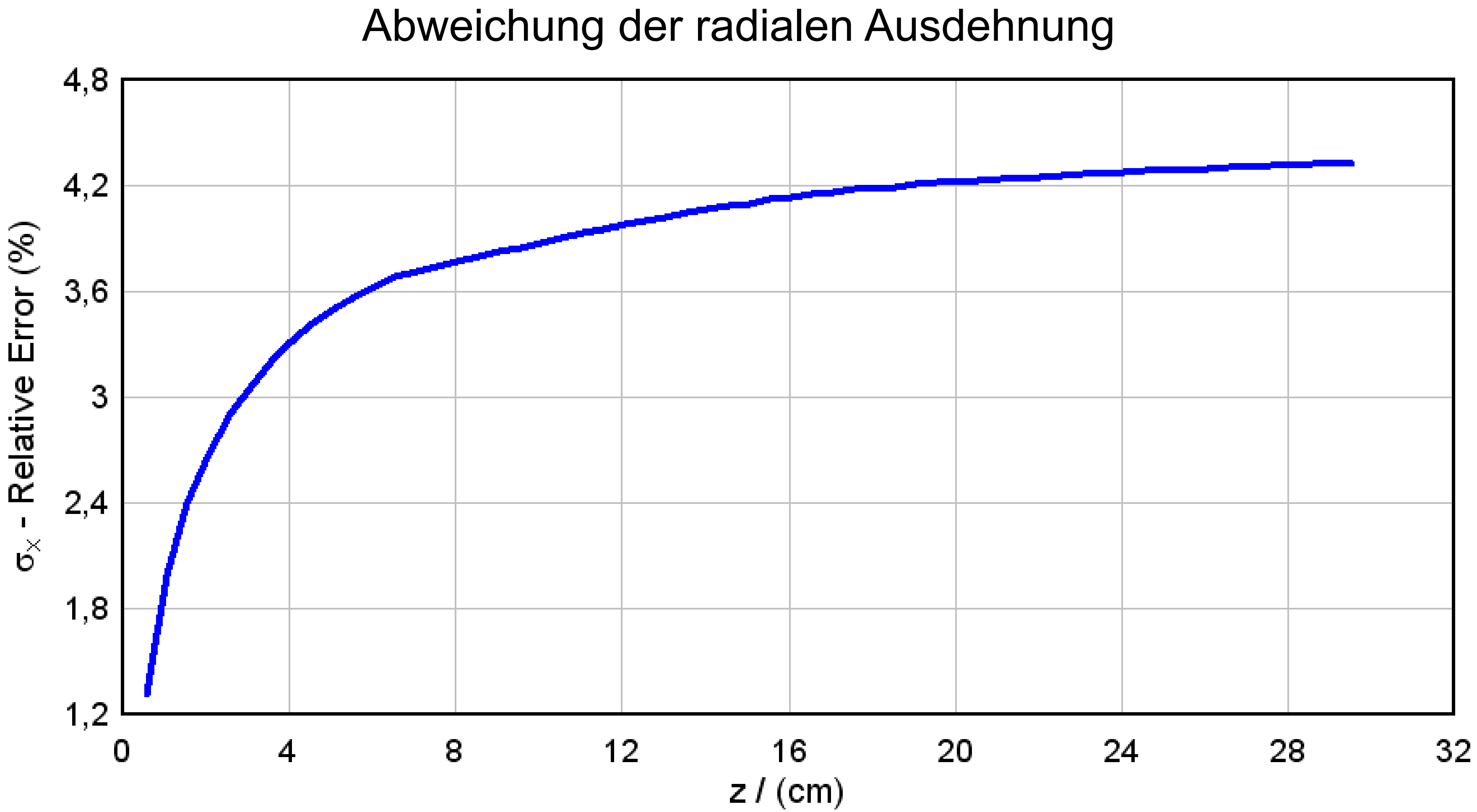
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**



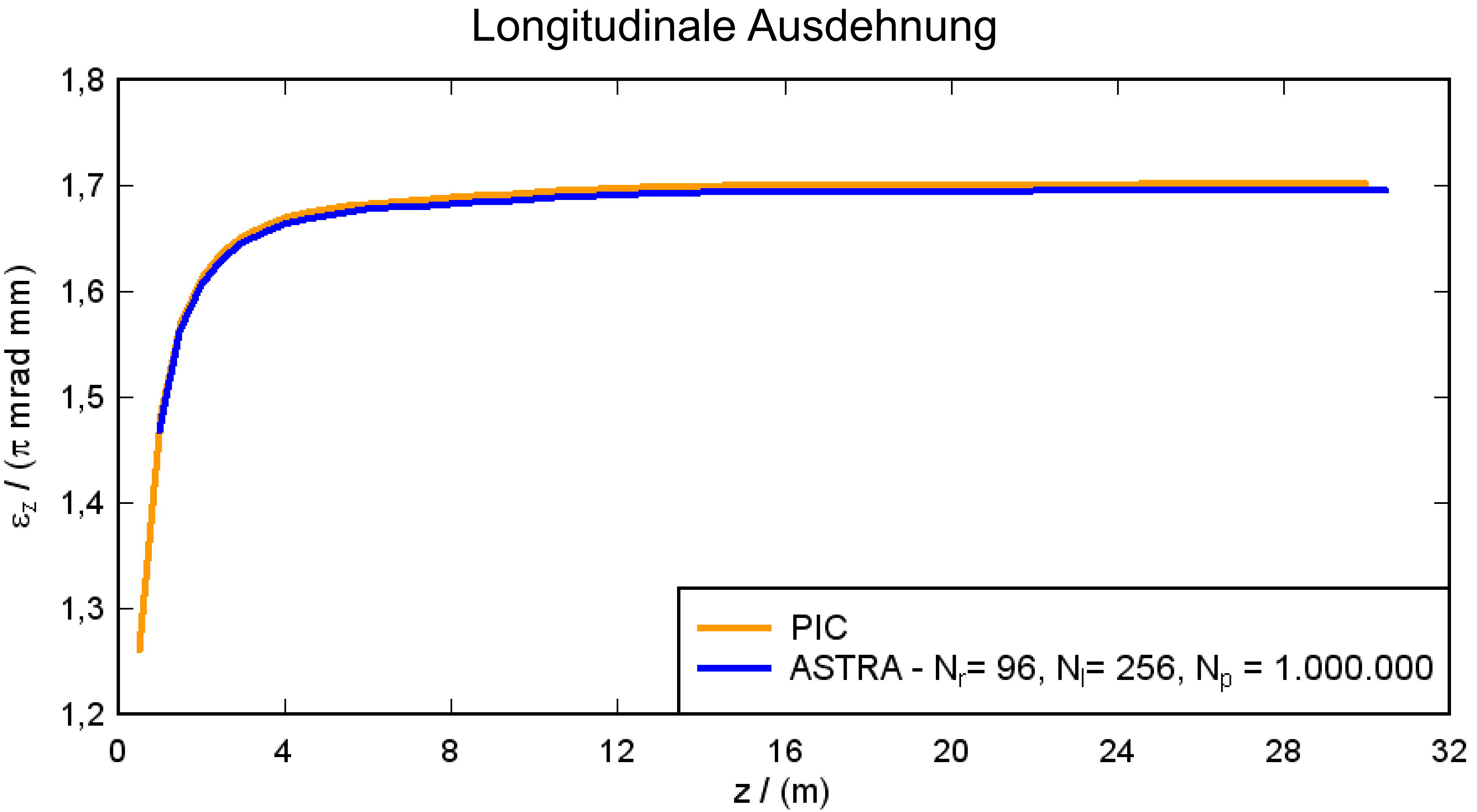
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**



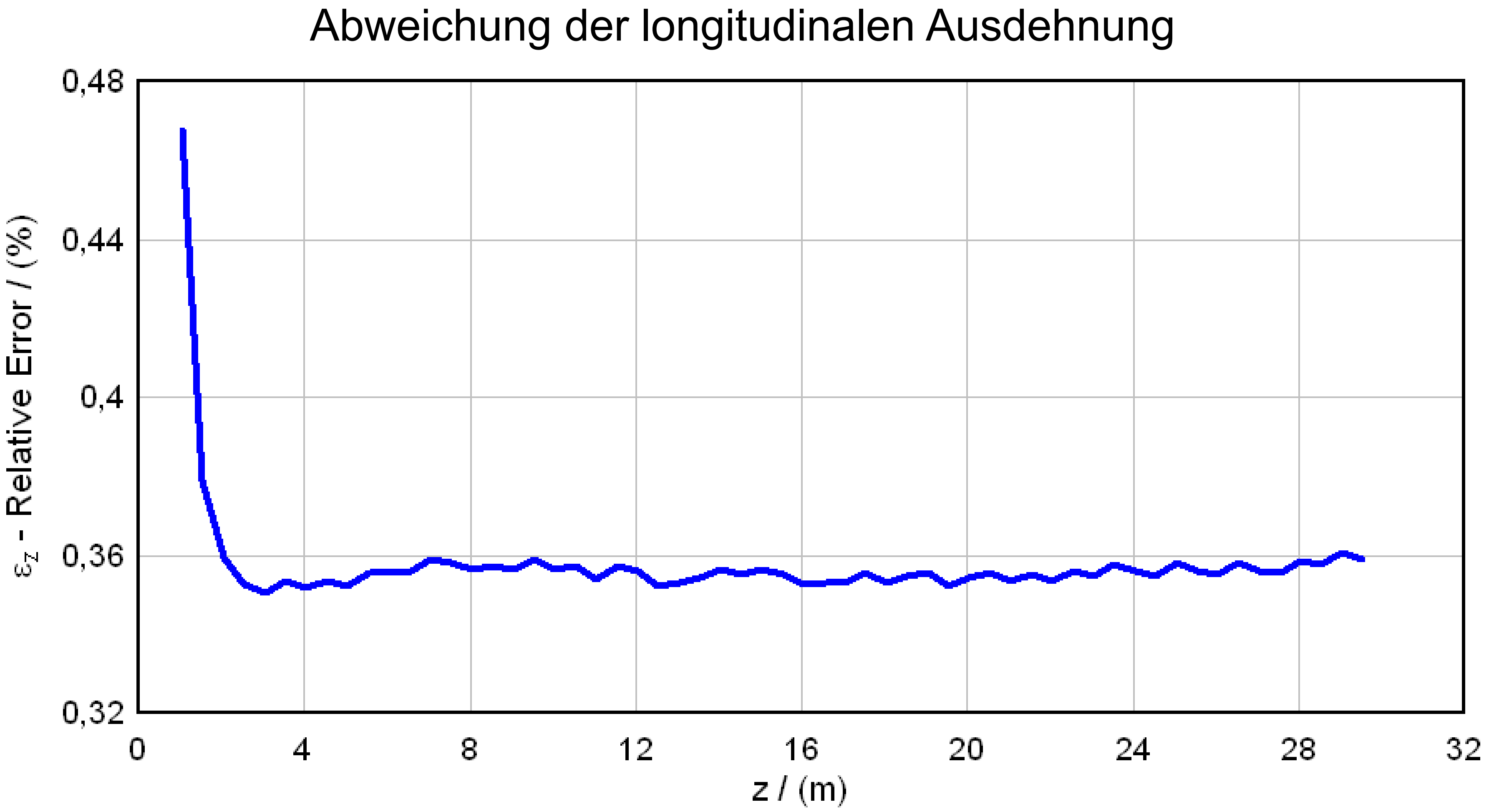
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**



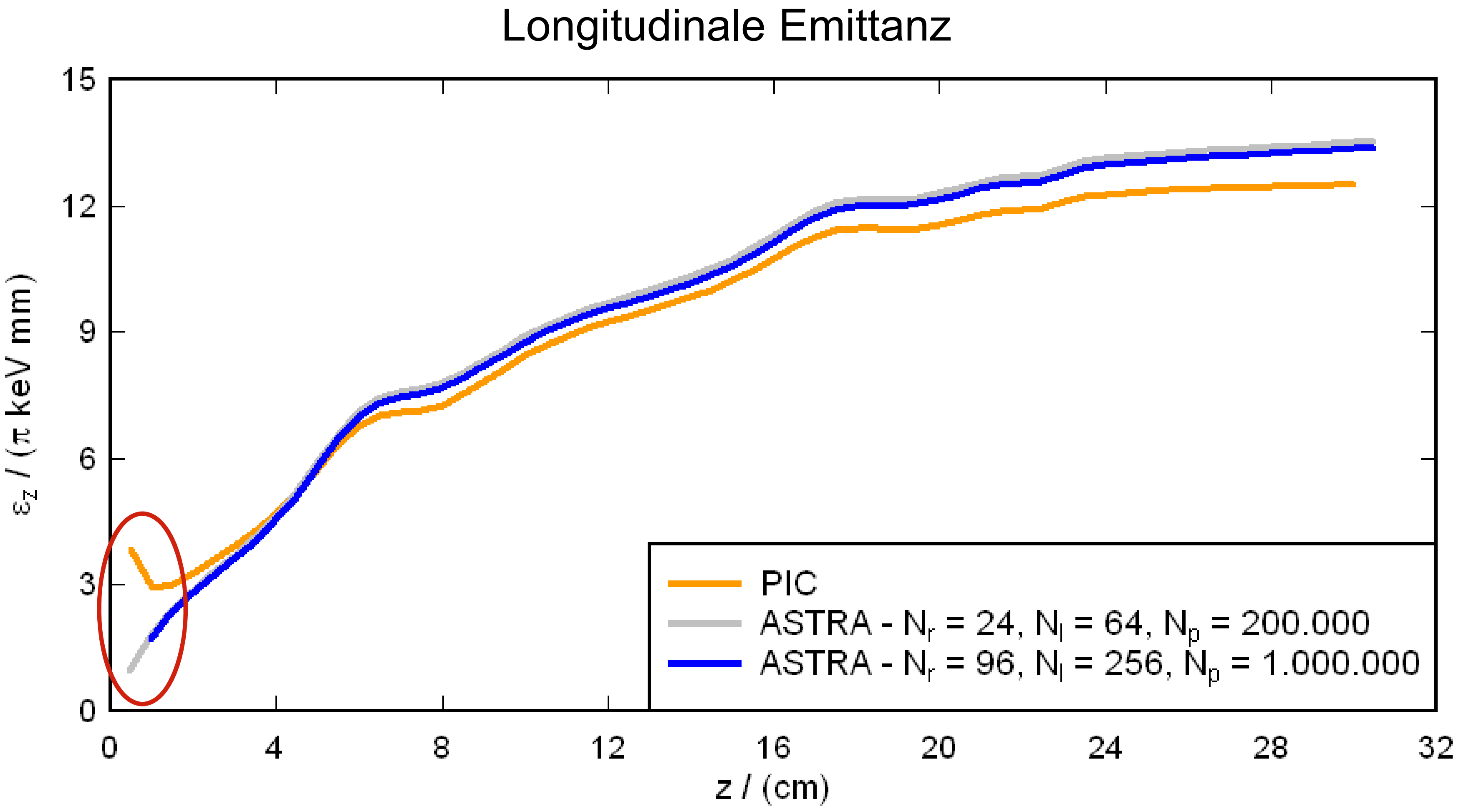
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**



Strahldynamiksimulationen

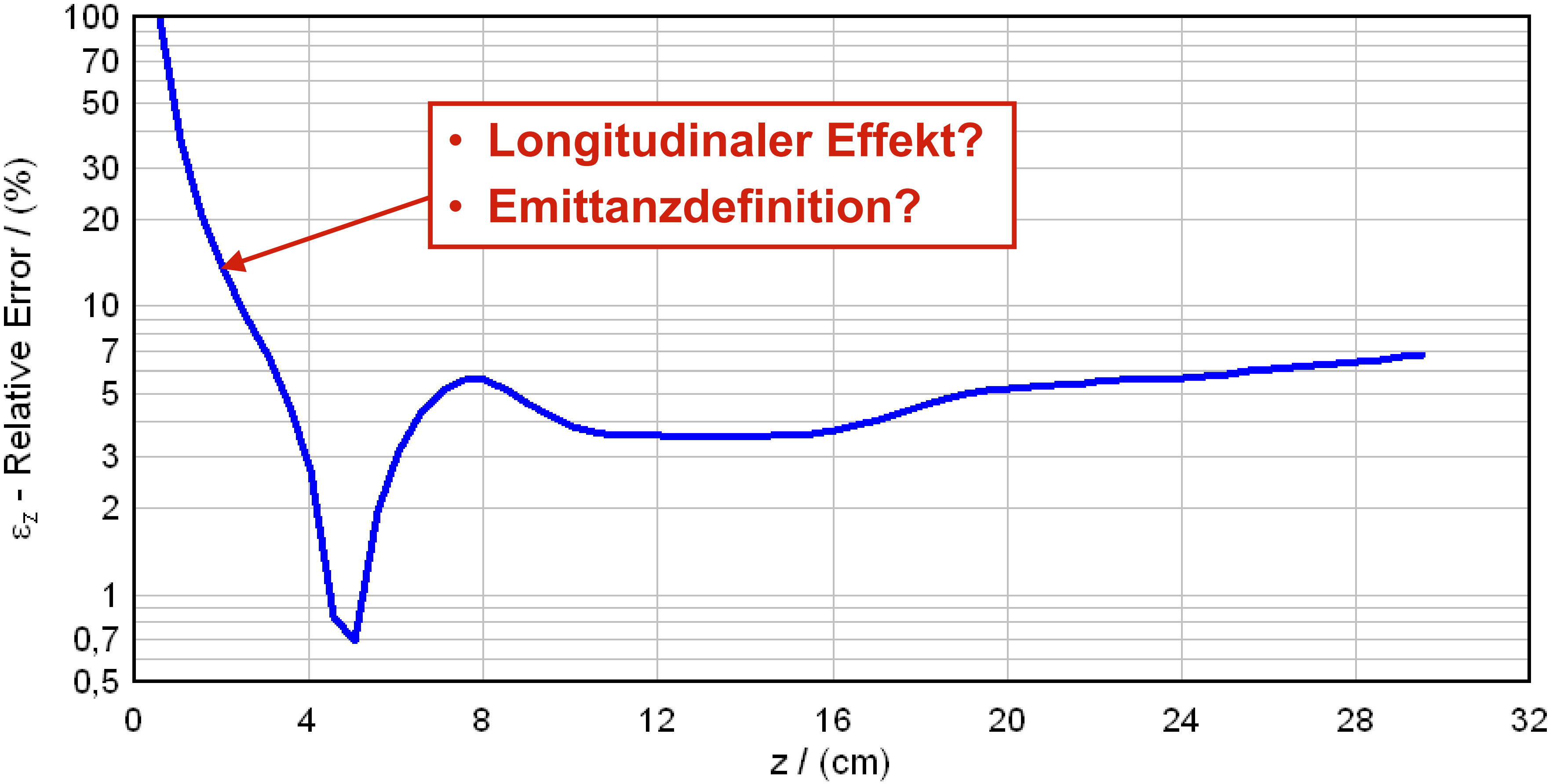
- **Vergleich ASTRA - PIC**



Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

Abweichung der longitudinalen Emittanz



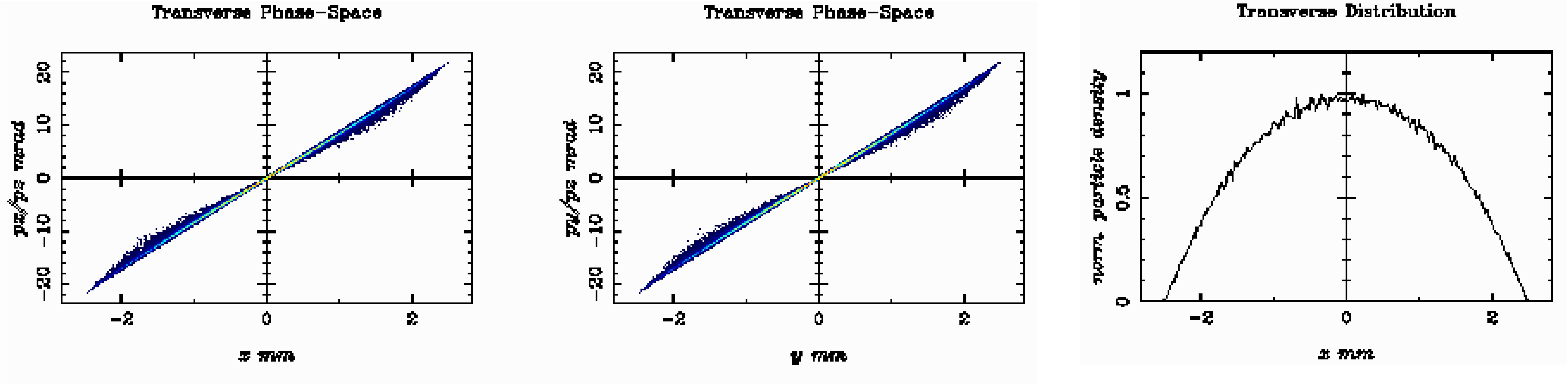
- **Longitudinaler Effekt?**
- **Emittanzdefinition?**

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

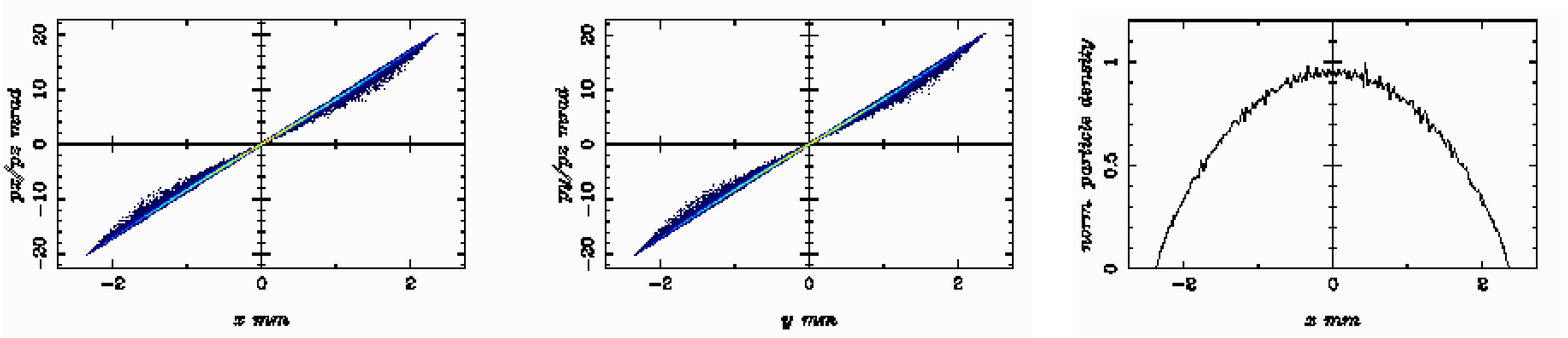
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

ASTRA: z = 4.95 cm



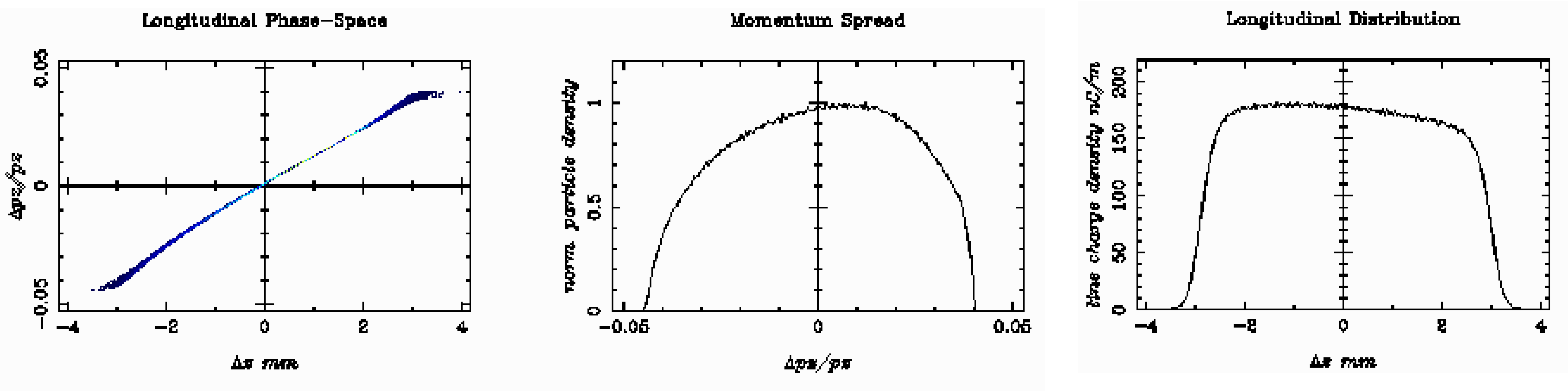
PIC: z = 5 cm



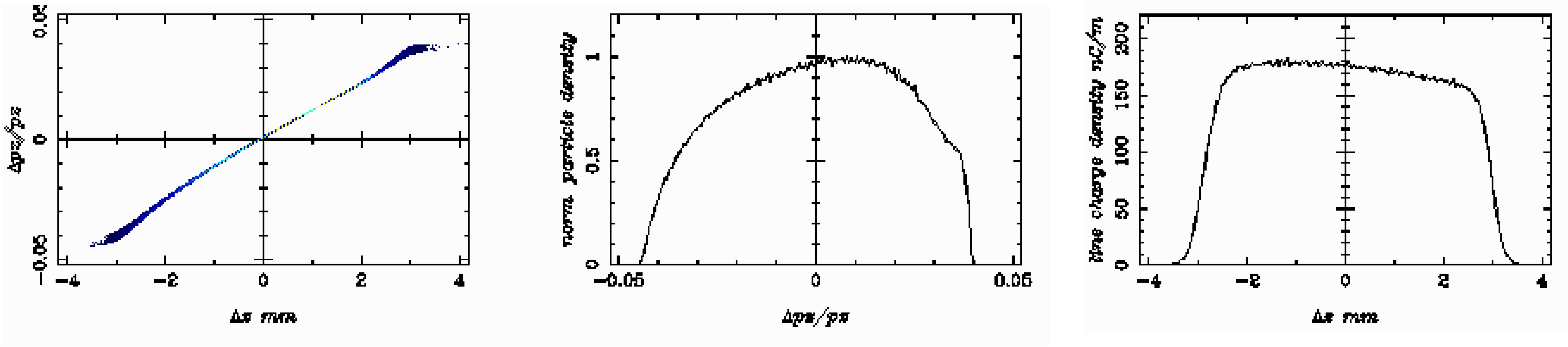
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

ASTRA: z = 4.95 cm



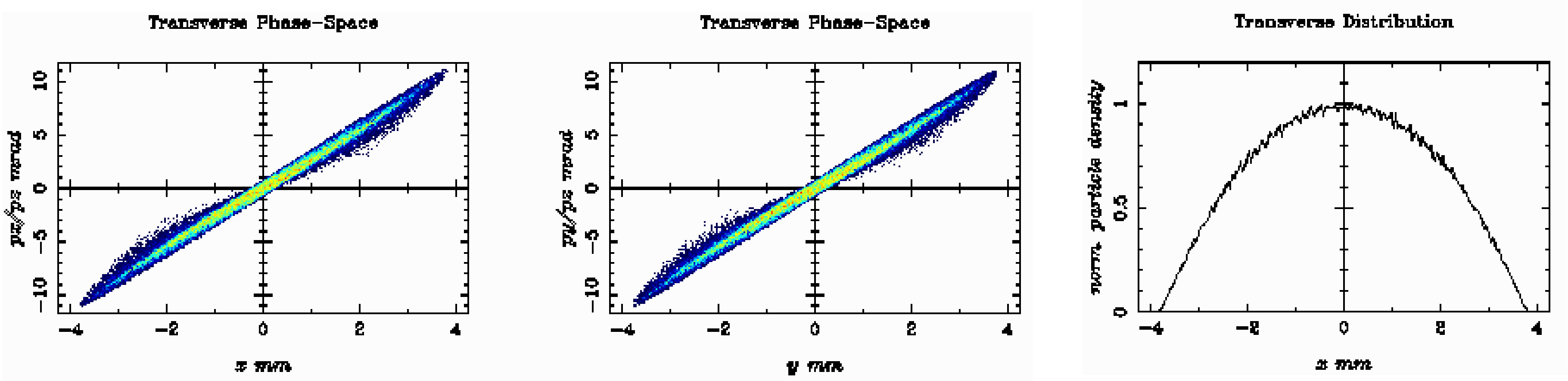
PIC: z = 5 cm



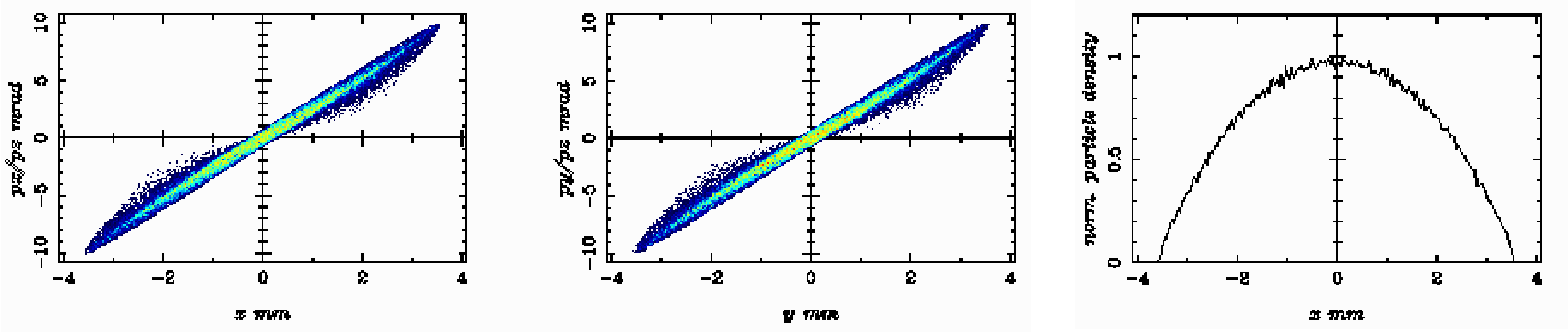
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

ASTRA: z = 9.97 cm



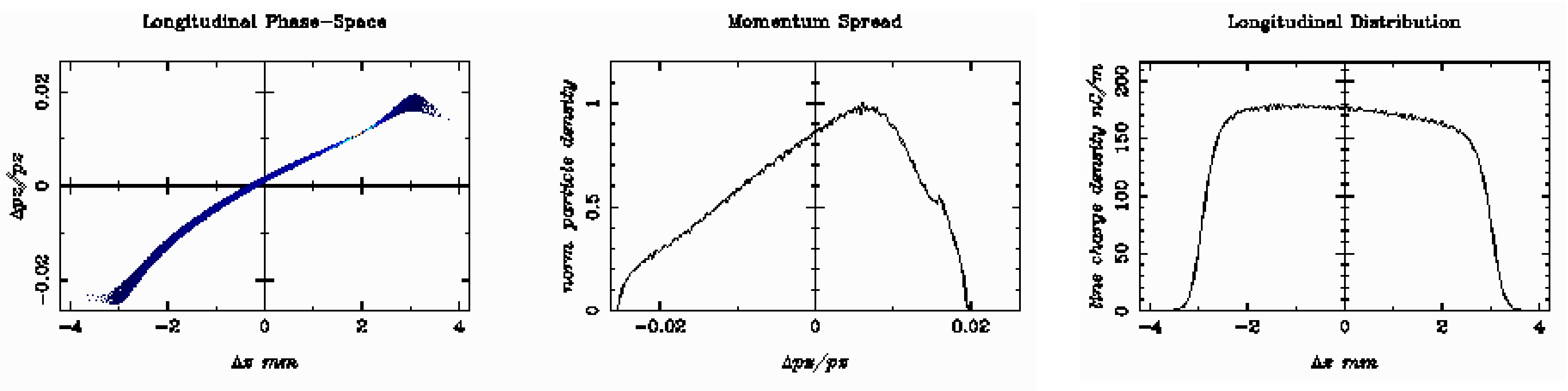
PIC: z = 10 cm



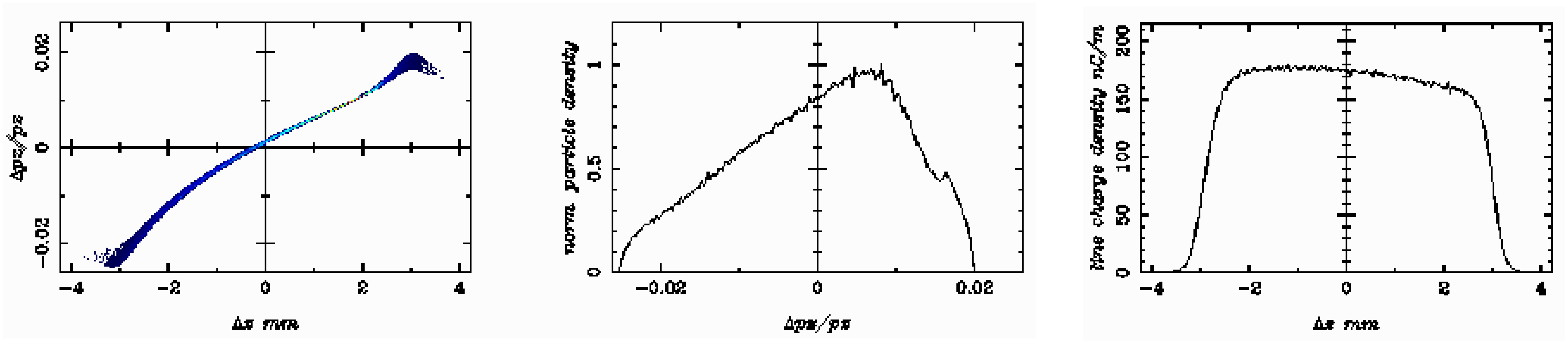
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

ASTRA: z = 9.97 cm



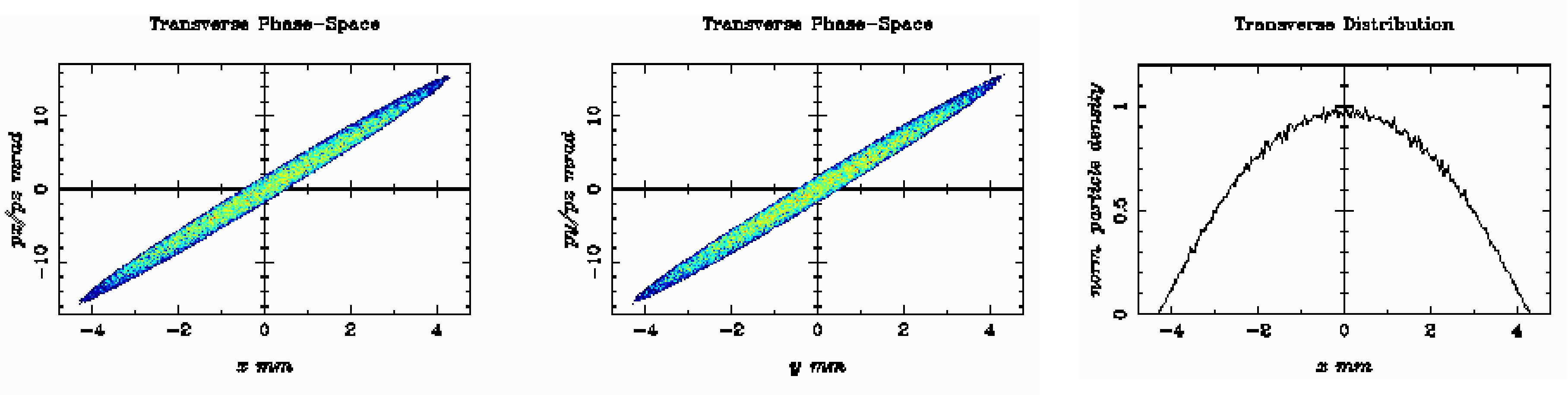
PIC: z = 10 cm



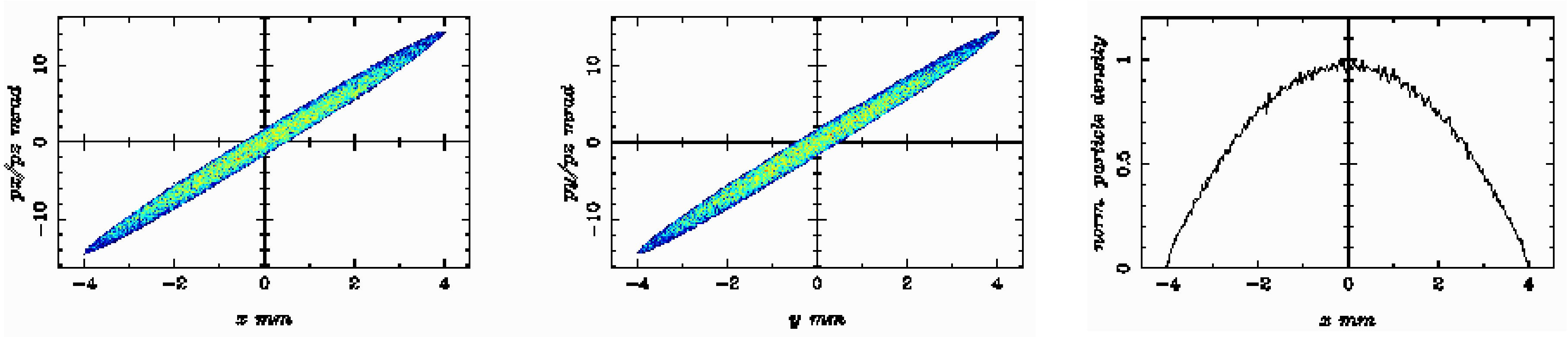
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

ASTRA: z = 19.97 cm



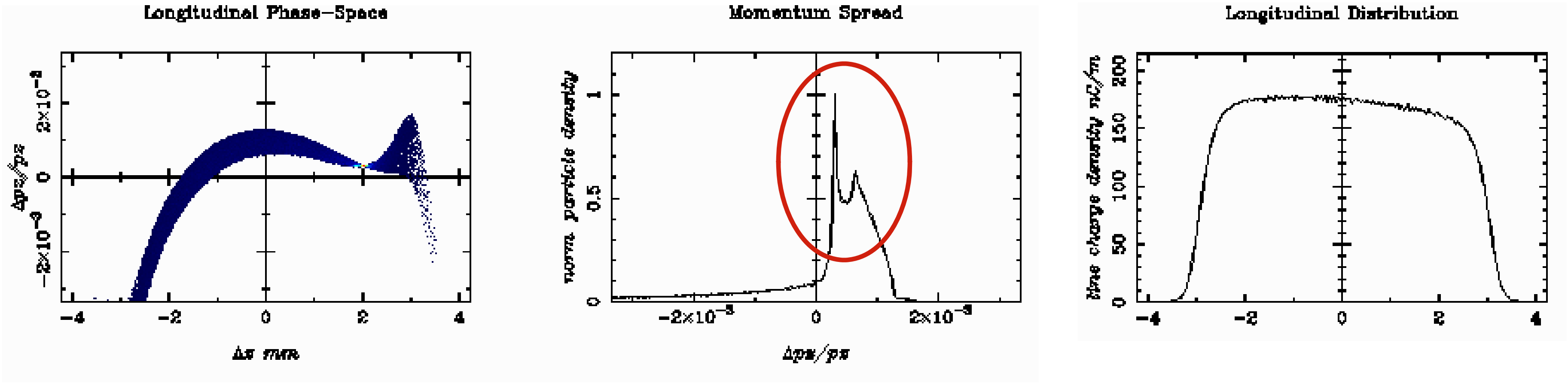
PIC: z = 20 cm



Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

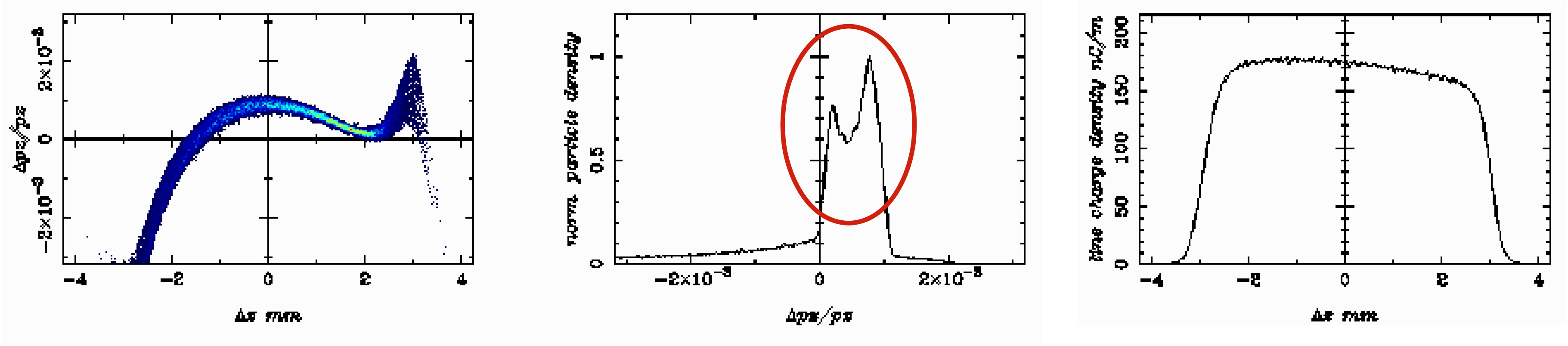
ASTRA: z = 19.97 cm


Longitudinal Phase-Space

Momentum Spread

Longitudinal Distribution

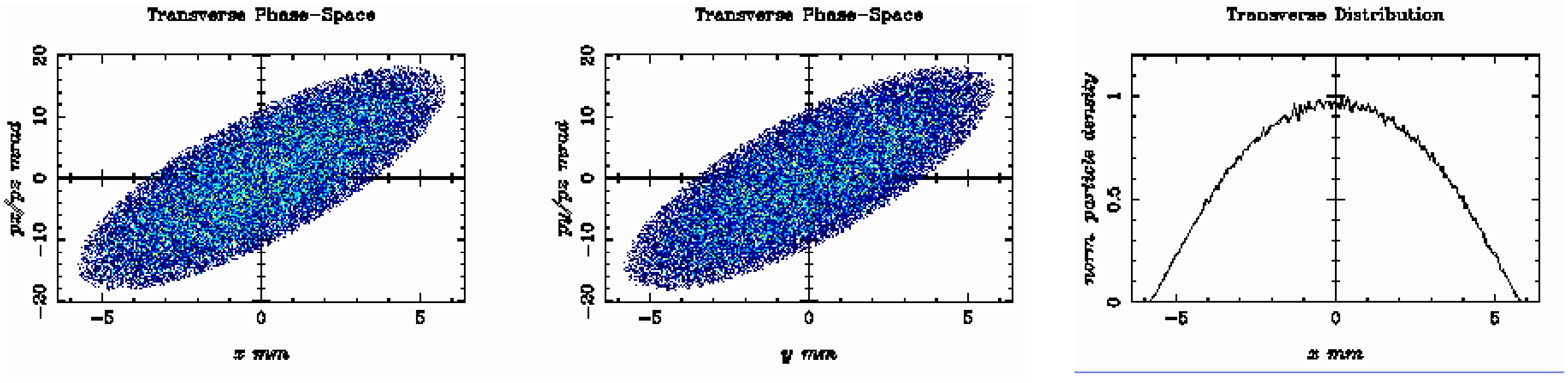
PIC: z = 20 cm



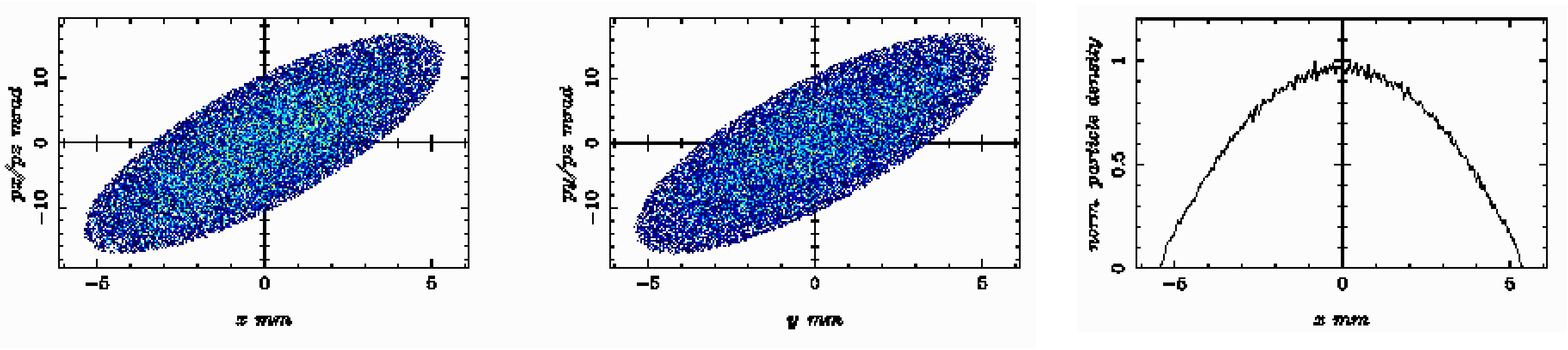
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

ASTRA: z = 29.95 cm



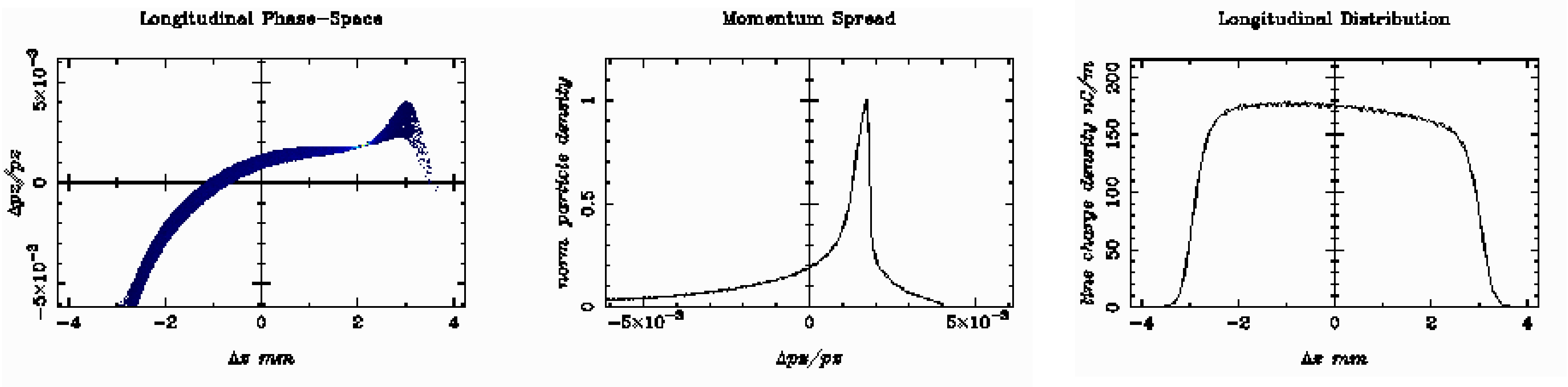
PIC: z = 30 cm



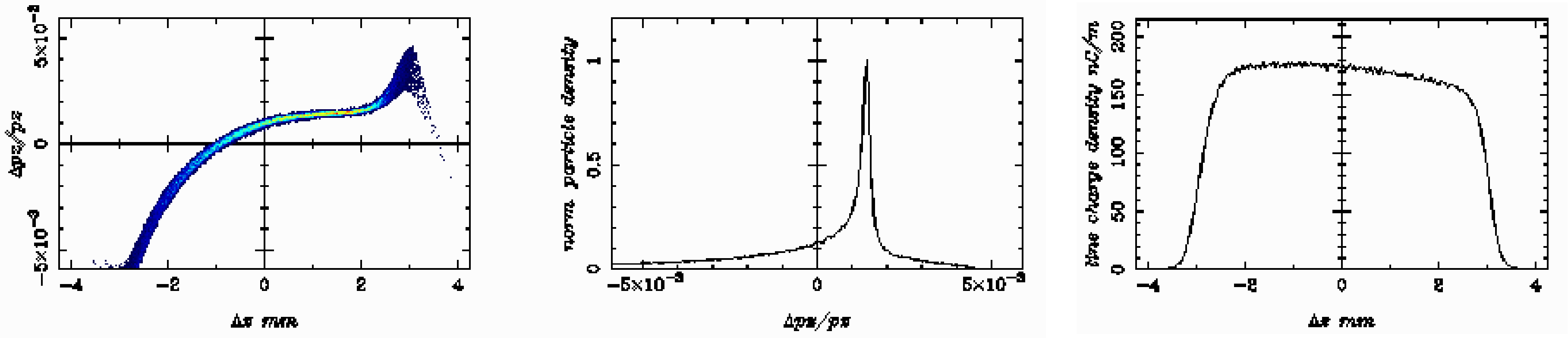
Strahldynamiksimulationen

- **Vergleich ASTRA - PIC**

ASTRA: z = 29.95 cm

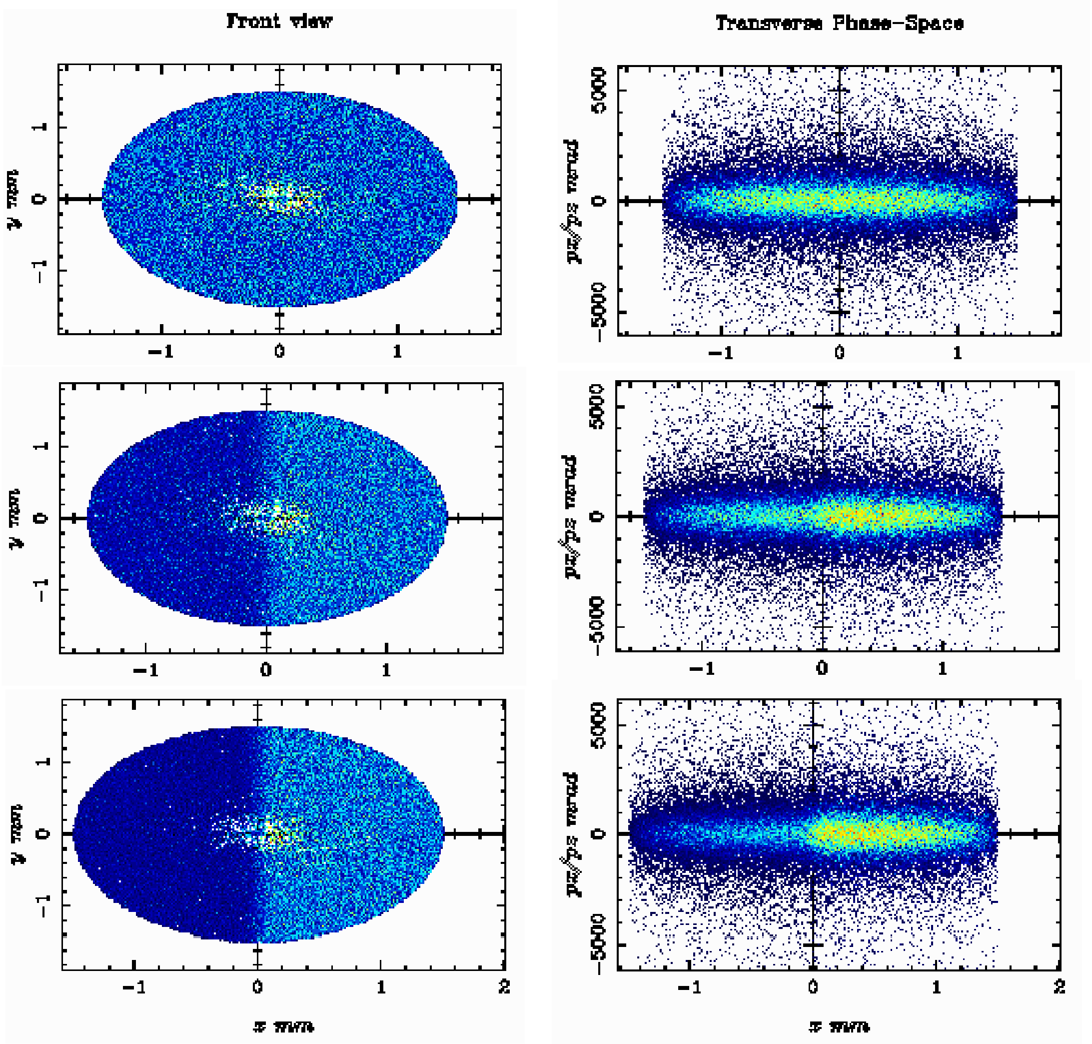


PIC: z = 30 cm



Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**



Rotationssymmetrisch

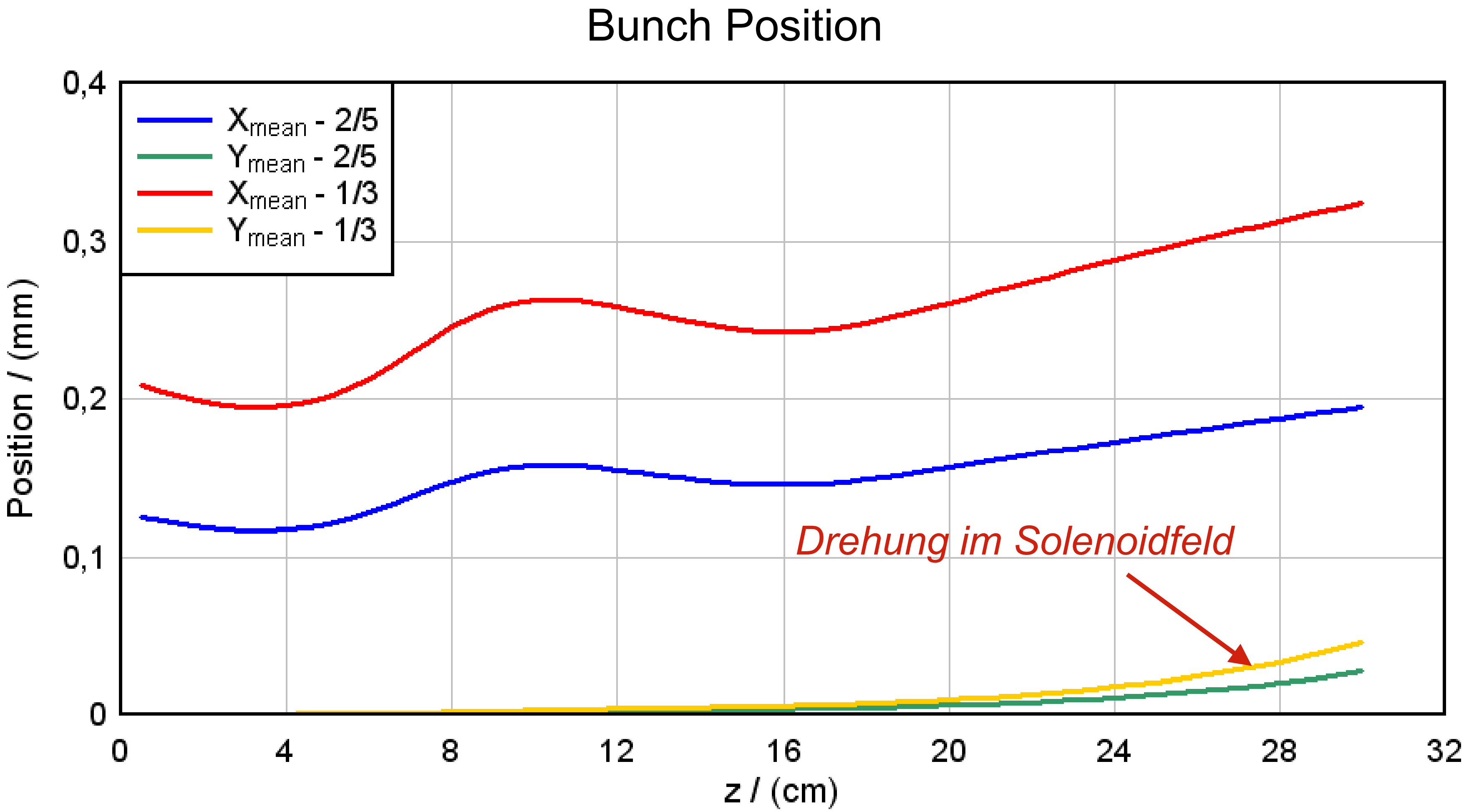
Ladungsgewichtet in x-Richtung:

$$\boxed{w(x) \sim 1+\frac{1}{5}\,\mathrm{erf}\left(x/\overline{\sigma}_x\right)}$$

$$\boxed{w(x) \sim 1+\frac{1}{3}\,\mathrm{erf}\left(x/\overline{\sigma}_x\right)}$$

Strahldynamiksimulationen

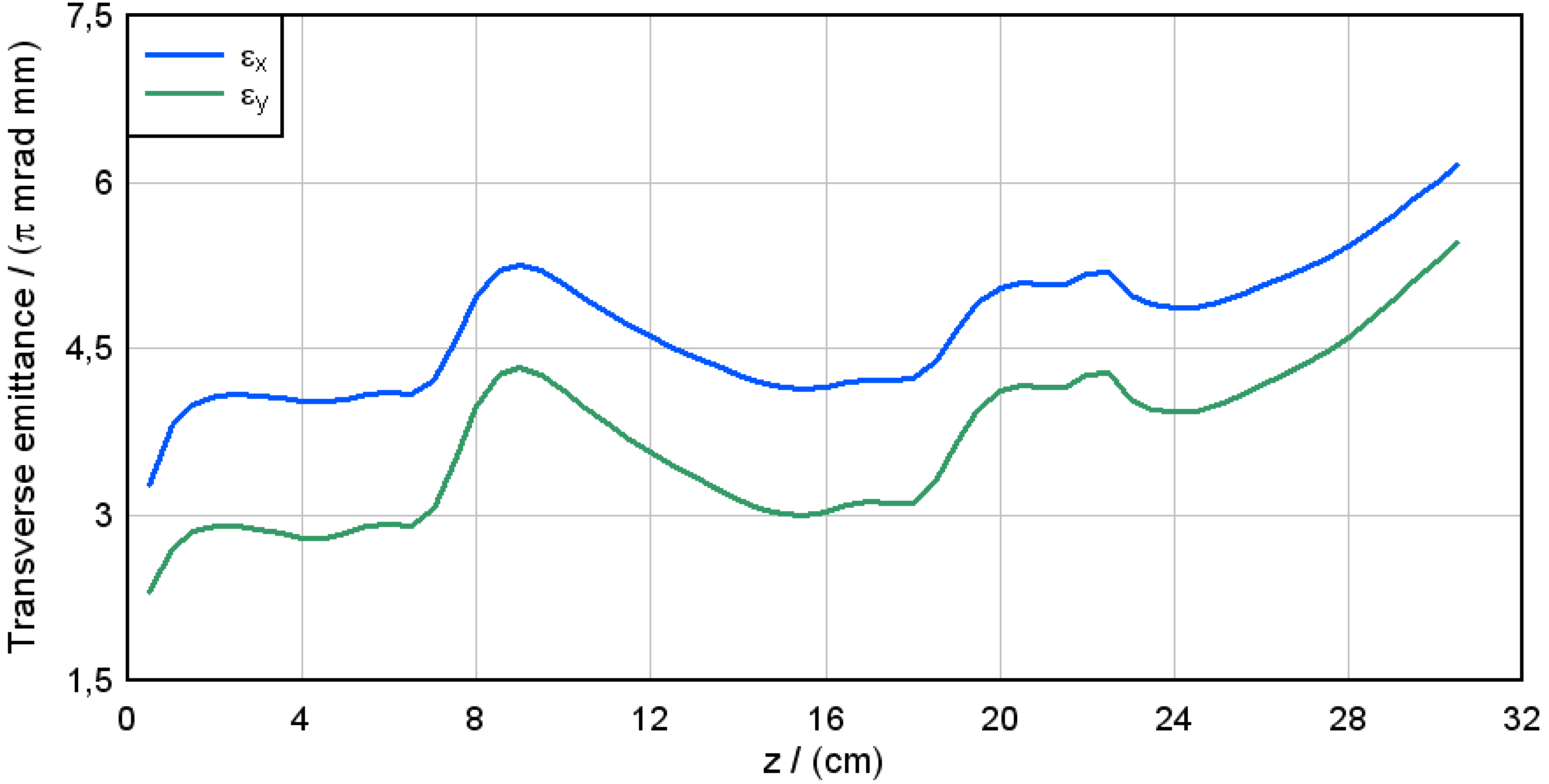
- **Nichtsymmetrische Bunche**



Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

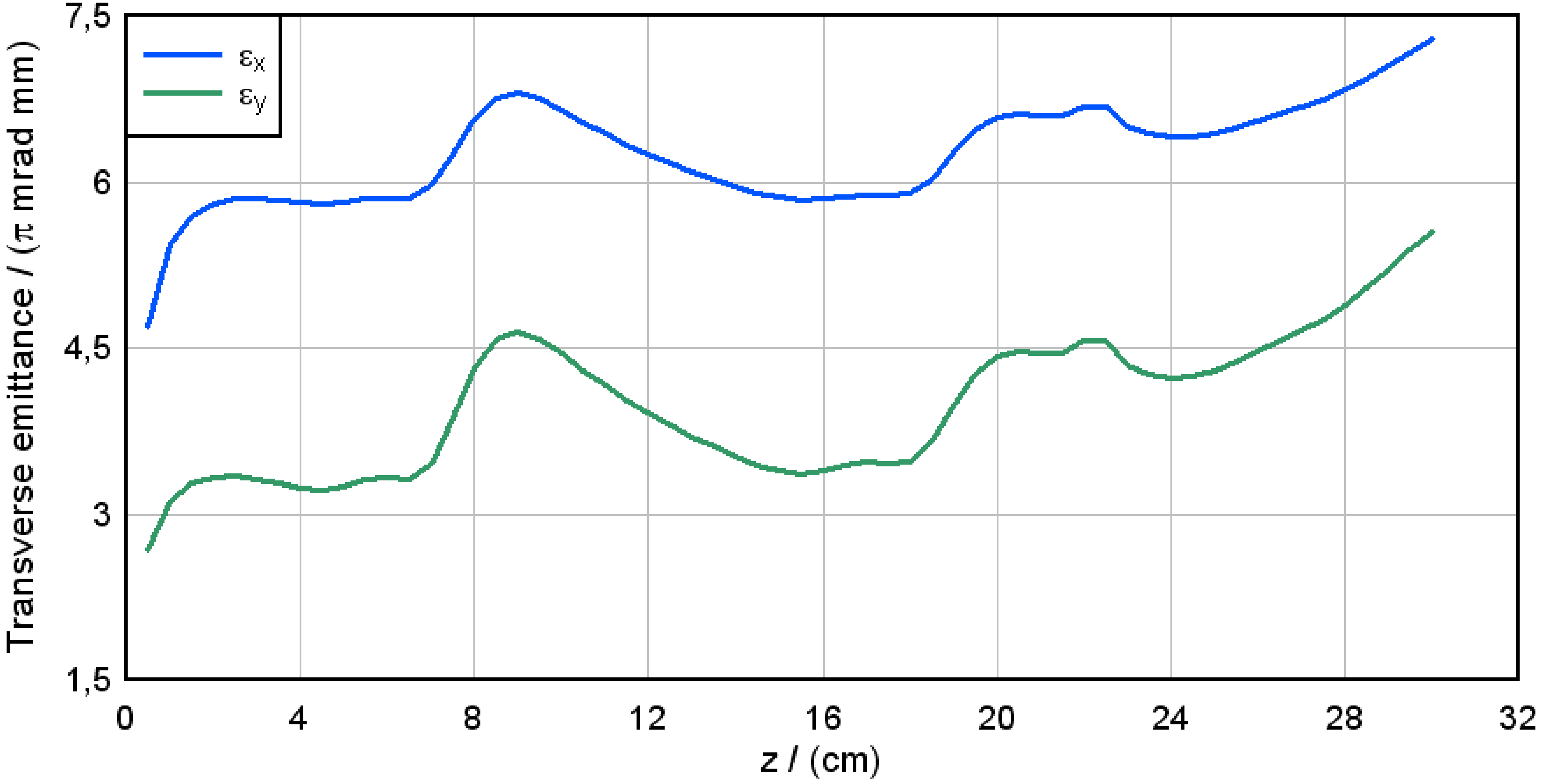
Transversale Emittanz: 2/5 - 3/5 Q



Strahldynamiksimulationen

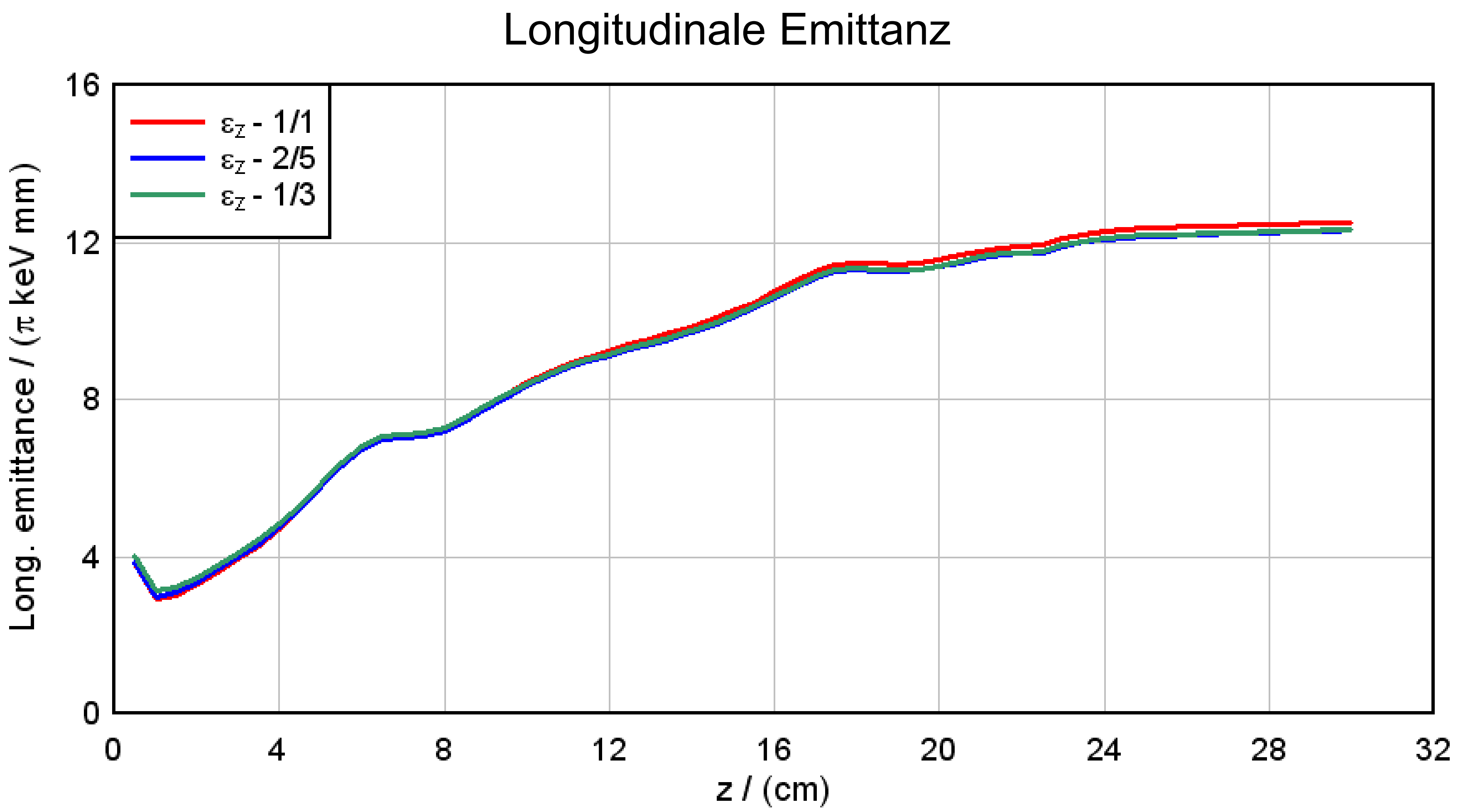
- **Nichtsymmetrische Bunche**

Transversale Emittanz: 1/3 - 2/3 Q



Strahldynamiksimulationen

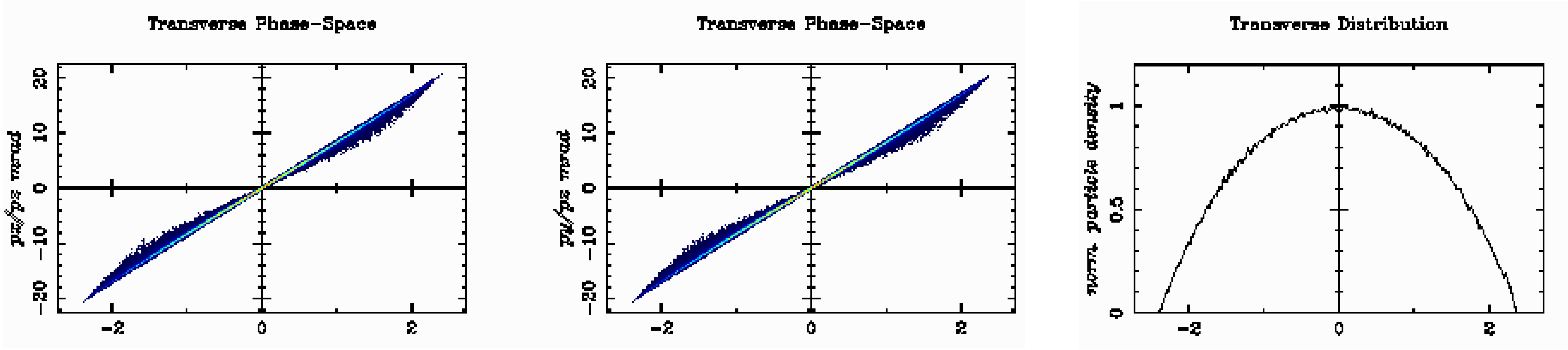
- **Nichtsymmetrische Bunche**



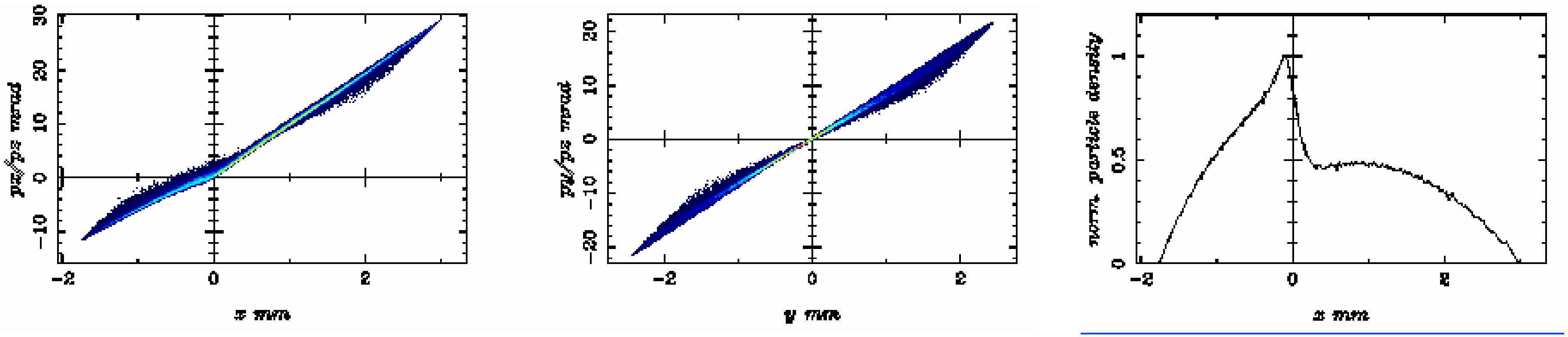
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 5 cm



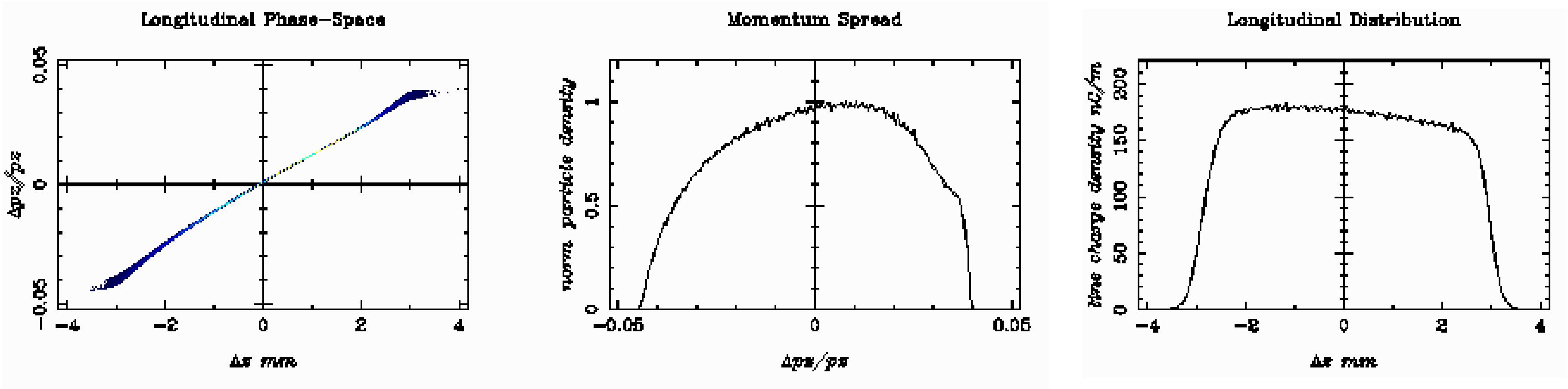
Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 5 cm



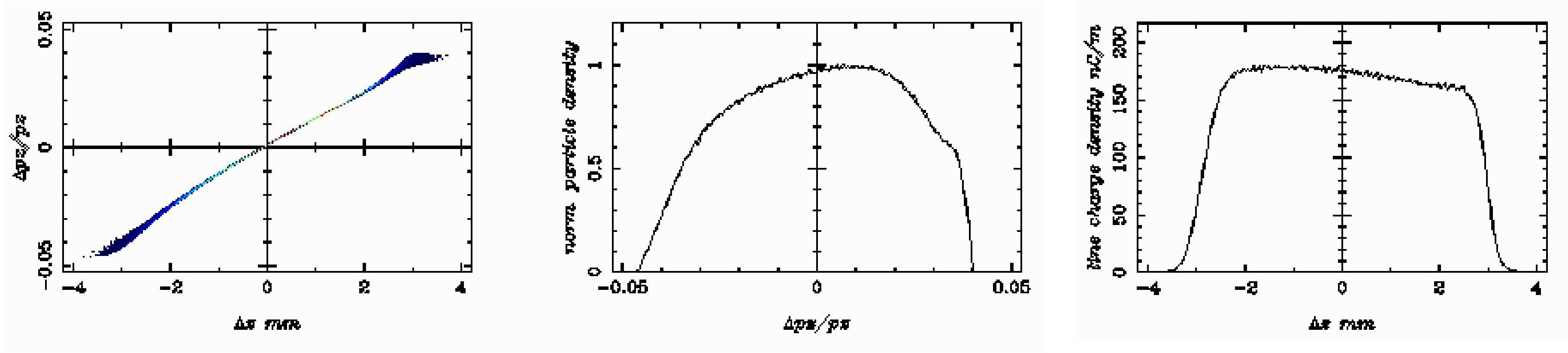
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 5 cm



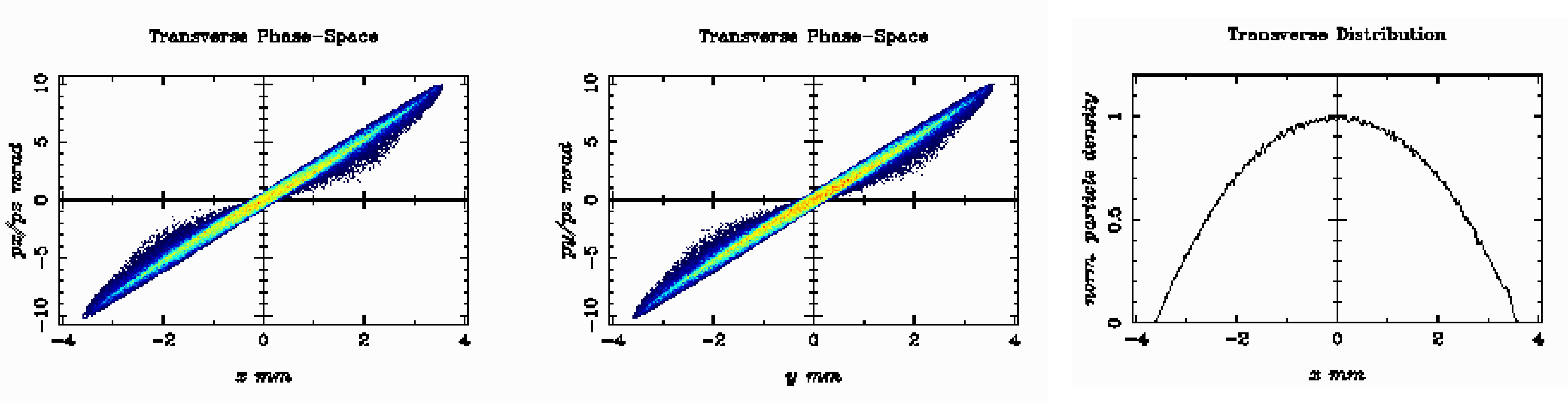
Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 5 cm



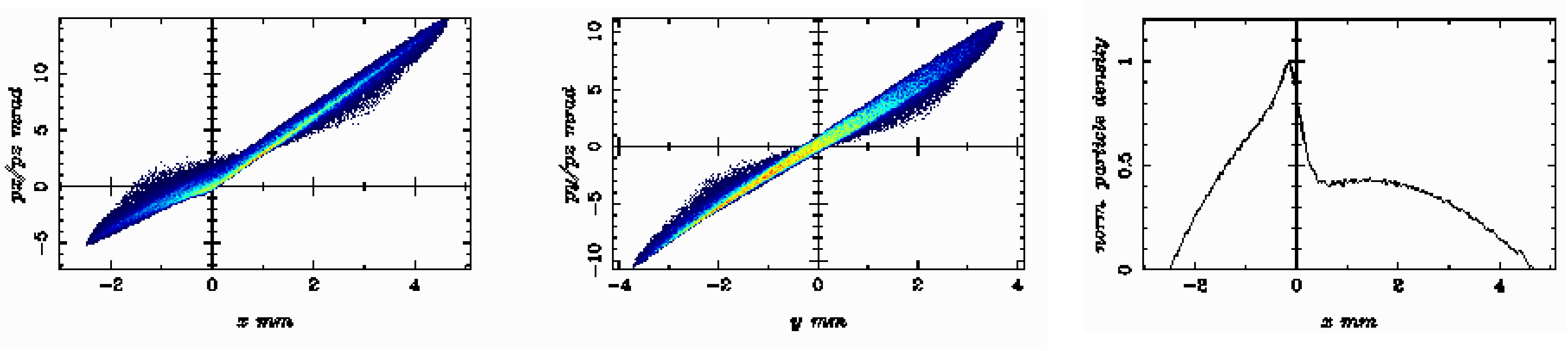
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 10 cm



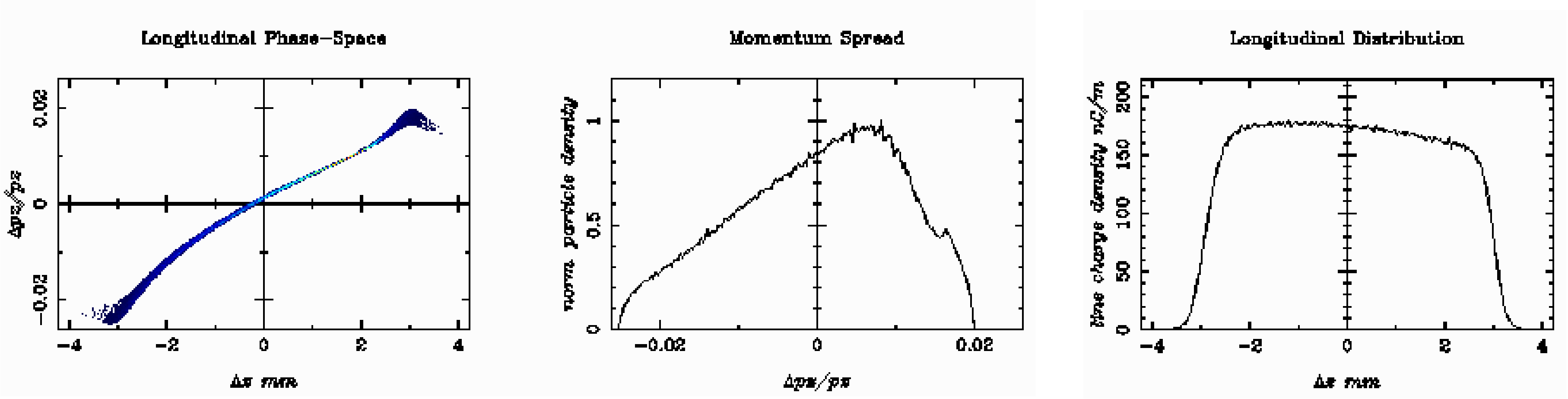
Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 10 cm



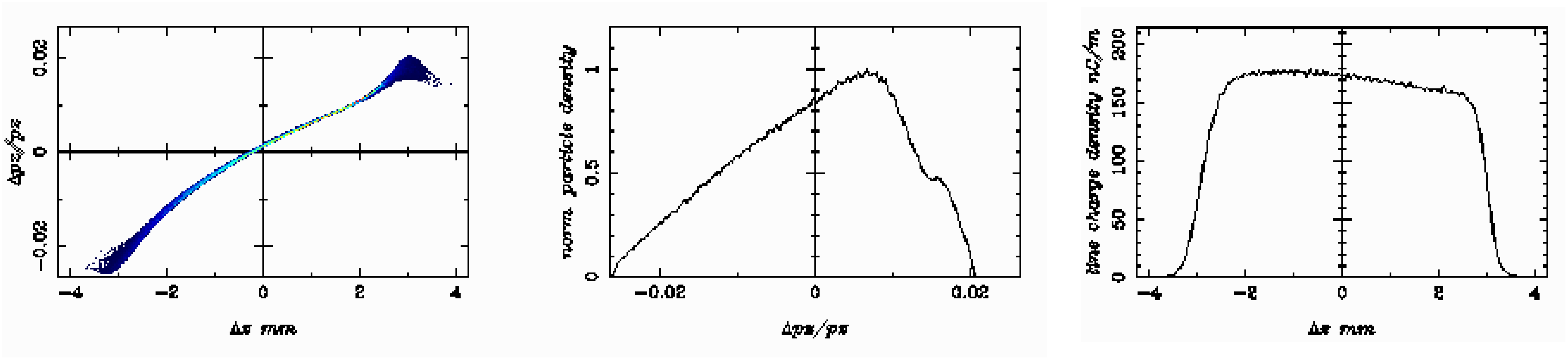
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 10 cm



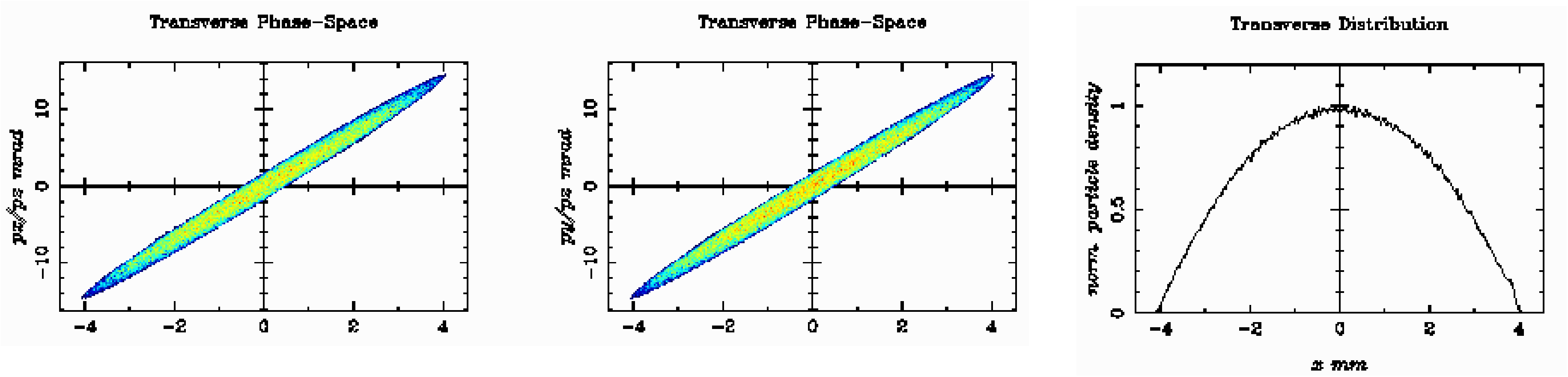
Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 10 cm



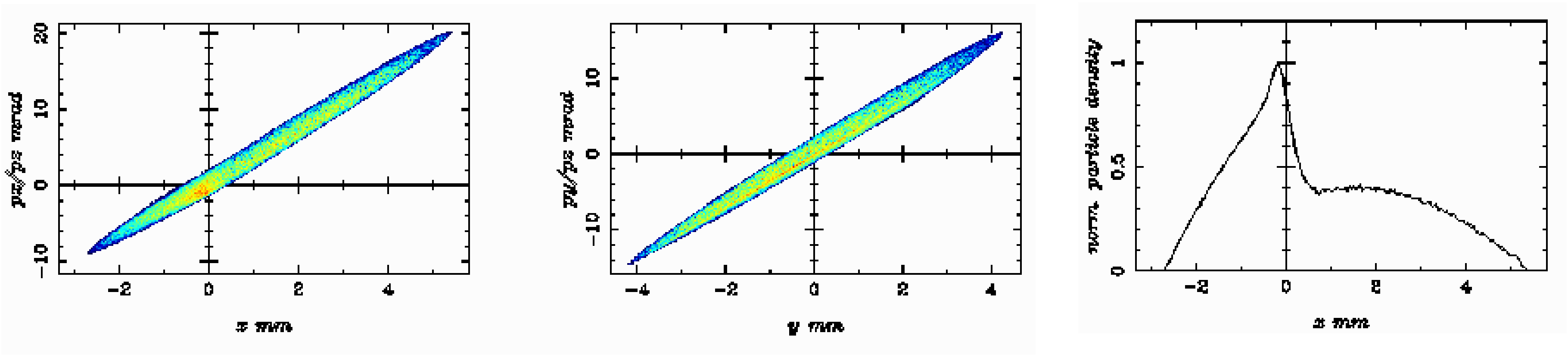
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 20 cm



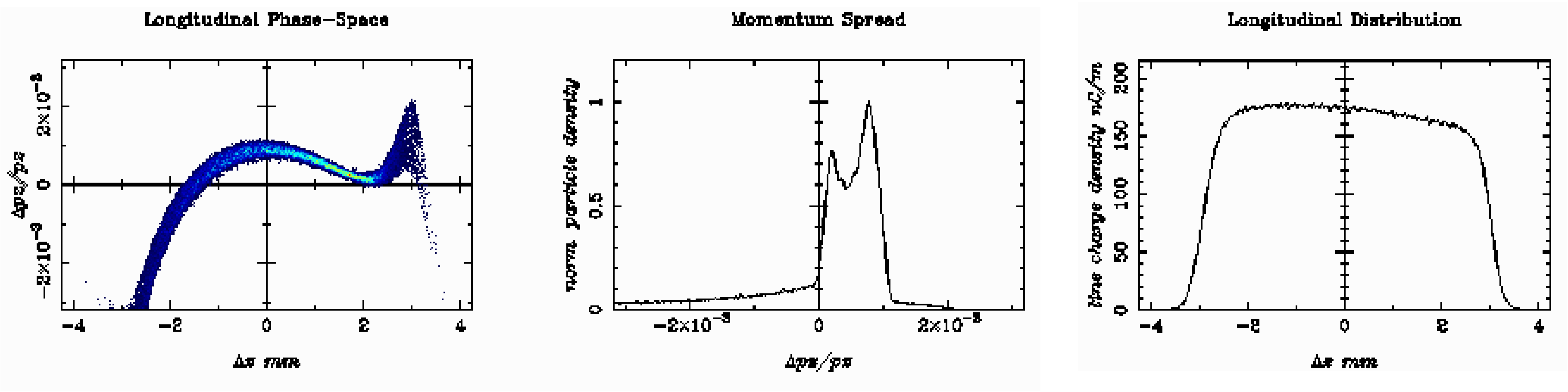
Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 20 cm



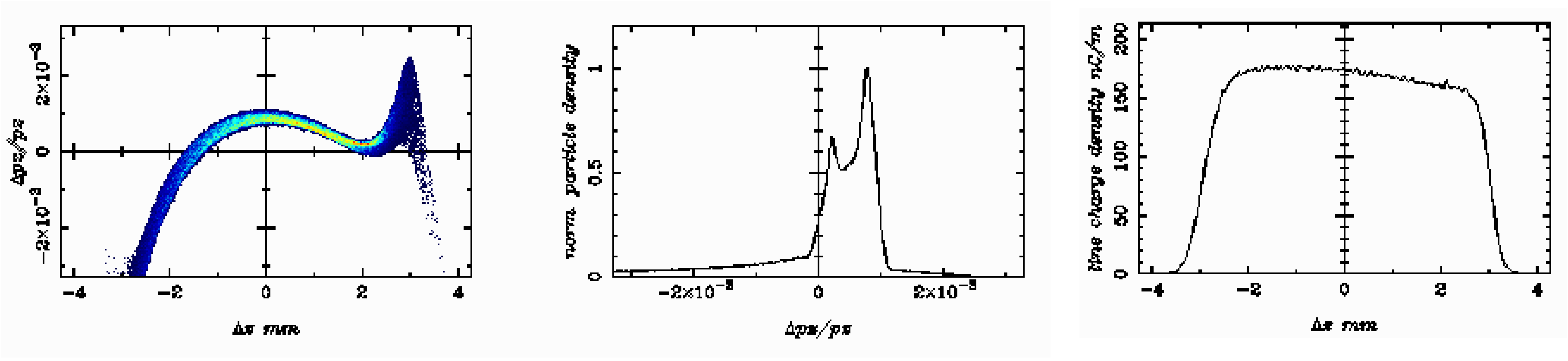
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 20 cm



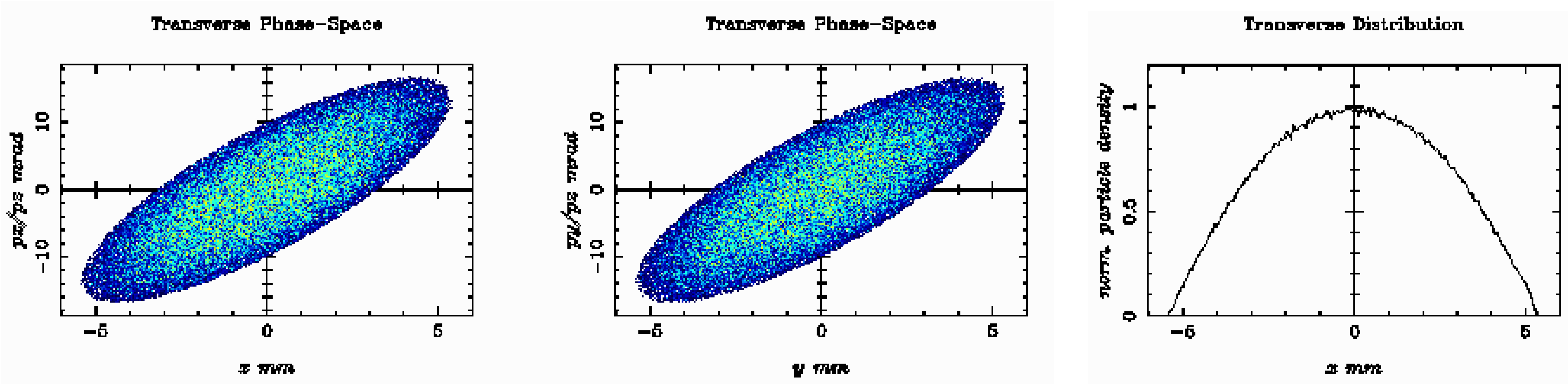
Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 20 cm



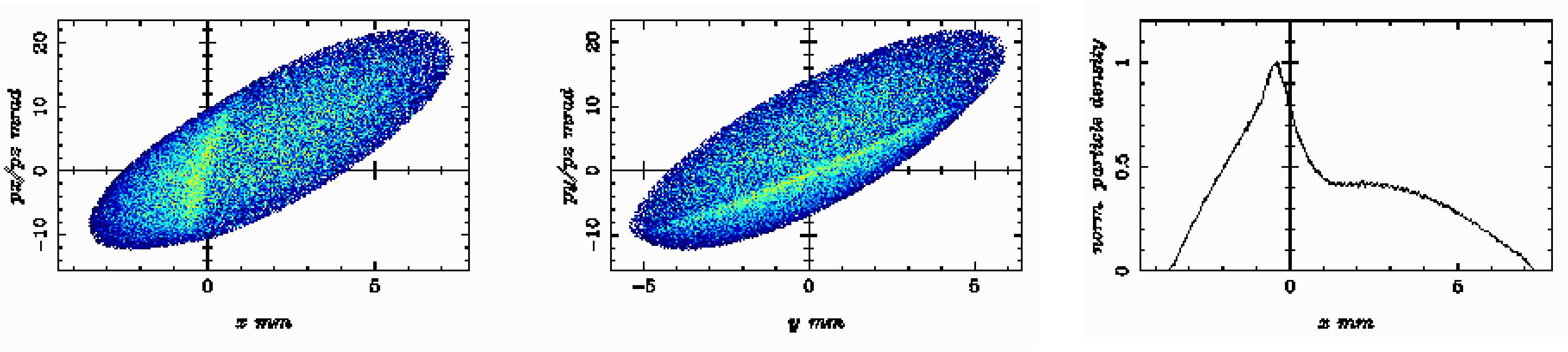
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 30 cm



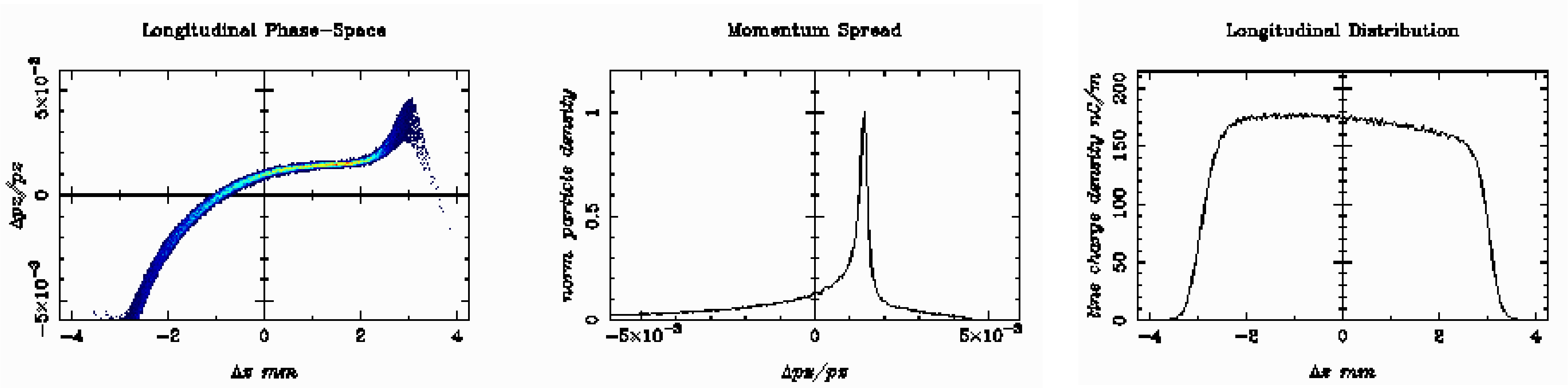
Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 30 cm



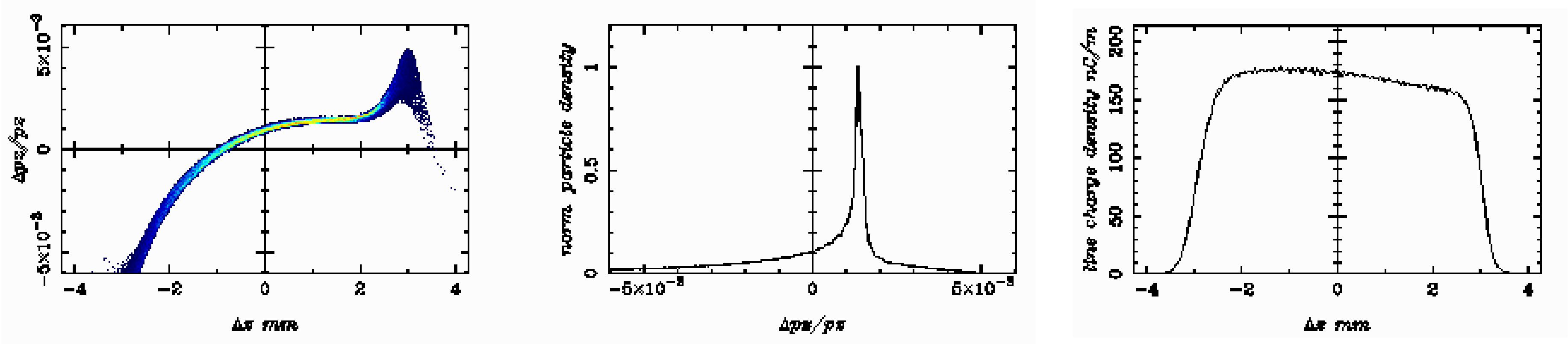
Strahldynamiksimulationen

- **Nichtsymmetrische Bunche**

Symmetrisch: z = 30 cm



Unsymmetrisch 1/3 − 2/3: z = 30 cm



Strahldynamiksimulationen

- **Diskussion**

  1. Genaue PIC-3D Simulationen für die XFEL sind möglich (allerdings nicht über > 10m-Strecken)
  2. ASTRA und PIC im rotationssymmetrischen Fall stimmen insgesamt gut überein (~10% Abweichung in der transversalen Emittanz)
  3. Weitere Simulationen sind notwendig (long. Effekte, Konvergenz, Modellierung)
  4. Nichtsymmetrischer Bunche:
     - Kaum Unterschiede im long. Phasenraum
     - Bunchdaten zur weiteren Analyse stehen zur Verfügung

DESY: Projektbericht 2010

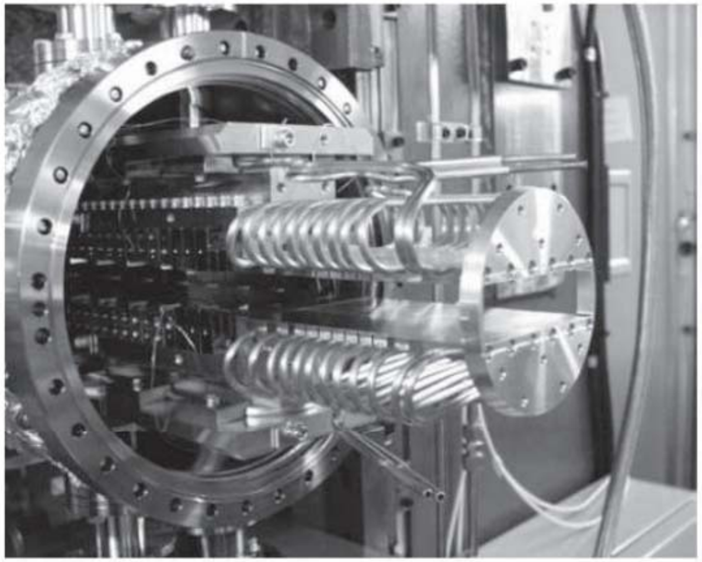
- **Themenbereiche:**

1. **Strahldynamiksimulationen für die XFEL**
2. **Wakefeldberechnungen für PETRA III**
   - Problemstellung
   - CAD Modellierung
   - Simulationsergebnisse
1. **Wakefelder kurzer Bunche in der Undulatorkammer**

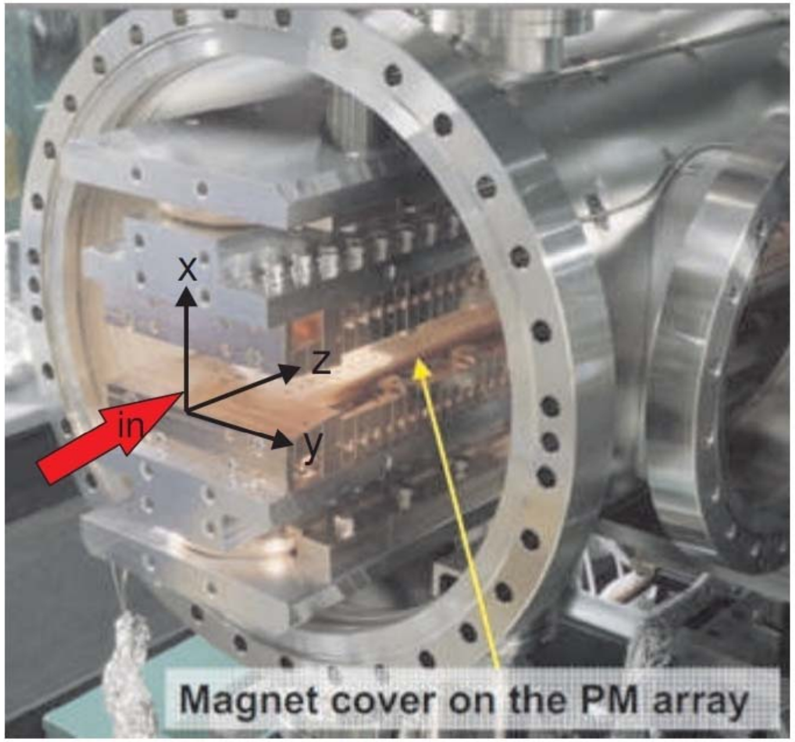
PETRA III Undulator

- **Problemstellung**

In-Vakuum Undulator für PETRA III: geometrische Wakefelder



Source: R. Reiser et al

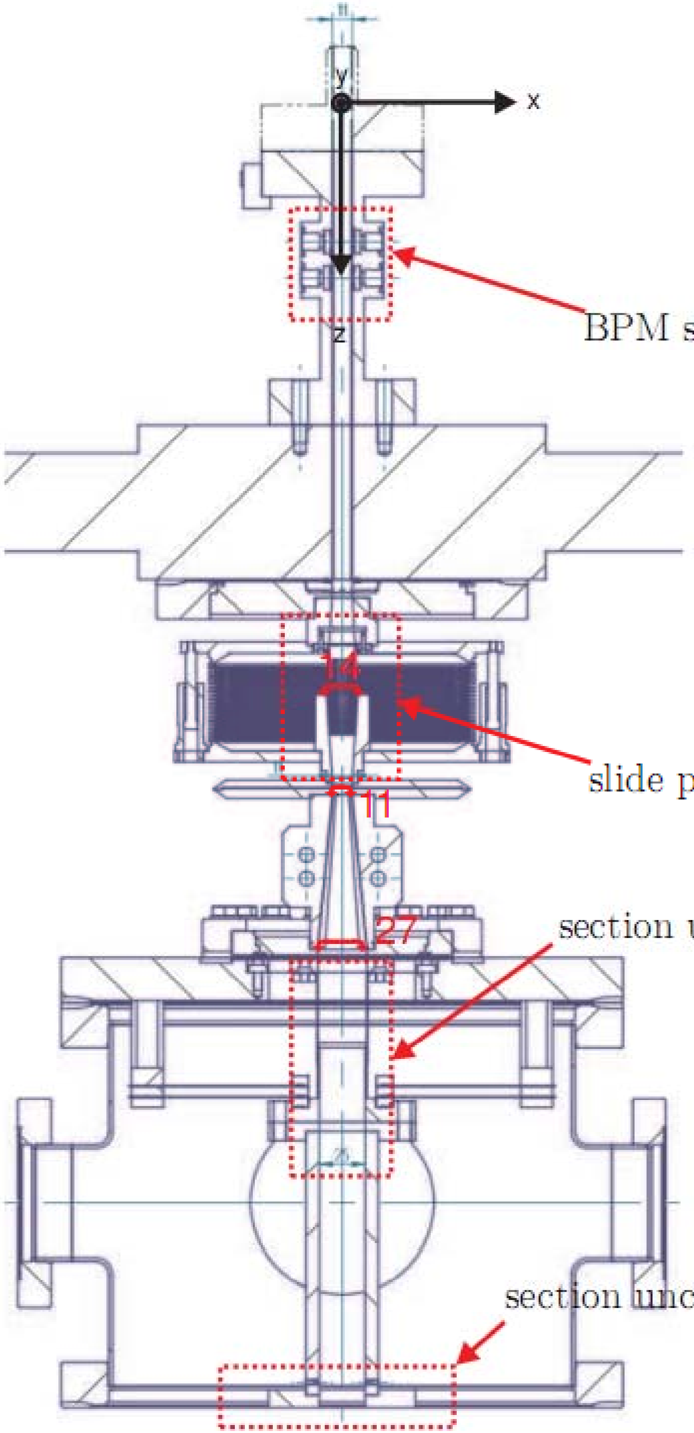


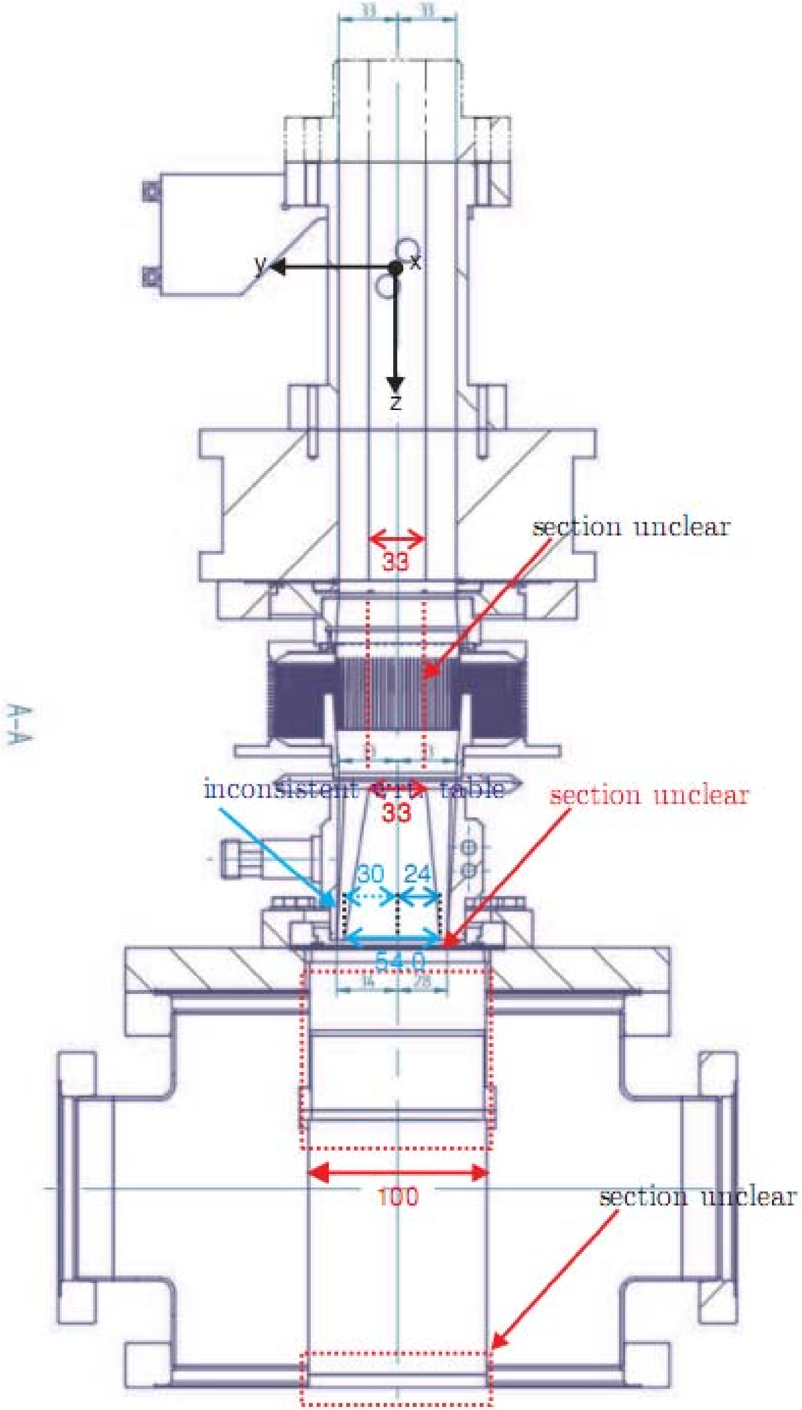
Source: Hideo Kitamura

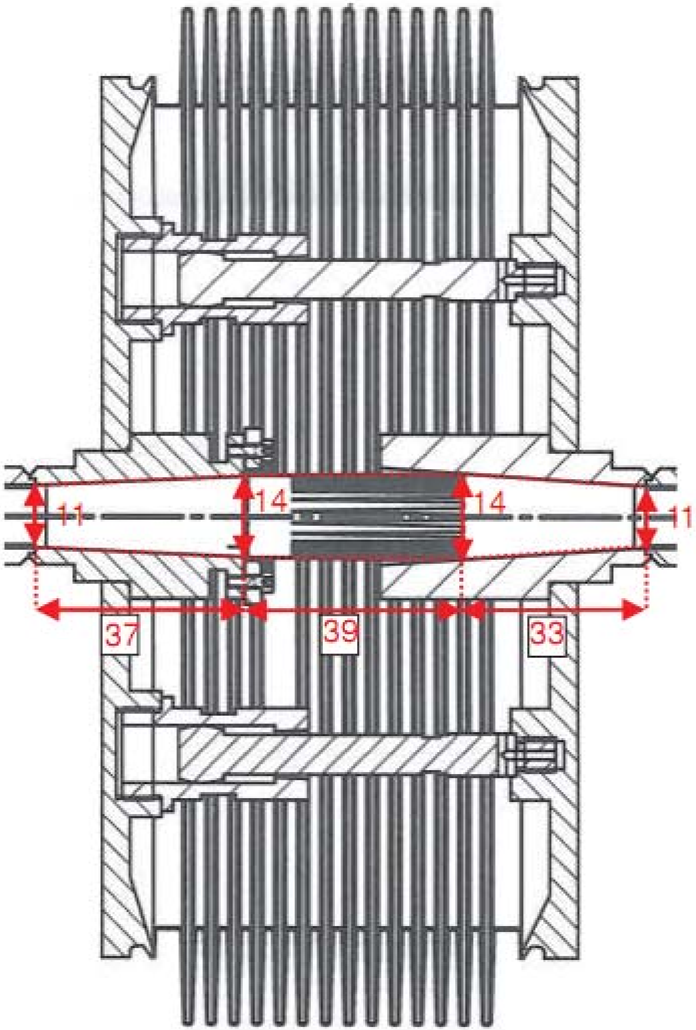
Wakefelder kurzer Bunche

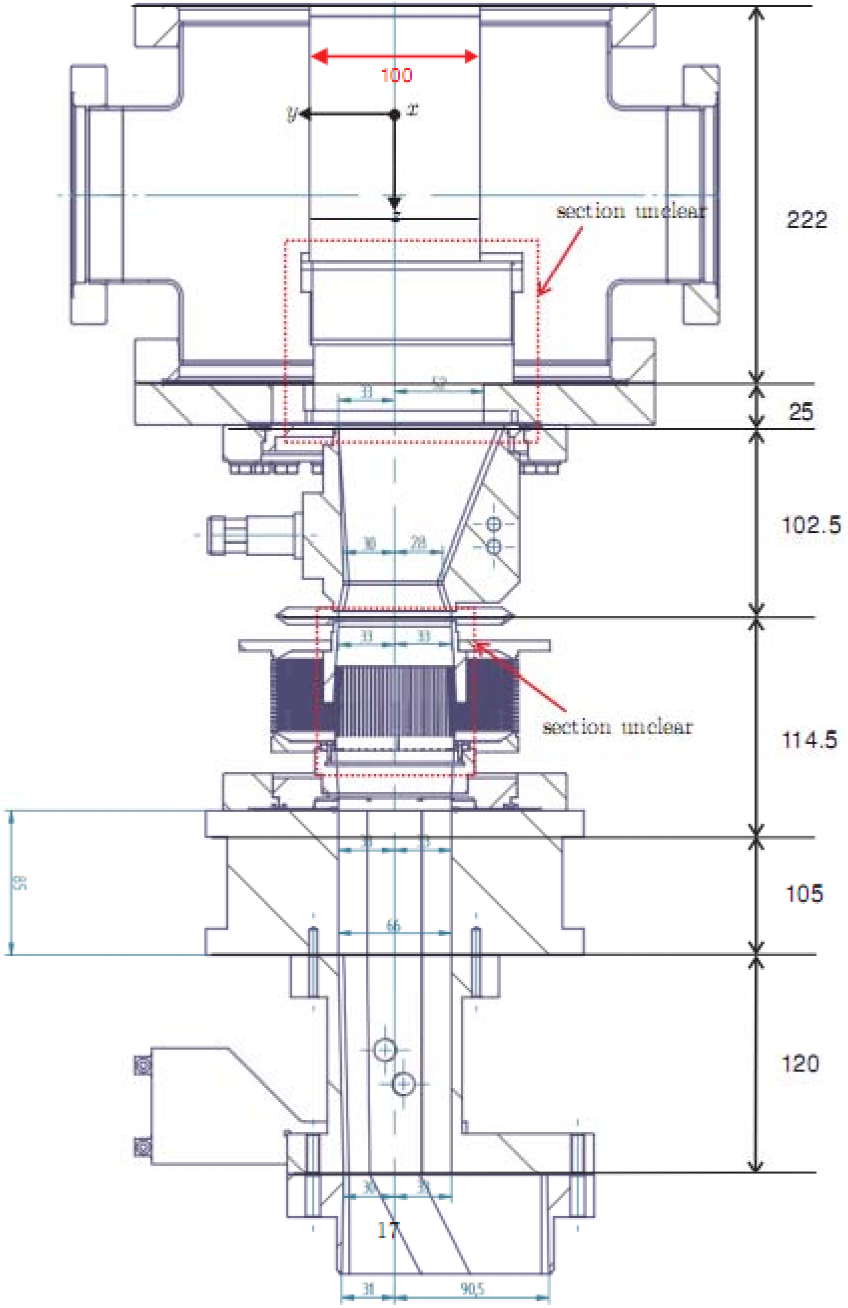
- **CAD Modellierung**

1. Nur mechanische Konstruktionszeichnung steht zur Verfügung
2. Erstellung vorläufigen CAD Modells bei TEMF
   - Dimensionen (teilweise) aus der technischen Zeichnung
   - Unbekannte Strecken mit Graphikprogramm → Geometriefehler
   - Nicht alle Wakerelevanten Details aus der Zeichnung ersichtlich


11
y
x
z
BPM section unclear
14
slide piece section
11
27
section unclear
25
section unclear

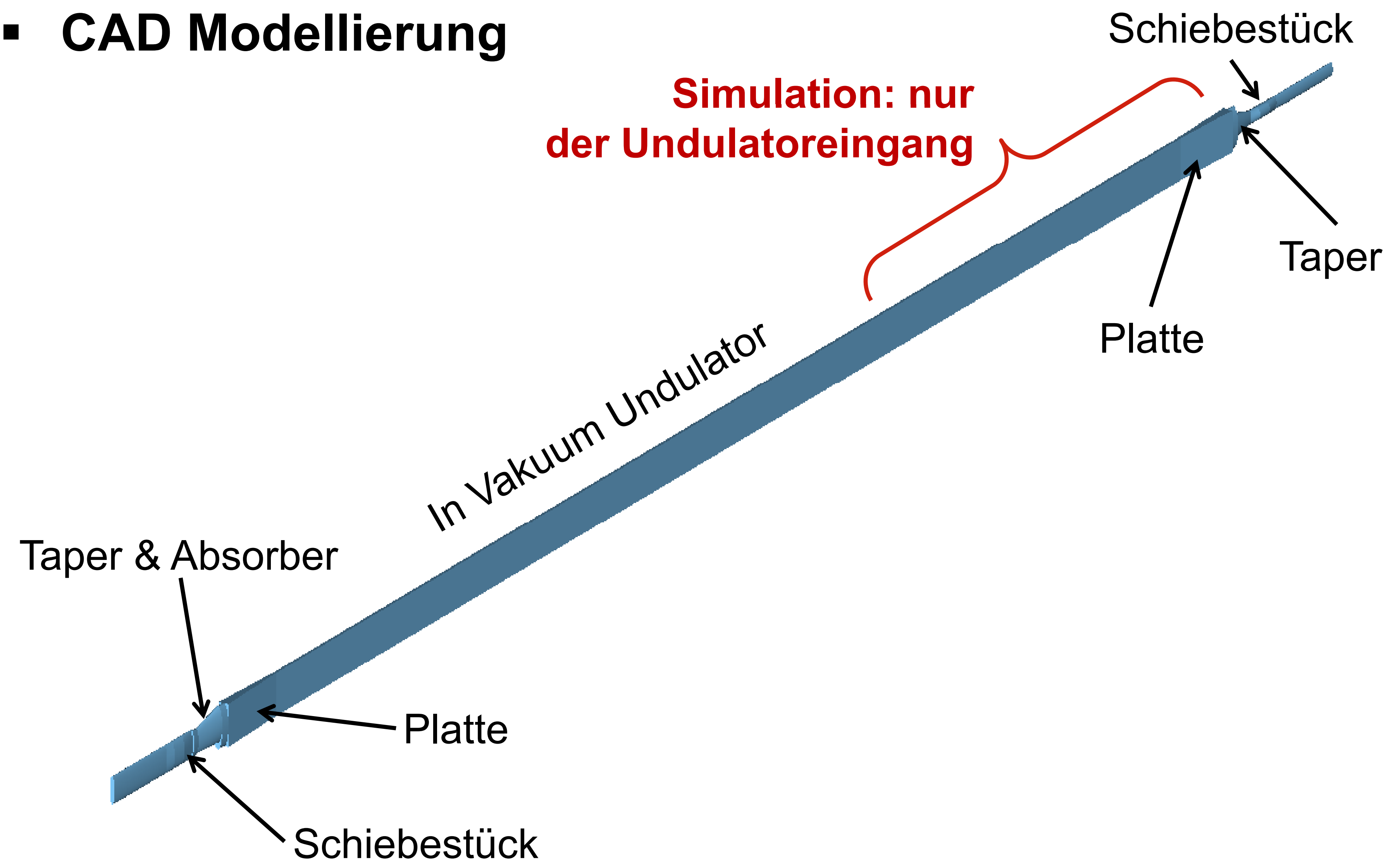

33
33
y
x
z
section unclear
33
A-A
inconsistent w.r.t. table
33
section unclear
30
24
54.0
14
28
100
section unclear


11
14
14
11
37
39
33


100
y
x
z
section unclear
222
33
52
25
30
28
102.5
33
33
section unclear
114.5
58
33
33
66
105
120
30
30
17
31
90.5

PETRA III Undulator

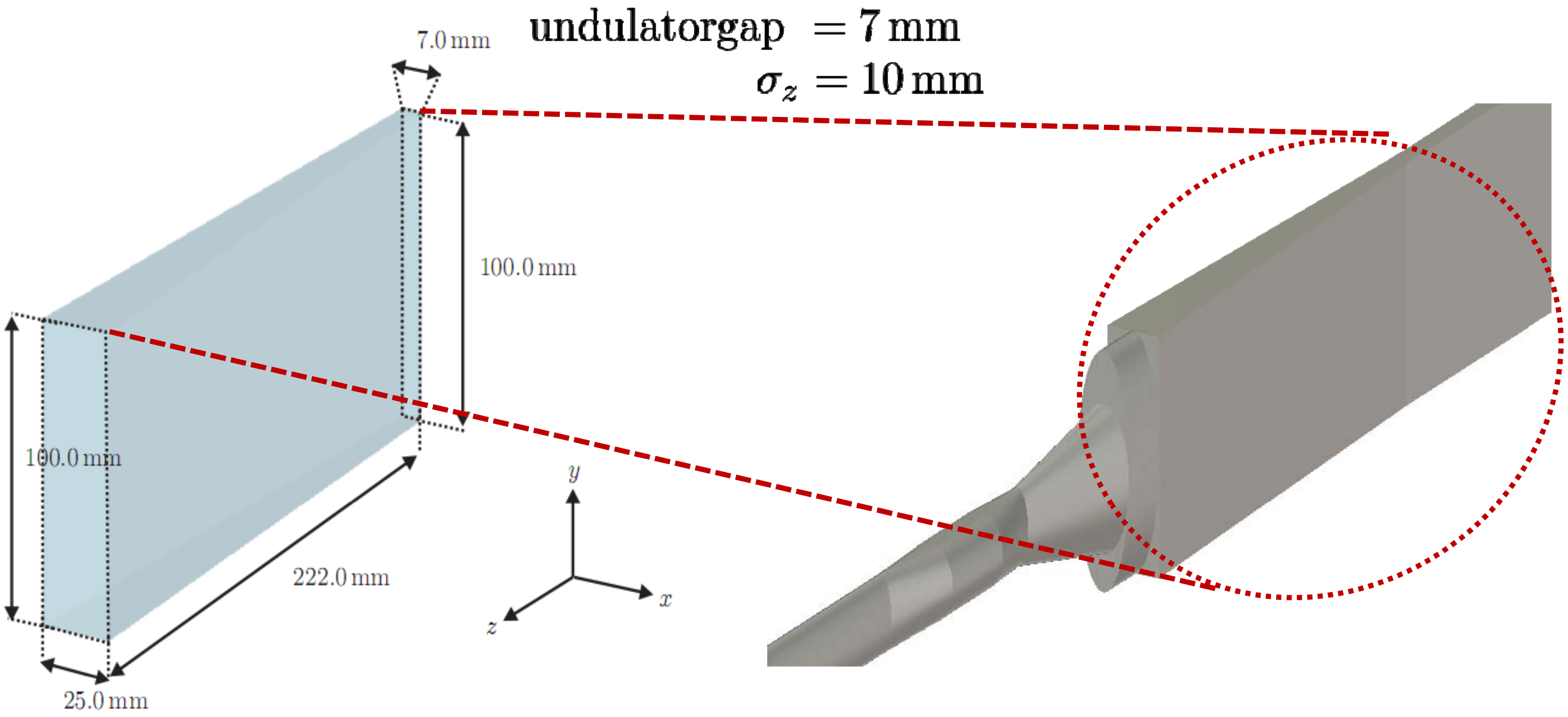
- **CAD Modellierung**



PETRA III Undulator

- **CAD Modellierung**

Bereich Plate zum Undulator:
Übergang gegenwärtig als glatt angenommen

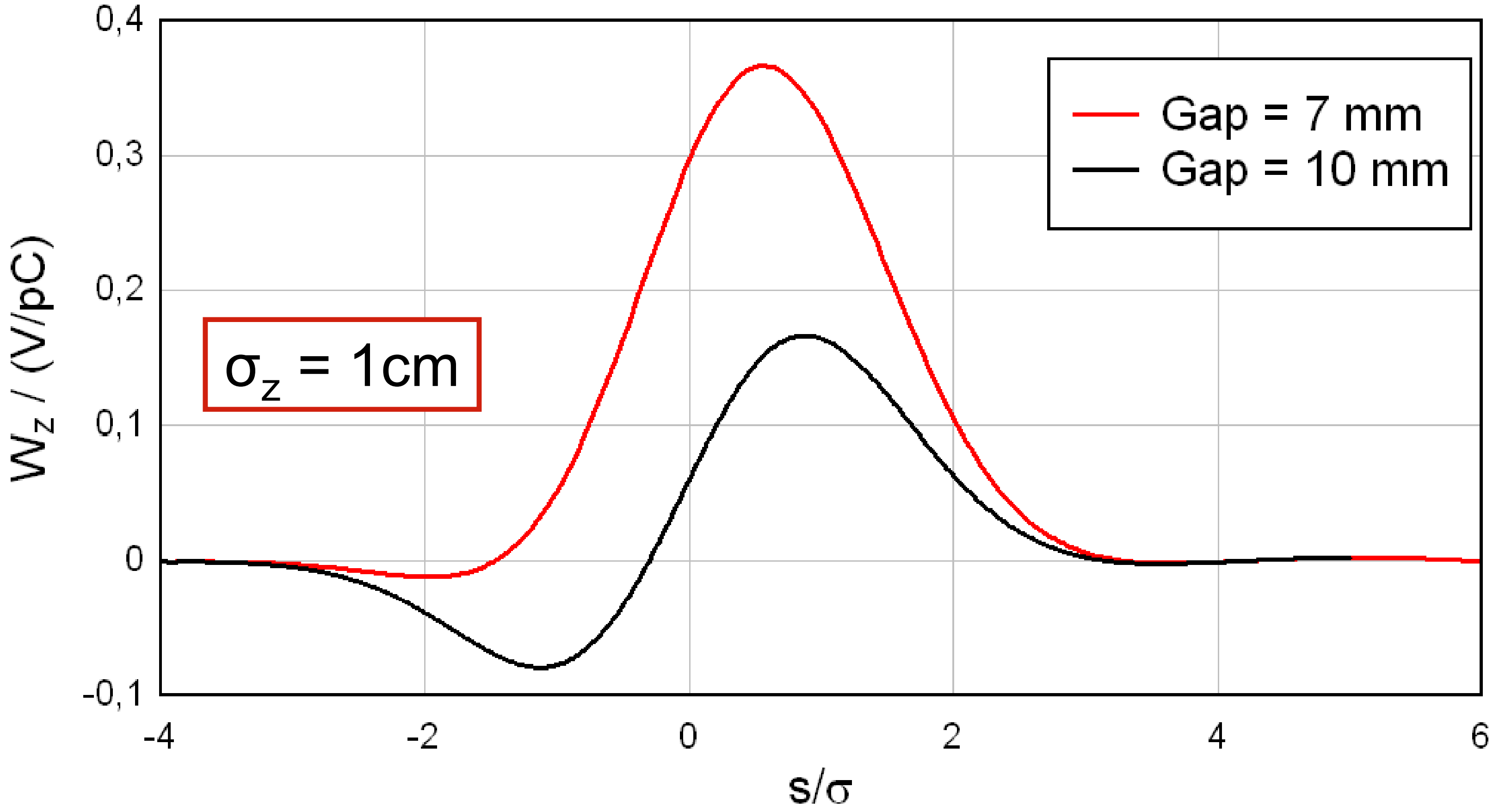


$$\text{undulatorgap} = 7\,\text{mm}$$
$$\sigma_z = 10\,\text{mm}$$

PETRA III Undulator

- **Simulationsergebnisse**

Longitudinales Wakepotential



PETRA III Undulator

- **Simulationsergebnisse**

Kick- und Lossfaktoren

	Gap = 7mm	**Gap = 10mm**
K_x (V / nC m)	0.04	-0.01
K_y (V / nC m)	0.18	-0.28
K_{loss} (V / nC)	21.3	46.1

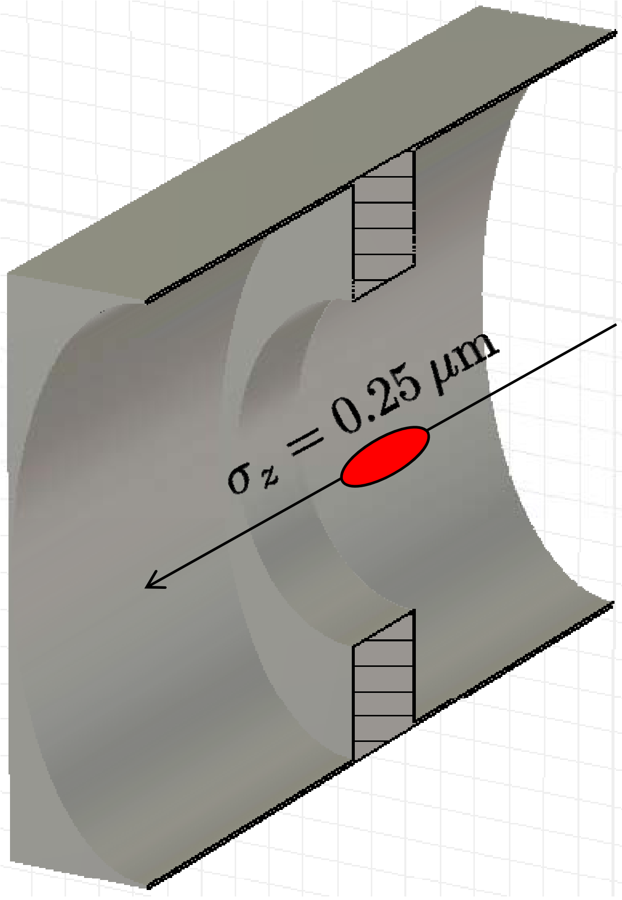
DESY: Projektbericht 2010

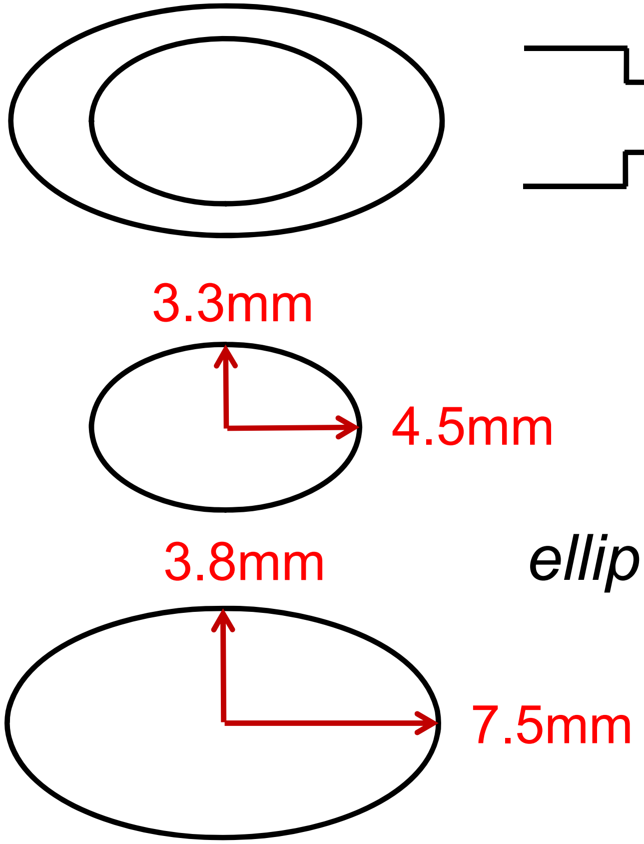
- **Themenbereiche:**

1. **Strahldynamiksimulationen für die XFEL**
2. **Wakefeldberechnungen für PETRA III**
3. **Wakefelder kurzer Bunche in der Undulatorkammer**
   - Problemstellung
   - Methodik
   - Simulationen
   - Diskussion

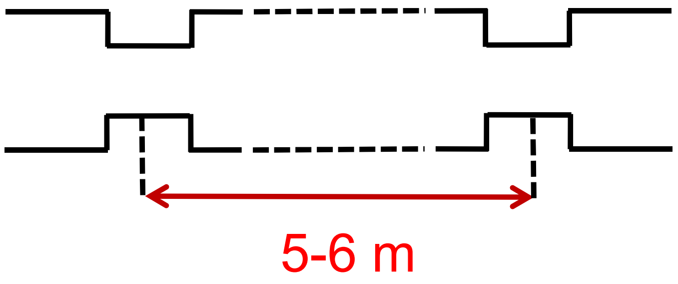
Wakefelder kurzer Bunche

- **Problemstellung**





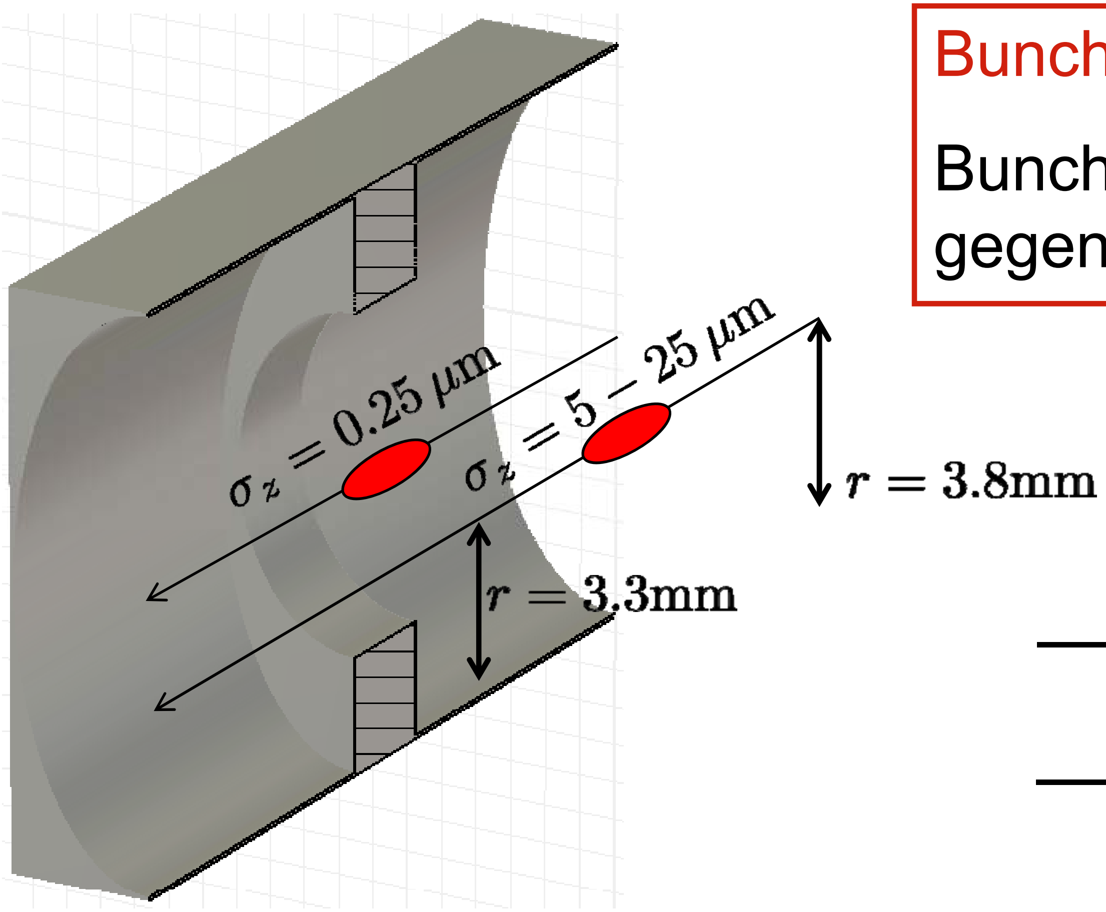
periodische Blenden



elliptischer Querschnitt

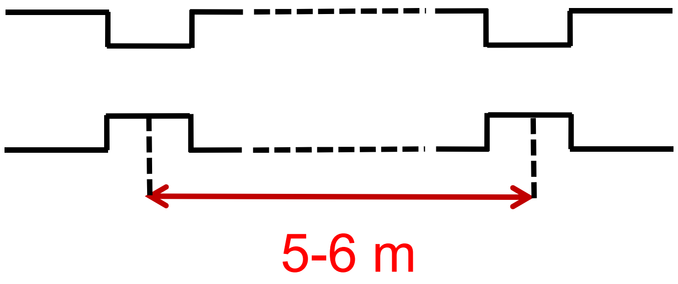
Wakefelder kurzer Bunche

- **Problemstellung: Annahmen 1**



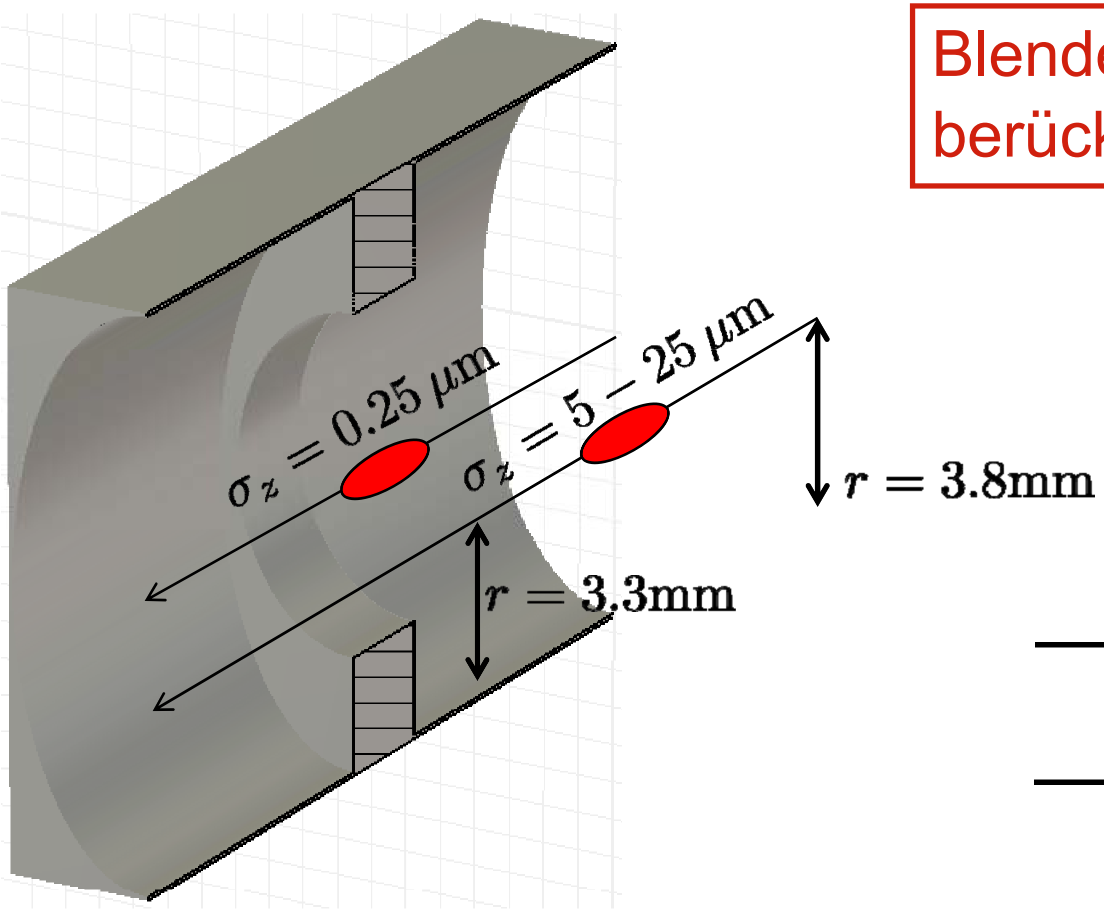
Bunchlängen: $\sigma_z = 10 - 25\,\mu m$

Bunche mit $\sigma_z = 0.25\,\mu m$ gegenwärtig nicht realistisch

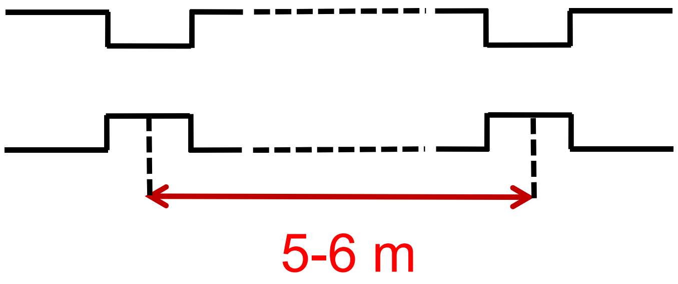


Wakefelder kurzer Bunche

- **Problemstellung: Annahmen 2**

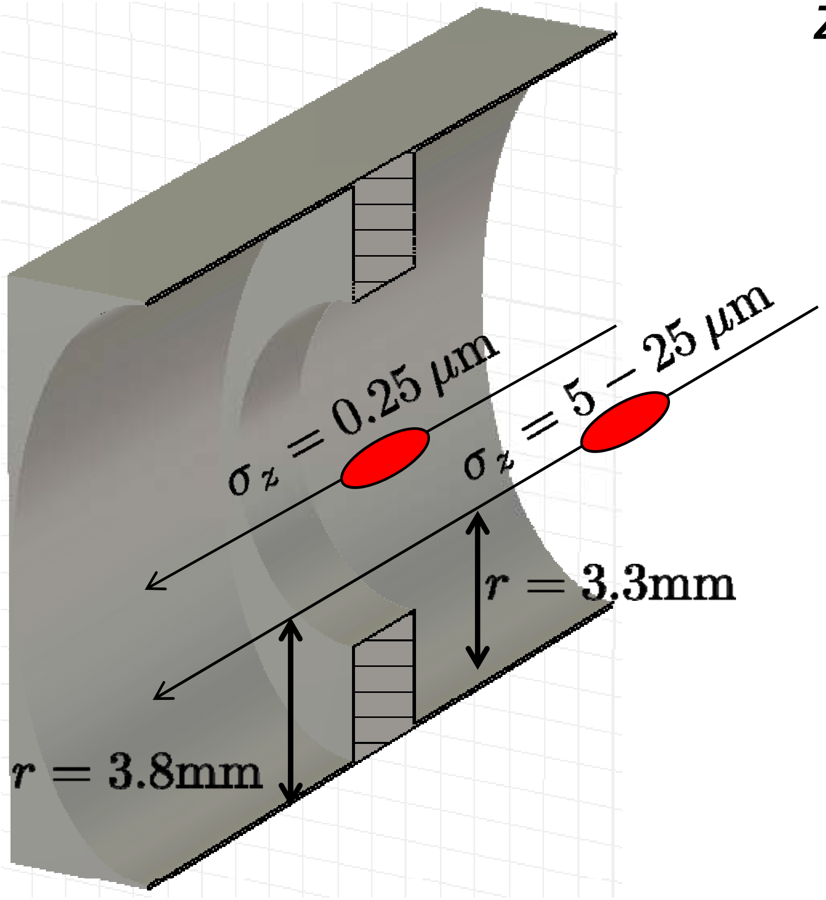


Blendenperiodizität wurde nicht berücksichtigt

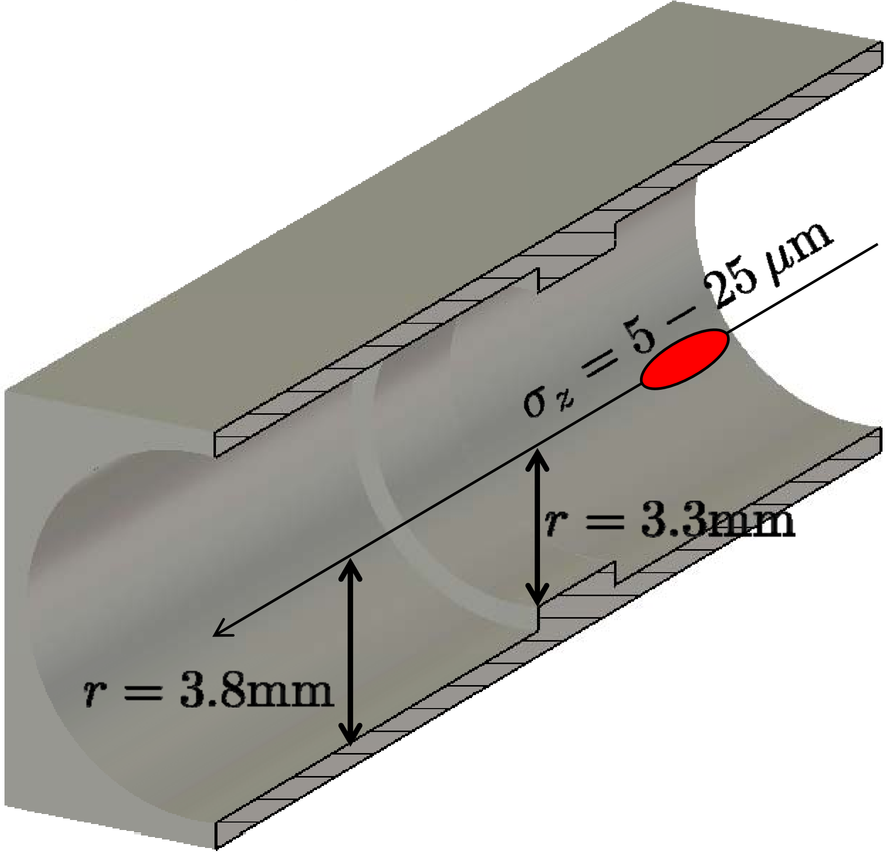


Wakefelder kurzer Bunche

- **Problemstellung: zusätzliches Vergleichsmodell**



zylindrischer Querschnitt



Wakefelder kurzer Bunche

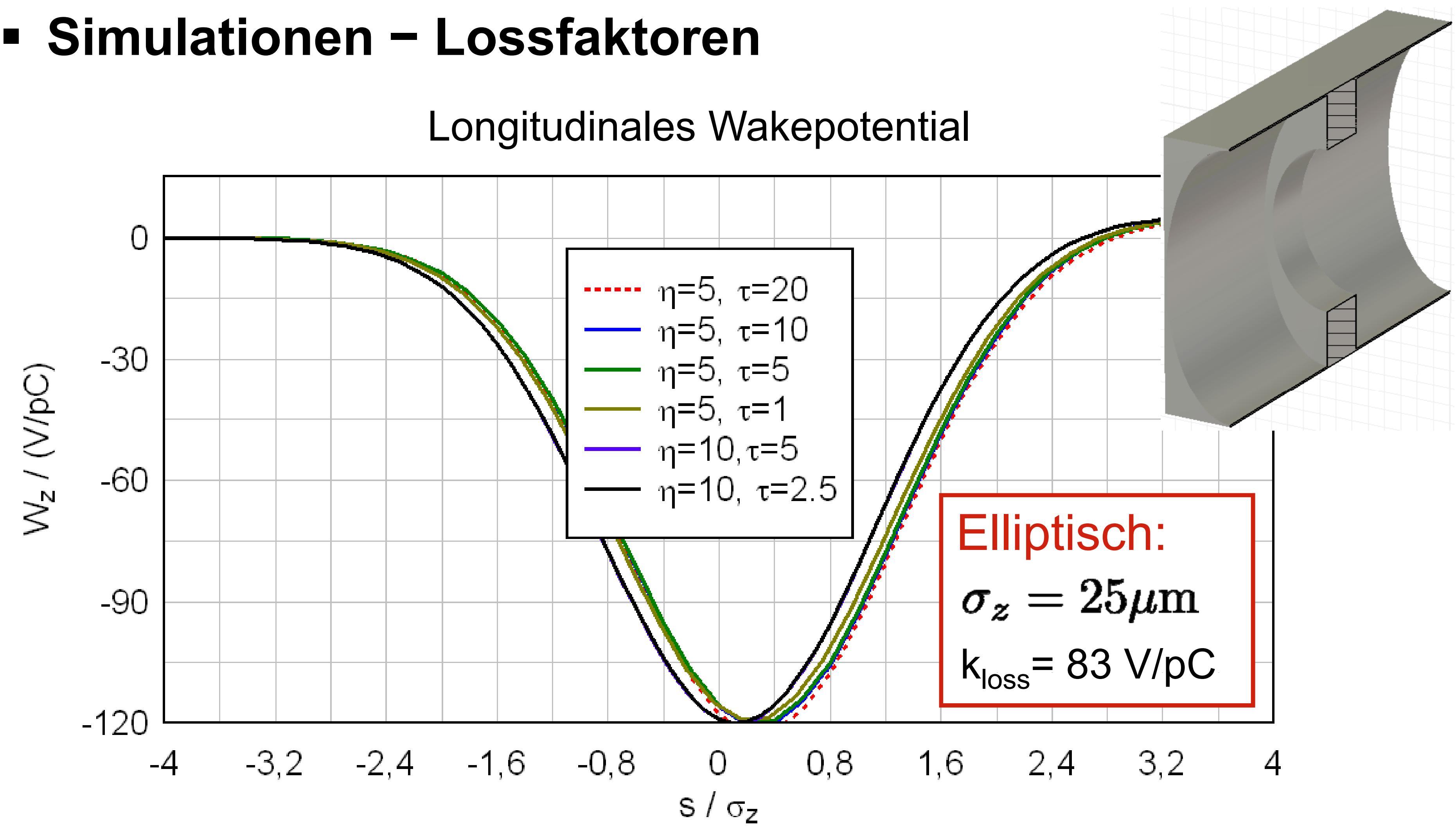
- **Methodik**

1. **PBCI in 3D**
2. Transversales Verhältnis Strahlrohr vs. σ sehr groß
   - Speicherbedarf ist hoch (~300 mil. Gitterpunkte für σ = 10μm)
3. Abstand Blenden (Abschattung) vs. σ sehr lang
   - Lange Rechenzeit (10^5-10^6 Zeitschritte)
4. **Seit 2010: Symmetrierandbedingen in PBCI**
   - Ausreichend für die elliptische Geometrie
   - Reduktion des Speichers / Rechenzeit um Faktor 4

Wakefelder kurzer Bunche

- **Simulationen − Lossfaktoren**

Longitudinales Wakepotential



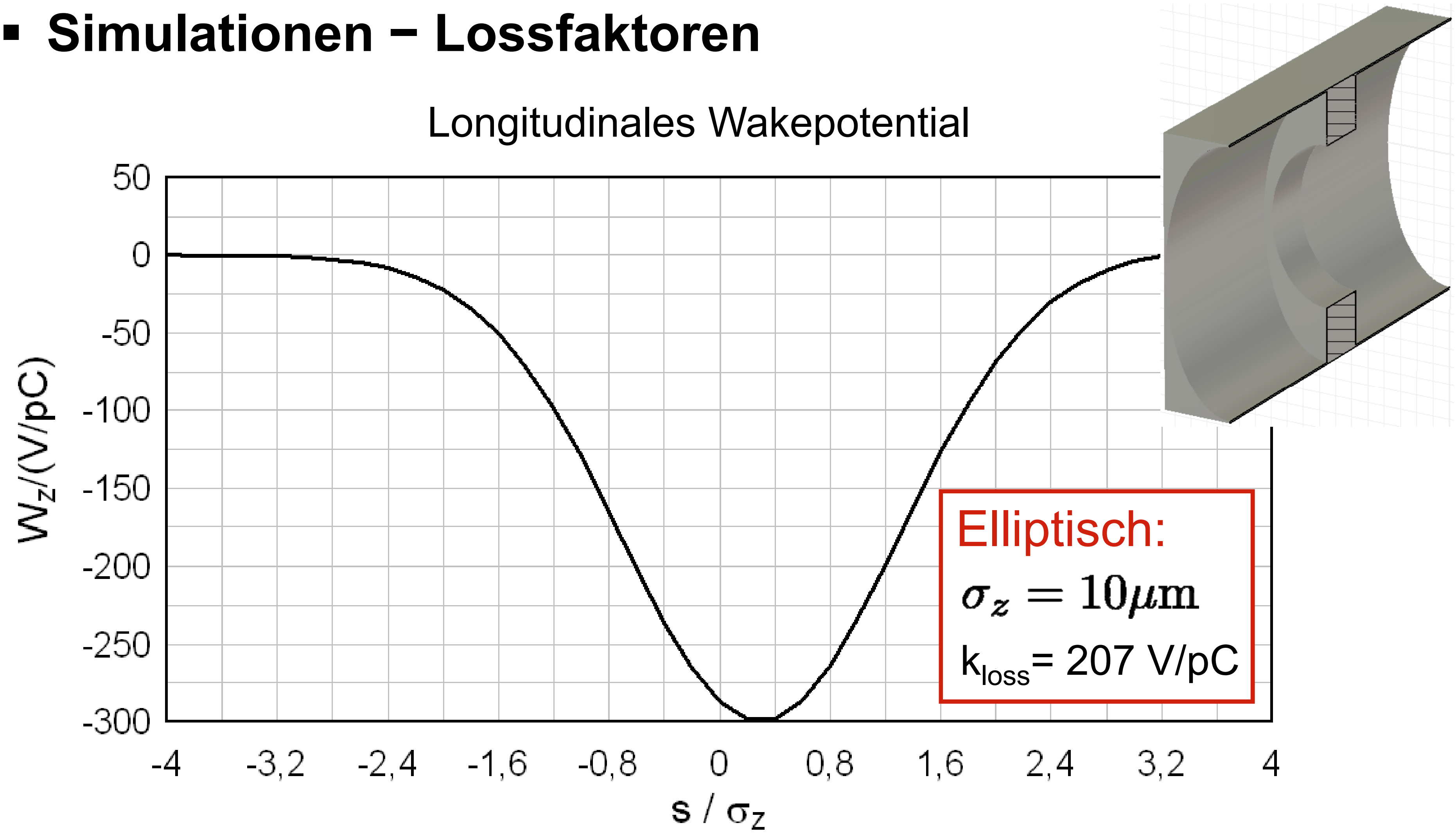
Elliptisch:

$\sigma_z = 25\mu\mathrm{m}$

k_{loss}= 83 V/pC

Wakefelder kurzer Bunche

- **Simulationen − Lossfaktoren**



Longitudinales Wakepotential

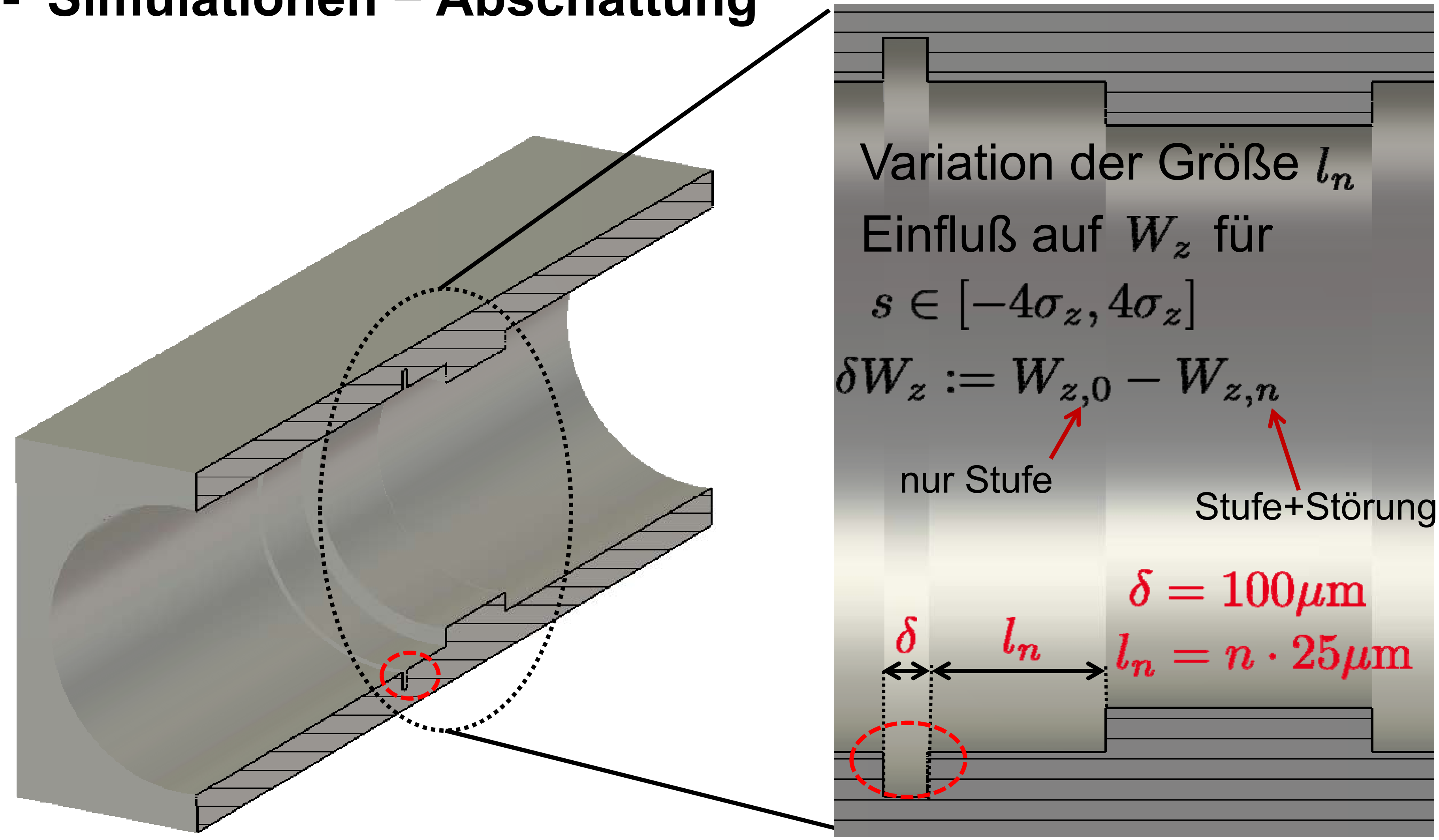
Elliptisch:

$\sigma_z = 10\mu\text{m}$

k_{loss}= 207 V/pC

Wakefelder kurzer Bunche

- **Simulationen – Abschattung**



Variation der Größe l_n

Einfluß auf W_z für

$s \in [-4\sigma_z, 4\sigma_z]$

$$\delta W_z := W_{z,0} - W_{z,n}$$

nur Stufe

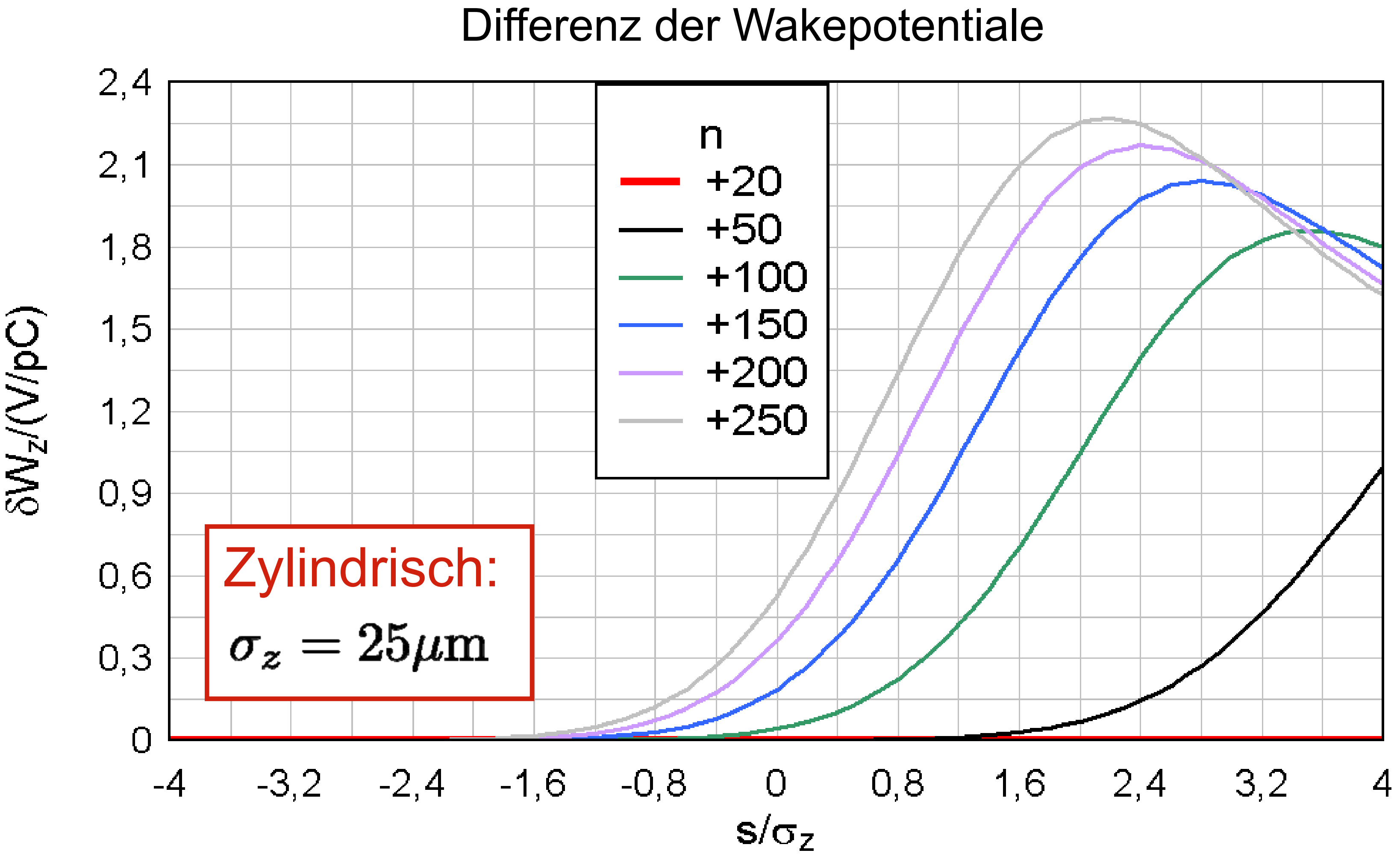
Stufe+Störung

$\delta = 100\mu\text{m}$

$l_n = n \cdot 25\mu\text{m}$

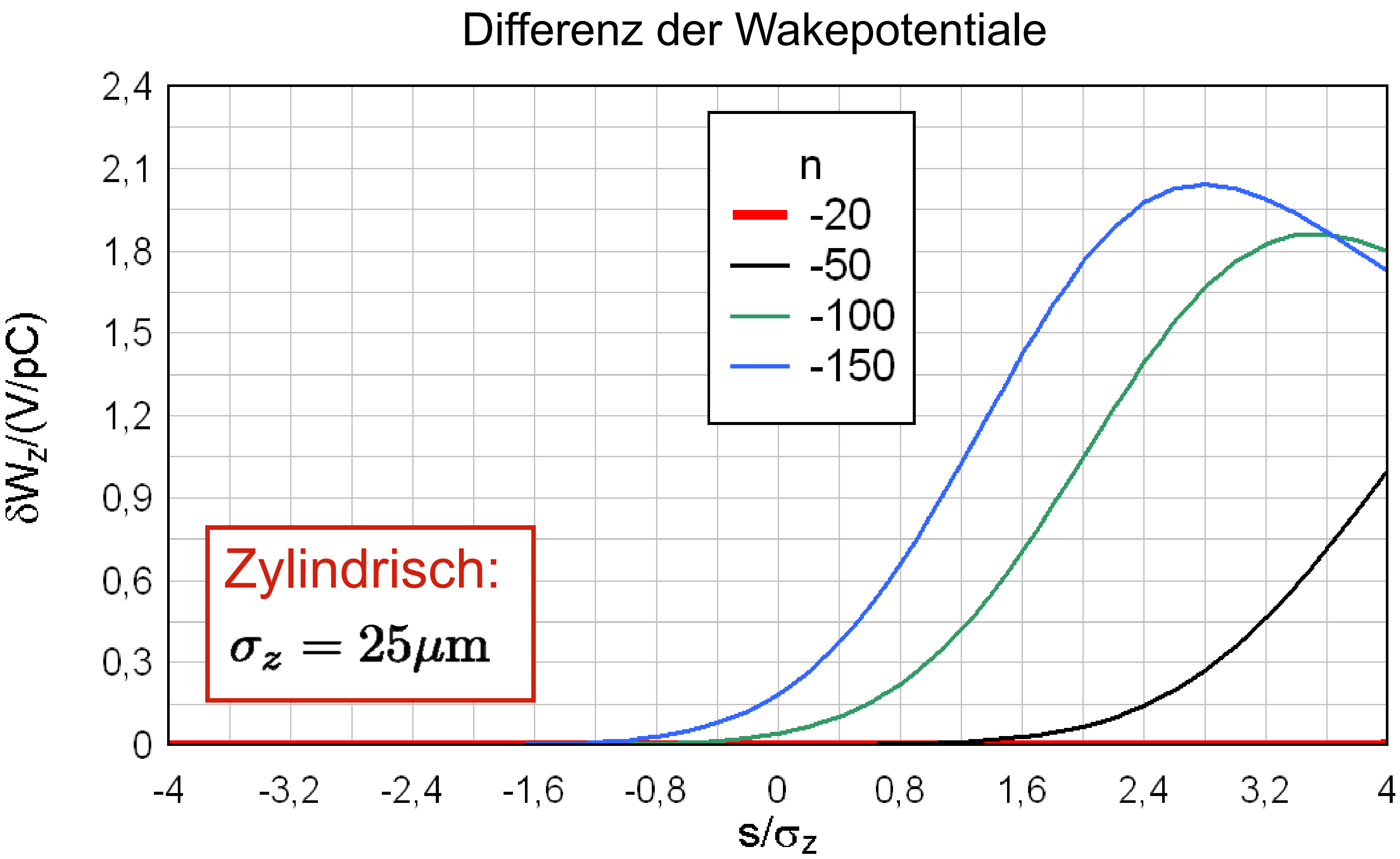
Wakefelder kurzer Bunche

- **Simulationen − Abschattung**



Wakefelder kurzer Bunche

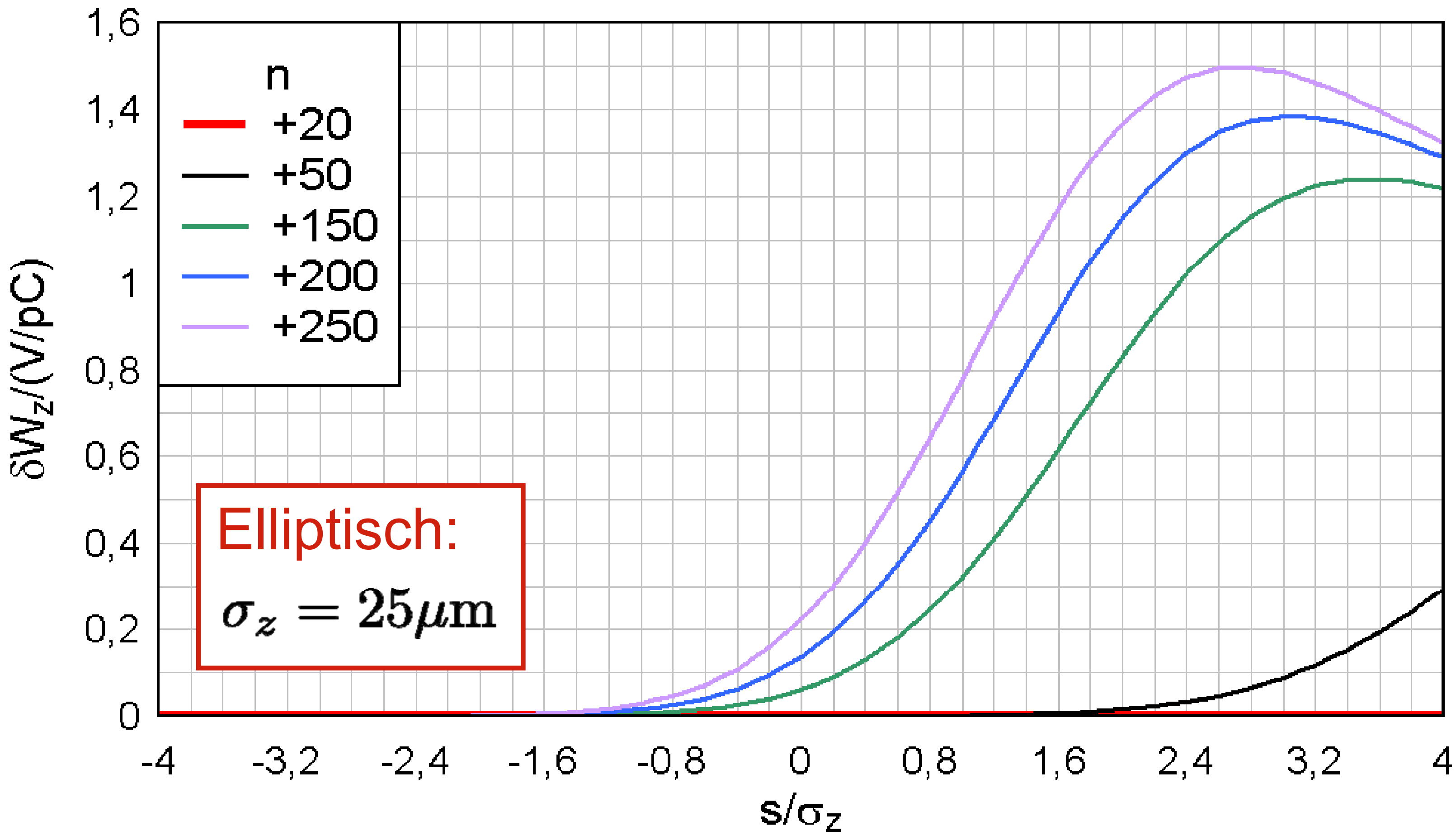
- **Simulationen − Abschattung**



Wakefelder kurzer Bunche

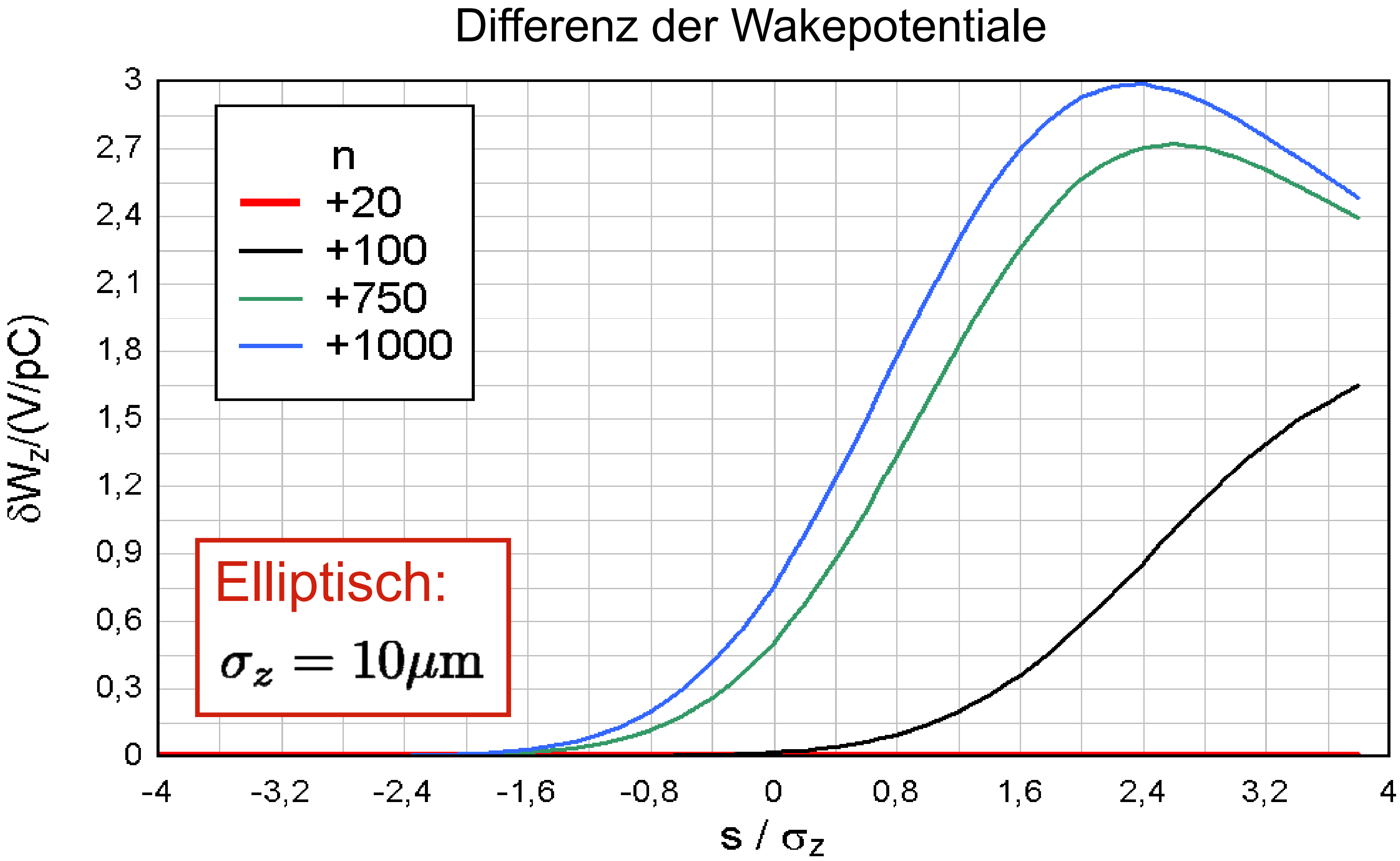
- **Simulationen − Abschattung**

Differenz der Wakepotentiale



Wakefelder kurzer Bunche

- **Simulationen − Abschattung**



Elliptisch:

$\sigma_z = 10\mu\mathrm{m}$

Strahldynamiksimulationen

- **Diskussion**

1. Simulationen mit 25-10µm Bunches ohne weiteres Möglich
2. Kürzere Bunche (bis 1µm) machbar, aber
   - Hohes Rechen- und Zeitleistung (3 Monate cluster shutdown in 2010)
3. Für $\sigma_z < 1\mu m$ ist eine komplett neue Entwicklung eines parallelen 2D-Codes notwendig
4. Abschattungslänge für die Untersuchten Fälle liegt zwischen 0.5-1.5mm
   - Feiner aufgelöste Simulationen in diesem Bereich werden noch geliefert