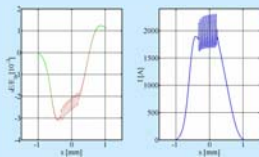
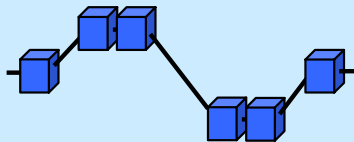
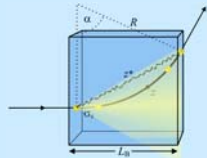
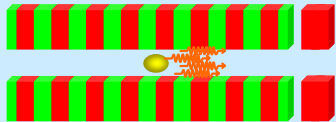
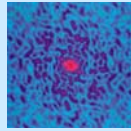
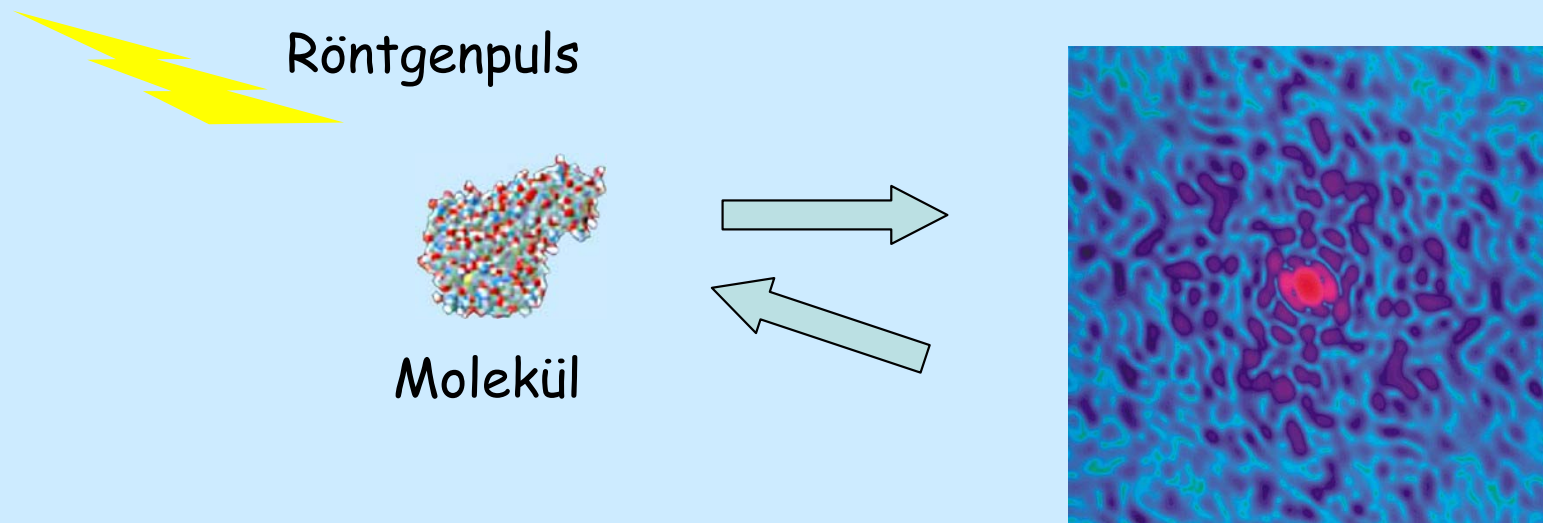


A Bunch Compressor for small Emittances and high Peak Currents at the VUV-FEL

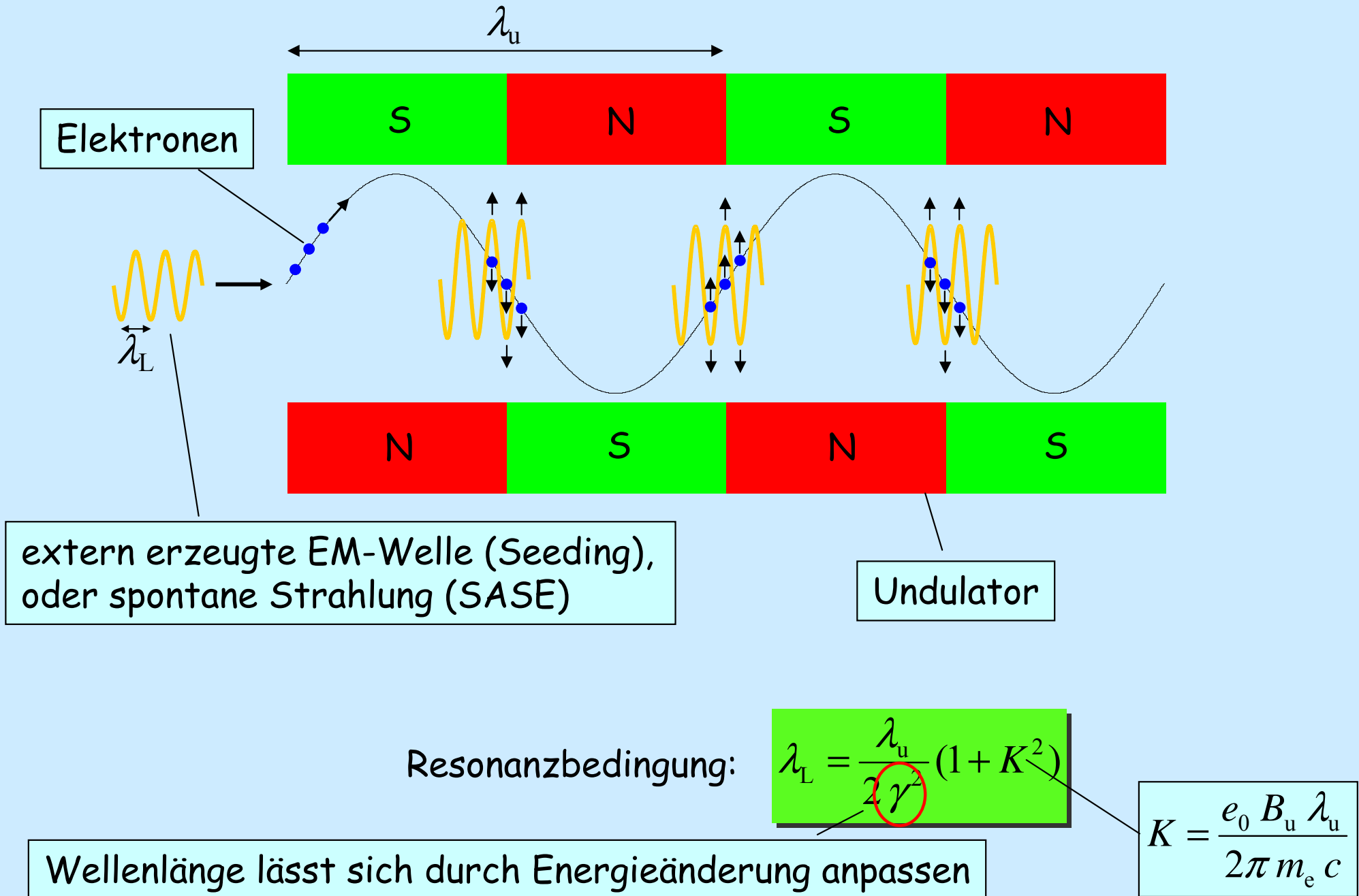


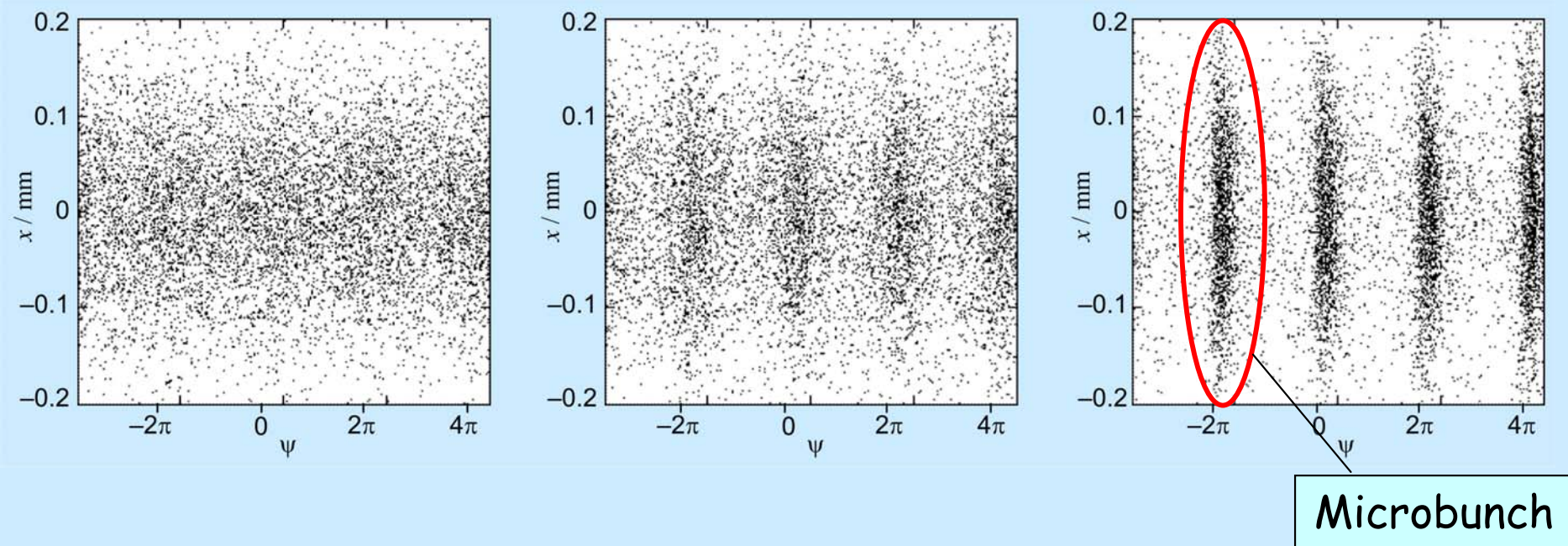
- Motivation: Struktur von Molekülen
- Der Freie-Elektronen Laser
- Kompression von Elektronenstrahlen
- kohärente Synchrotronstrahlung in Bunchkompressoren
- Simulationen unterschiedlicher Bunchkompressoren für BC3
- Verstärkung von Dichtemodulationen durch kohärente Synchrotronstrahlung
- Zusammenfassung



Es werden sehr kurze, kohärente
Röntgenpulse hoher Intensität benötigt
→ Röntgen-Laser

- Die herkömmliche Lasertechnologie kann für Strahlung mit $\lambda \ll 100\text{nm}$ nicht verwendet werden.
- Freie-Elektronen Laser kommen ohne Laserkristall und ohne Spiegel aus (High-Gain FEL). Sie können kohärente Röntgen-Strahlung erzeugen.

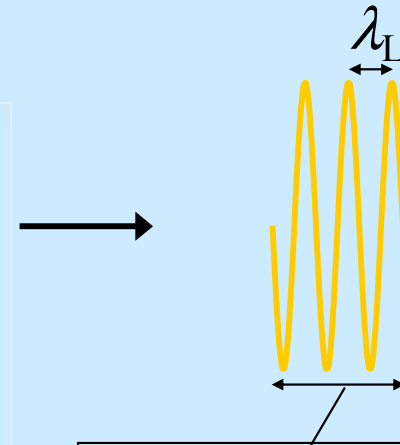
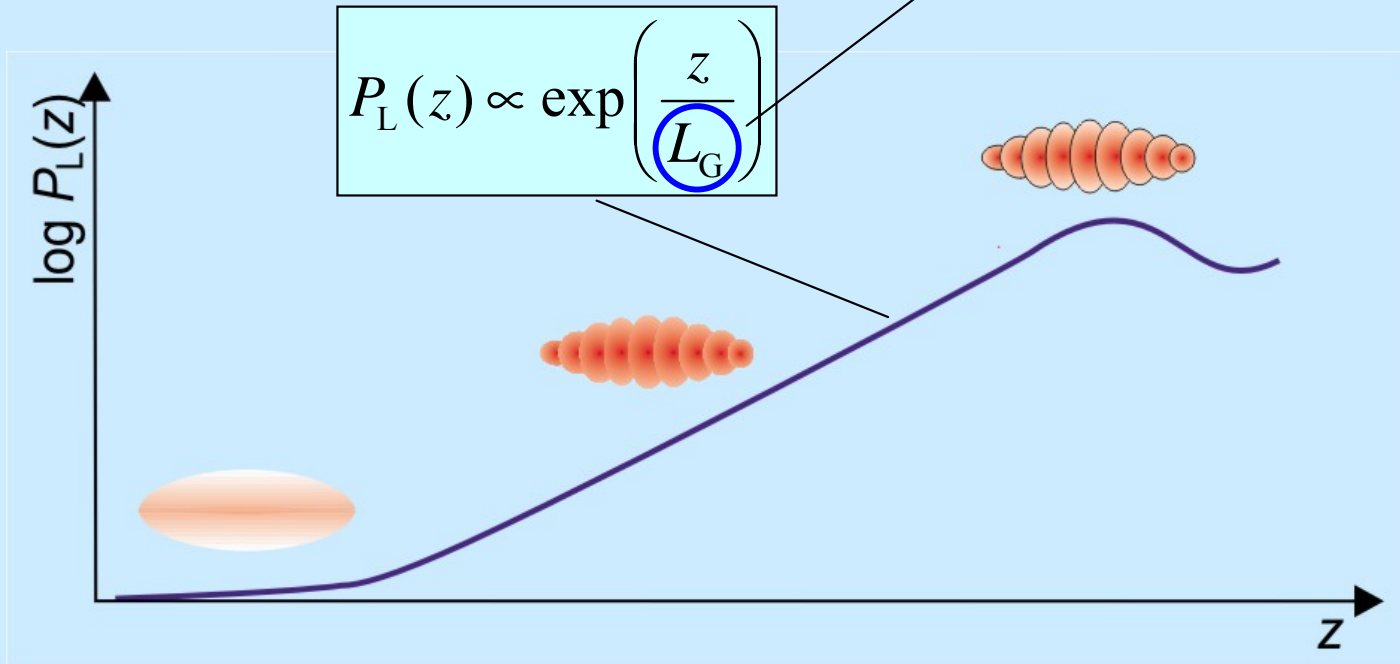




Die Elektronen innerhalb eines Microbunches beginnen kohärente Strahlung der Wellenlänge λ_L zu erzeugen: $P \propto N_c^2$

- \Rightarrow Feldstärke der EM-Welle steigt
- \Rightarrow Microbunching wird stärker
- \Rightarrow mehr Elektronen strahlen kohärent

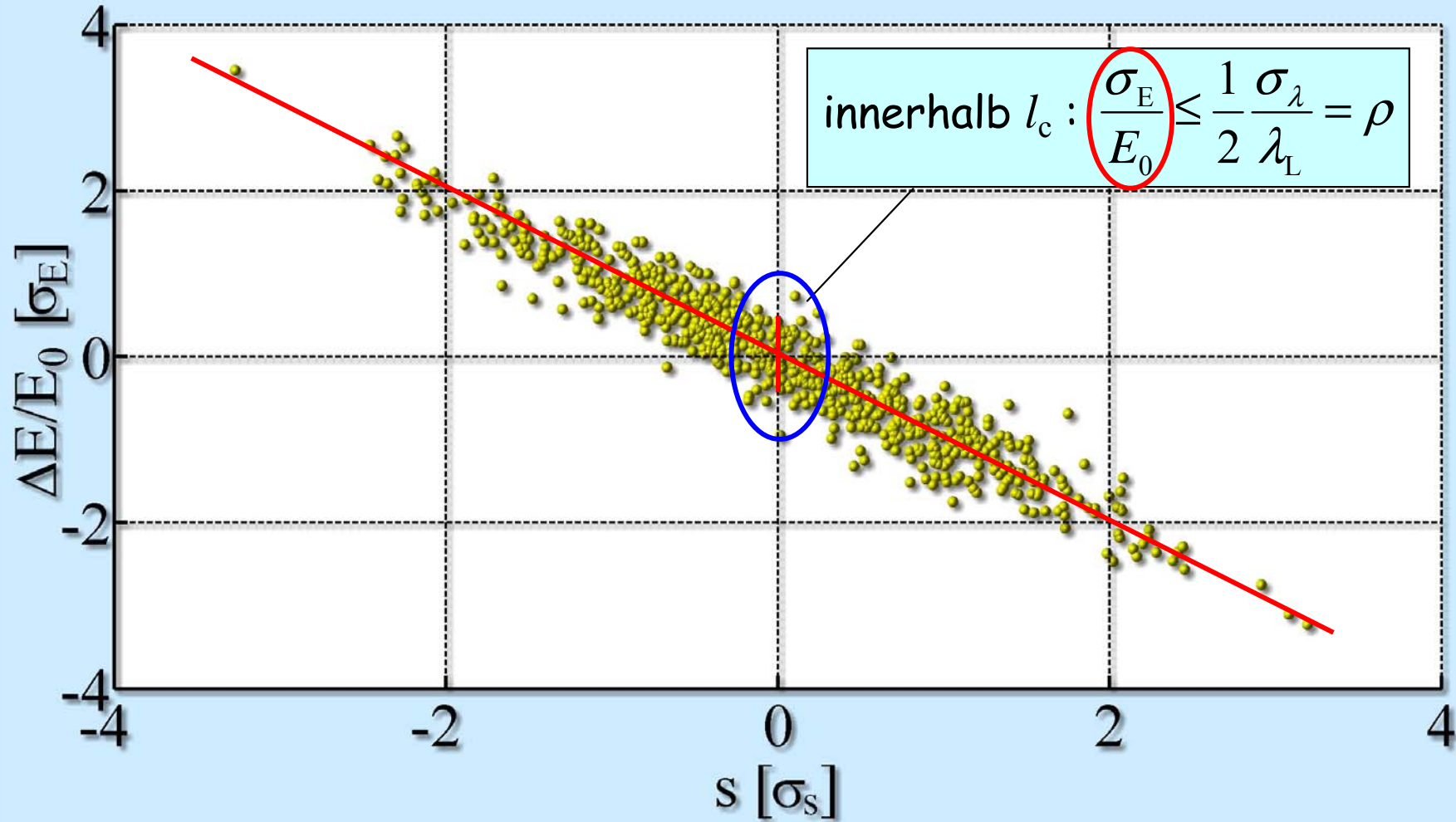
$$\text{Gain-Länge: } L_G = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{I_A \gamma^3 \lambda_u \sigma_r^2}{4\pi K^2 I_0} \right)^{1/3}$$

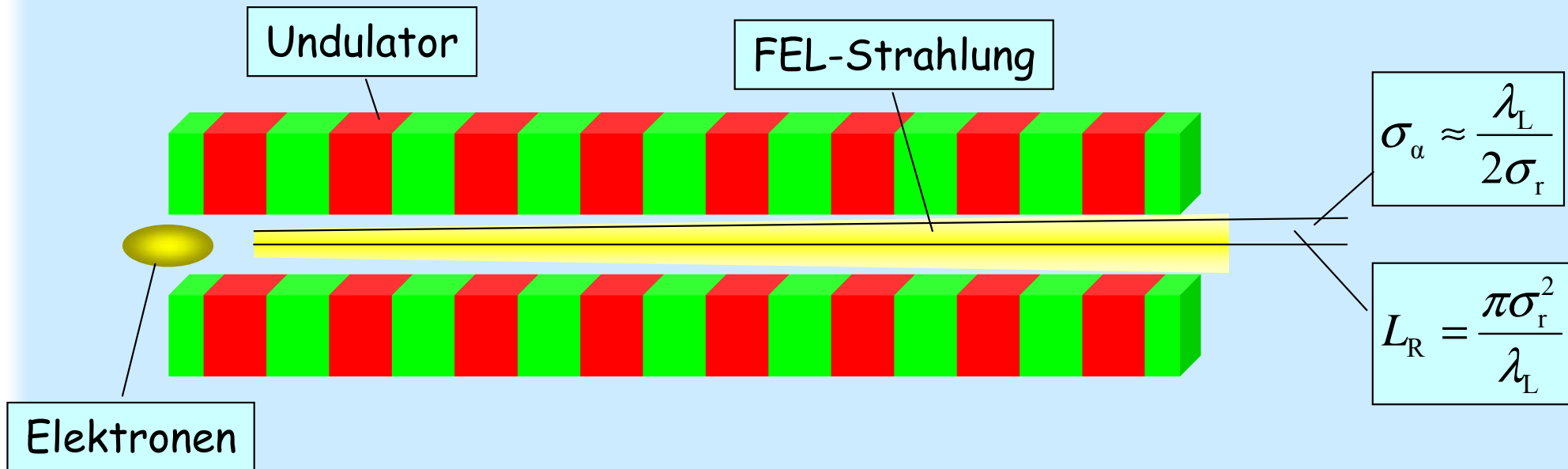


Kooperations-Länge

$$l_c = \frac{\lambda_L}{4\pi \rho}$$

$$\text{FEL-Parameter: } \rho = \frac{1}{4\pi\sqrt{3}} \frac{\lambda_u}{L_G}$$





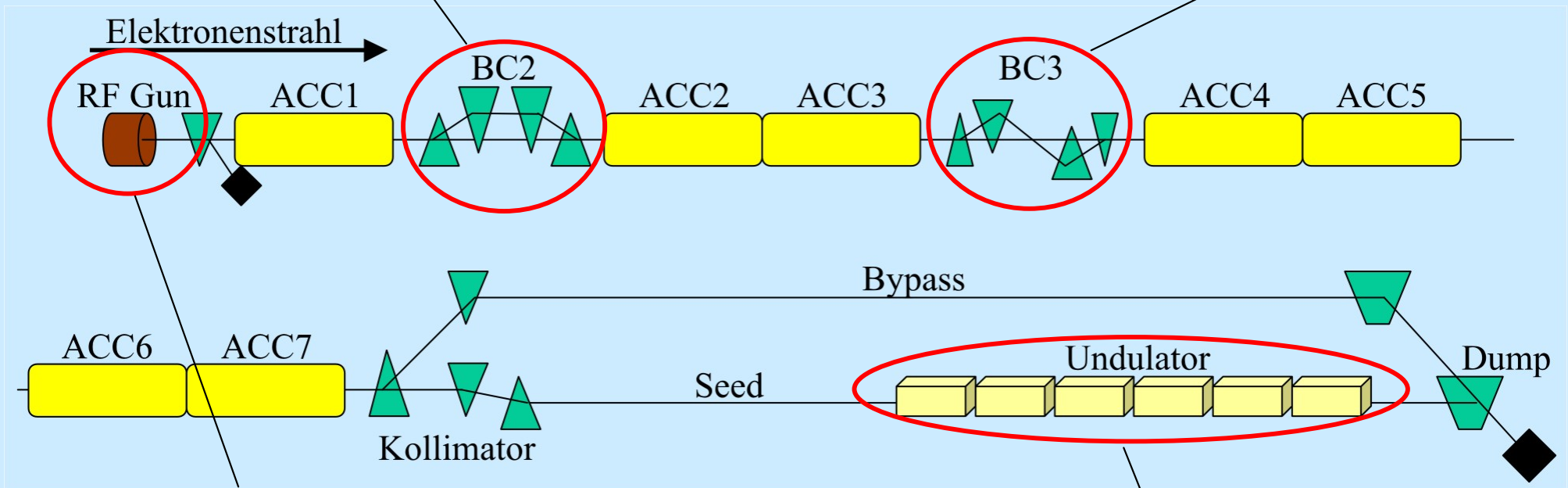
Die Rayleigh-Länge sollte der Gain-Länge entsprechen. Dafür muss für die normierte transversale Emittanz innerhalb einer Kooperationslänge gelten:

$$\varepsilon < \frac{\lambda_L}{4\pi} \gamma$$

Wichtige Parameter des Elektronenstrahls:
Strom I , Emittanz ε , Energiebreite σ_E

Kompression von 2mm auf 250 μ m

Kompression von 250 μ m auf 50 μ m



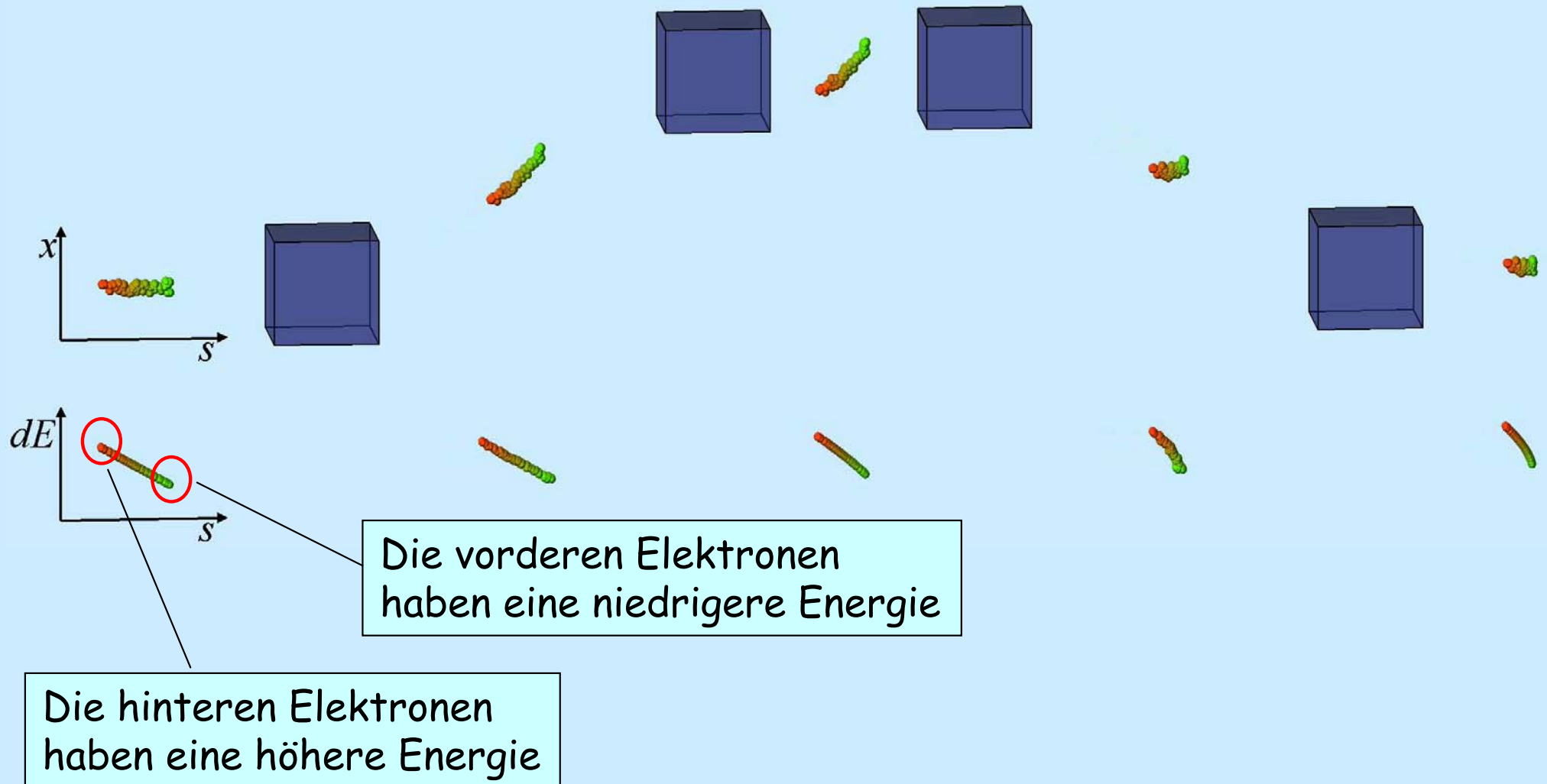
Elektronenstrahlparameter
bei der HF Gun:

Ladung $Q=1\text{nC}$
 gaussförmiges Profil
 Strahllänge $\sigma_s=2\text{mm}$
 Strom $I=62.5\text{A}$
 Emittanz $\varepsilon=1\text{mm mrad}$
 Energiebreite $\sigma_E=30\text{keV}$

Elektronenstrahlparameter
am Undulator für $\lambda_L=6\text{nm}$:

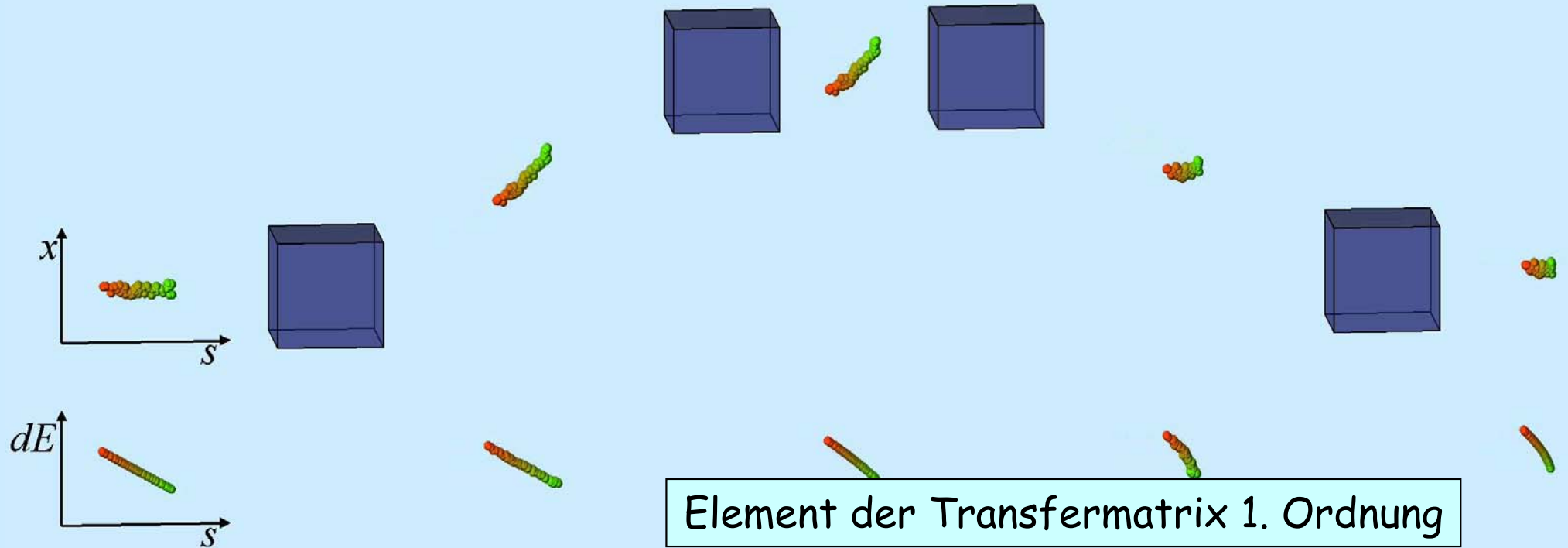
Energie $E_0=1\text{GeV}$
 Energiebreite $\sigma_E<3\text{MeV}$
 Emittanz $\varepsilon<2\text{mm mrad}$
 Strom $I=2500\text{A}$

Kompression von Elektronenstrahlen in Magnetschikanen



Die hinteren Elektronen bewegen sich auf kürzeren Bahnen und holen die vorderen Elektronen ein.

Kompression von Elektronenstrahlen in Magnetschikanen



Element der Transfermatrix 1. Ordnung

Die Länge der Elektronenbahn ist: $l = l_{\text{ref}} + R_{56} \frac{\Delta E}{E_0} + R_{566} \left(\frac{\Delta E}{E_0} \right)^2 + \dots$

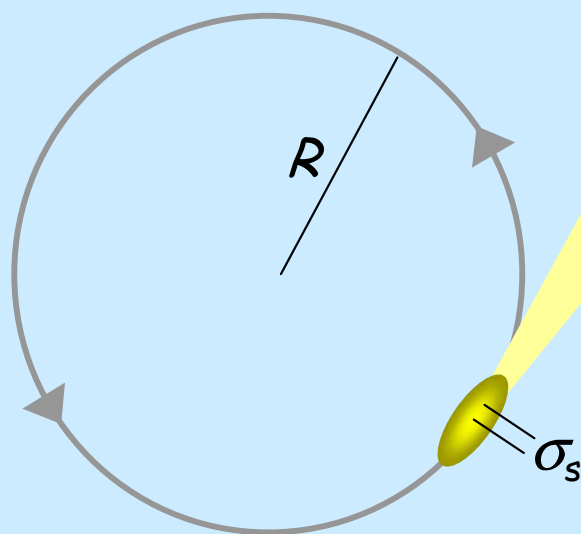
Bahnlänge eines Elektrons mit nomineller Energie E_0

Energieabweichung

nach der Kompression ist die Strahllänge: $\sigma_{s,f} \approx \sigma_{s,i} - R_{56} \frac{\sigma_E}{E_0}$

Wie im Undulator des FELs erzeugen die Elektronen Synchrotronstrahlung, wenn sie durch die Dipole eines Bunchkompressors fliegen.

- => die Elektronen treten in Wechselwirkung miteinander und ändern ihre Energie abhängig von ihrer Position im Strahl
- => die Energieänderung führt zu einer falschen Ablenkung und beeinflusst so die transversalen Phasenraumkoordinaten der Elektronen!

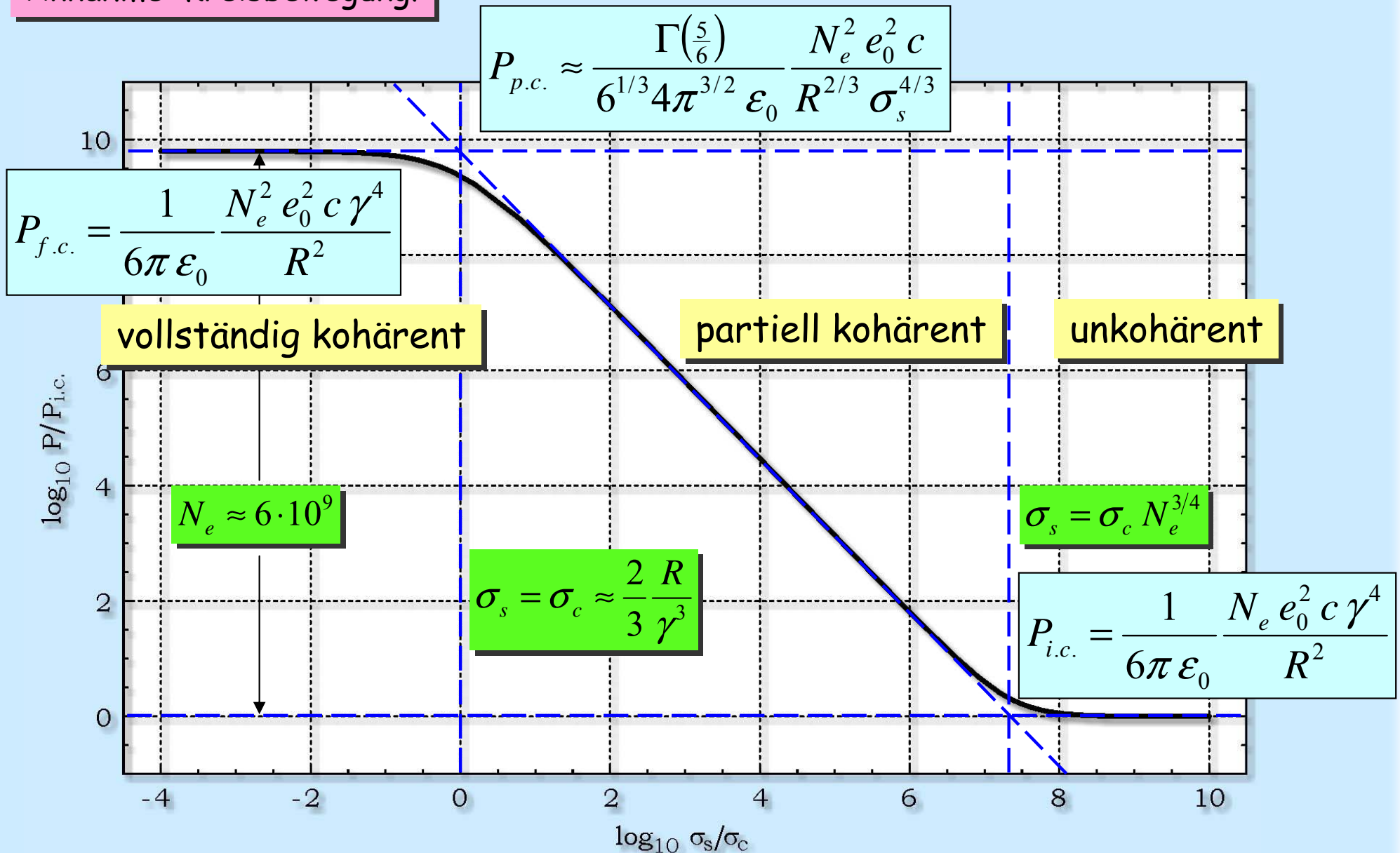


Bewegen sich die Elektronen auf **kreisförmigen** Bahnen, dann hängt die Strahlungsleistung ab von:

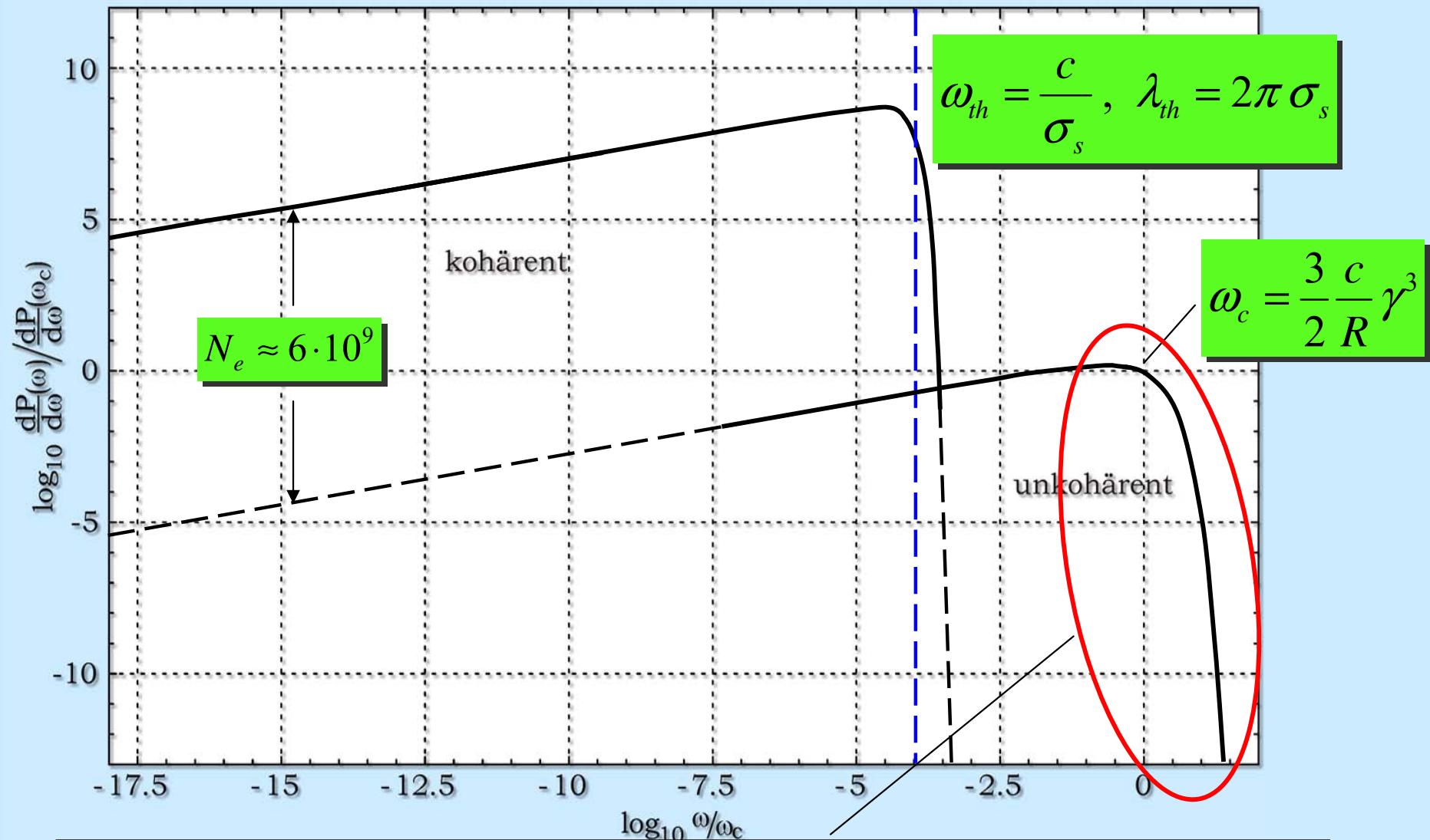
- der Elektronenergie E , γ
- der Strahllänge σ_s
- der Strahlladung q , N_e
- dem Bahnradius R

Strahllängenabhängigkeit der Synchrotronstrahlungsleistung

Annahme: Kreisbewegung!



Annahme: Kreisbewegung!



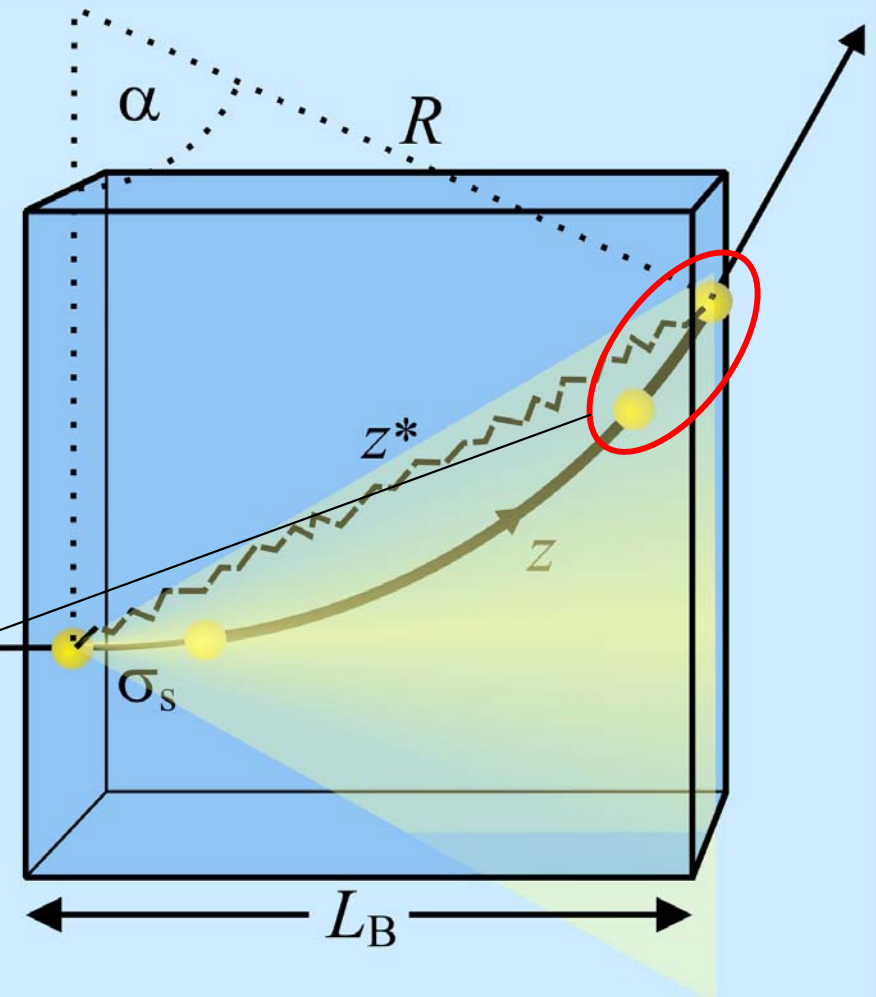
Nur der hochfrequente Anteil des Spektrum ist energieabhängig!

In einer Magnetschikane befindet sich der Elektronenstrahl nicht in kreisförmiger Bewegung, sondern bewegt sich auf Kreisbögen mit endlicher Länge.

Die Strahlung von den hinteren Elektronen holt nur Elektronen ein, die näher sind als die Slippage Length:

$$l_{sl} = z - z^* \approx \frac{R\alpha^3}{24}$$

Elektronen am Kopf und am Ende des Strahls können nur wechselwirken, wenn die Slippage Length länger ist als der Elektronenstrahl.



Es gibt drei verschiedene Ansätze für die Berechnung der kohärenten Synchrotronstrahlung:

Projektion (1D):

- analytische Berechnung für 1D Ladungsverteilungen
- sehr schnell
- komplexe Elektronenstrahlen möglich (>100000 Teilchen)

Greens Funktionen (2D):

- Berechnung longitudinaler und transversaler Felder auf einem 2D Gitter
- langsamer als 1D
- Elektronenstrahlen noch recht gut modelliert (>10000 Teilchen)

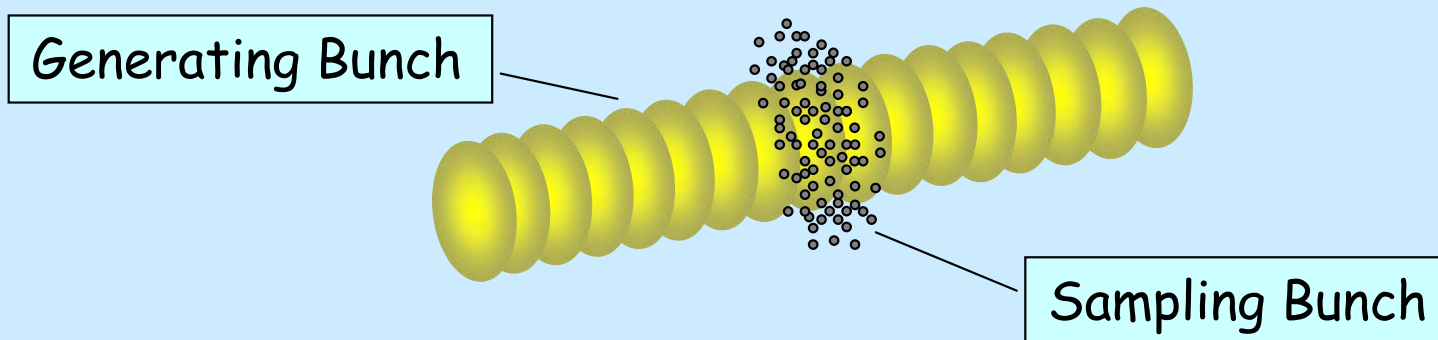
Direkt / Convolution (3D):

- numerische 3D Integration der Skalar- und Vektorpotentiale
- sehr langsam
- Elektronenstrahl sehr einfach (>1000 Teilchen)

Der Elektronenstrahl wird durch zwei Ladungsverteilungen modelliert:

Generating Bunch:

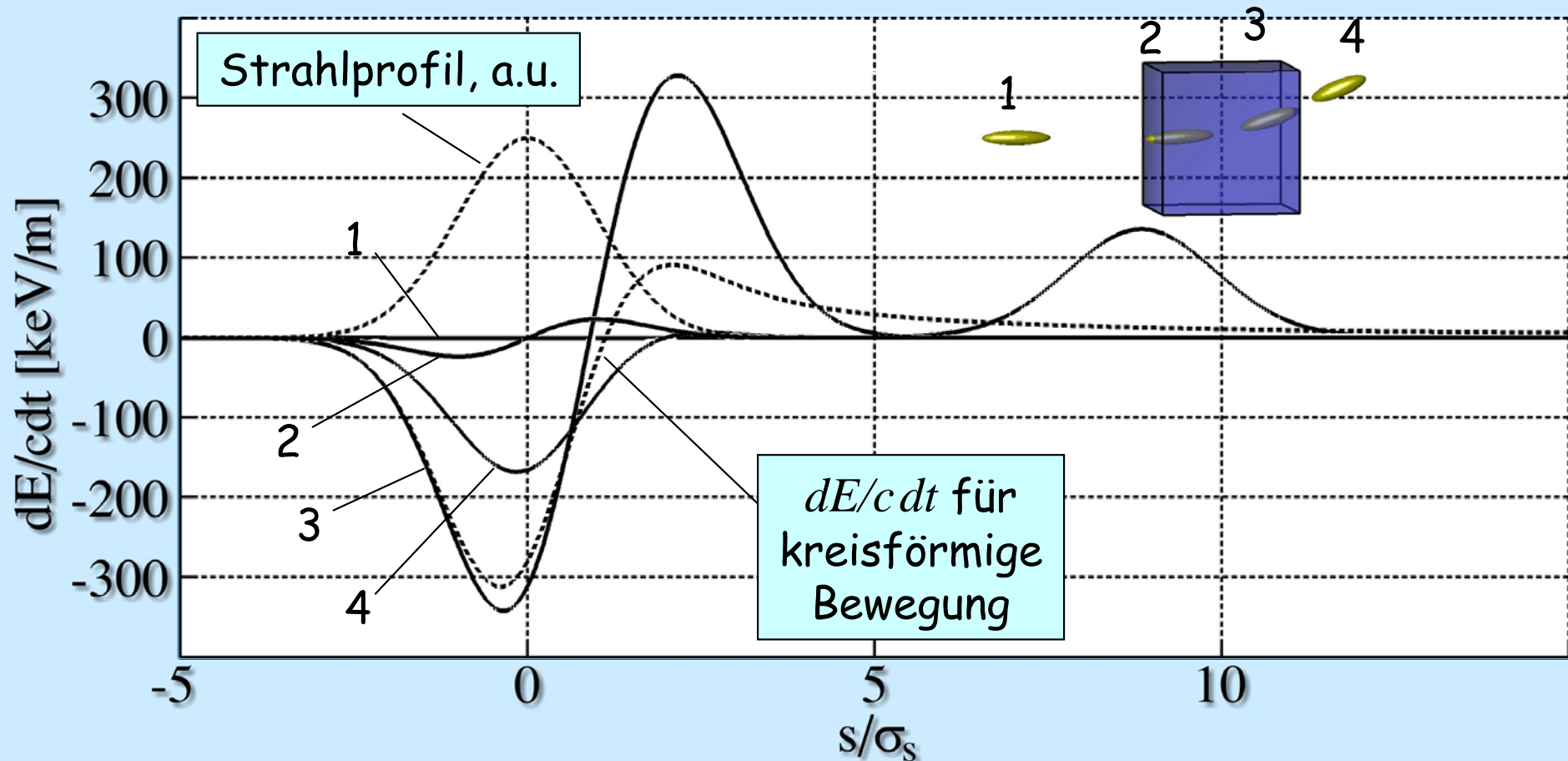
- erzeugt elektromagnetische Felder
- seine Bewegung berücksichtigt diese Felder
- besteht aus gaußförmigen Ladungsverteilungen (Sub-Bunche)
- die transversalen Koordinaten der Sub-Bunche sind am Anfang null



Sampling Bunch:

- erzeugt keine elektromagnetischen Felder
- Bewegung berücksichtigt Felder des Generating Bunch
- besteht aus punktförmigen Ladungen
- kurze Scheibe in der Mitte des Generating Bunch

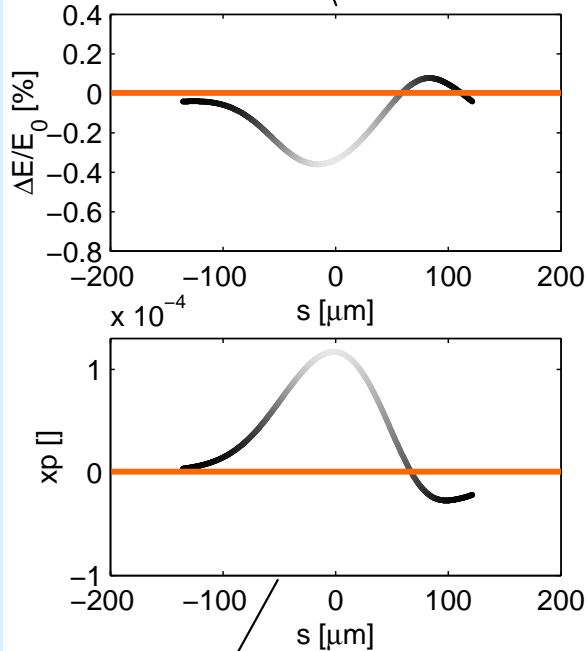
Die Rate $dE/c dt$ mit der sich die Energie der Elektronen ändert, hängt nicht nur von der Elektronenposition s im Strahl ab, sondern auch von der Strahlposition z im Dipol.



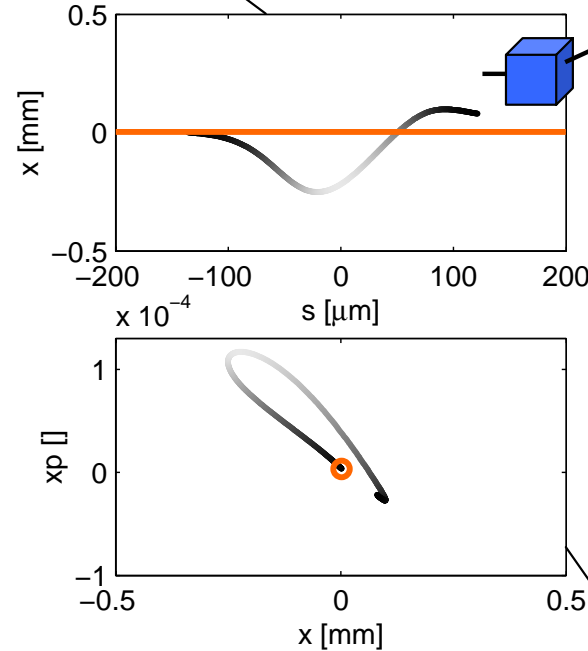
longitudinaler Phasenraum

kohärente Synchrotronstrahlung in Magnetschikanen

s-x



s-x'

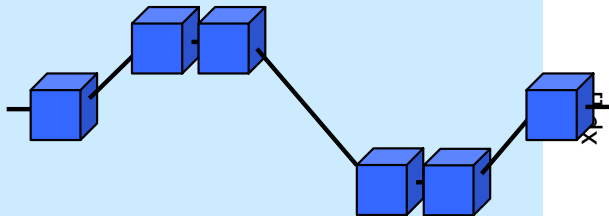


C-Schikane

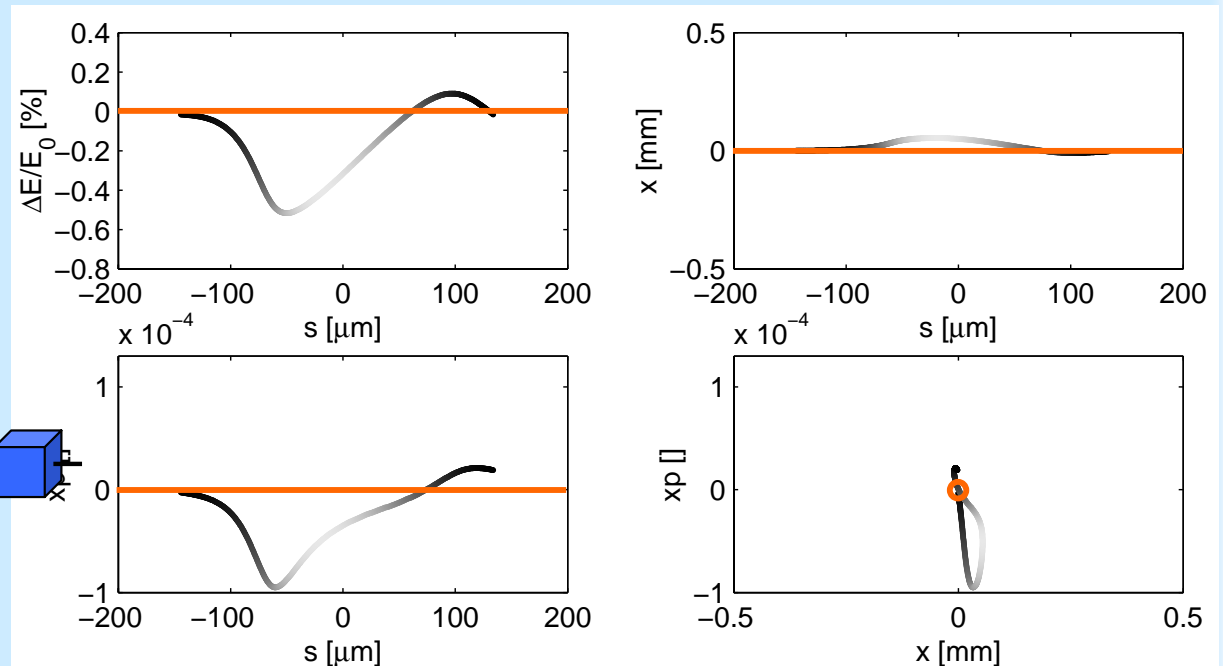
Achtung:
linearer Anteil der Energie-
verteilung wurde subtrahiert!

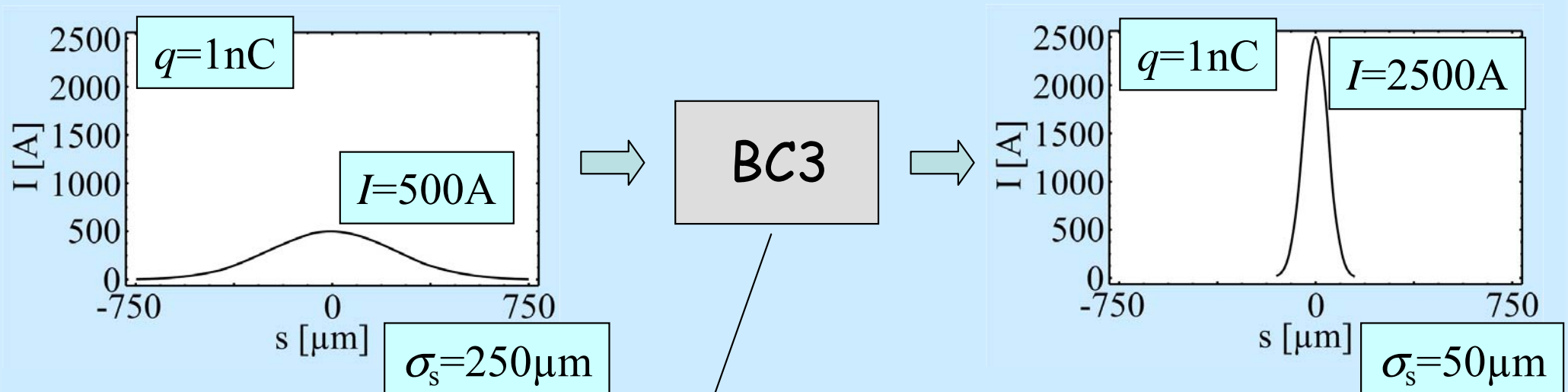
transversaler Phasenraum

- gleiche Länge
- gleicher Ablenkwinkel
- gleiche Kompression



S-Schikane





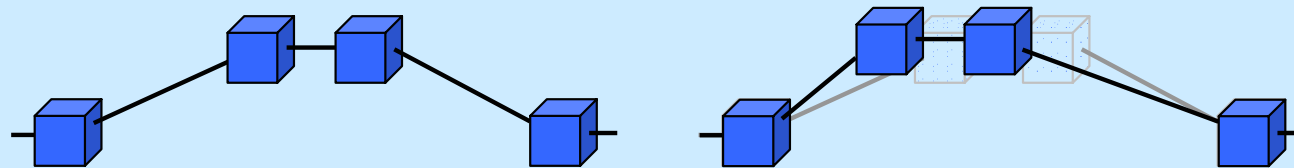
- nominell $R_{56} = -5 \text{ cm}$, aber flexibel $R_{56} = -2.5 \text{ cm}$ bis -10 cm d.h., der Ablenkwinkel muss um einen Faktor 2 variabel sein
- Länge der Schikane ist 14m

- Vergleich verschiedener Bunchkompressoren, Variation des R_{56} bei konstantem Kompressionsfaktor

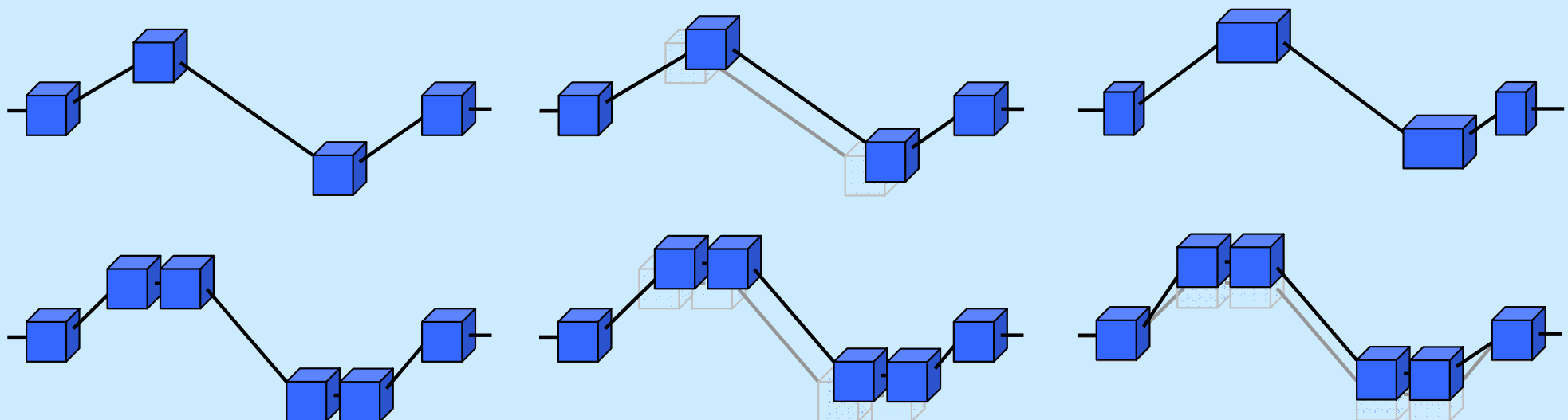
- Variation der Strahlladung bei konstantem Strom, Vergleich von zwei verschiedenen Bunchkompressoren

Im Folgenden werden unterschiedliche Schikanen verglichen:

C-Schikanen: symmetrisch und asymmetrisch

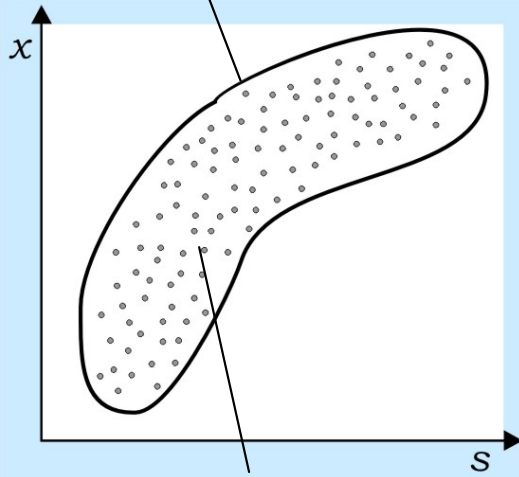


S-Schikanen: symmetrisch und asymmetrisch,
mit 4 Dipolmagneten und 6 Dipolmagneten

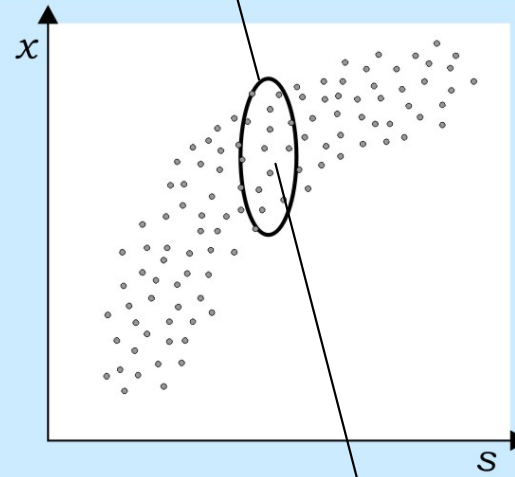


Vergleich verschiedener Bunchkompressoren für BC3

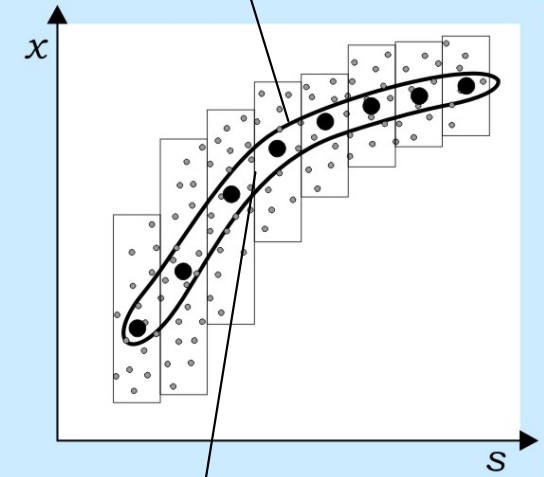
projizierte Emittanz



lokale Emittanz
Slice Emittanz

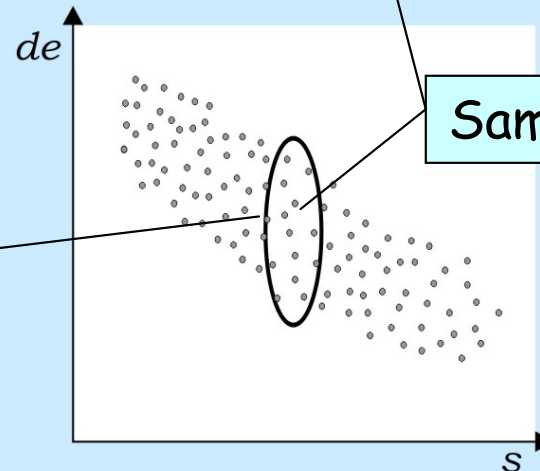


korrelierte Emittanz



Faltung von Sampling
und Generating Bunch

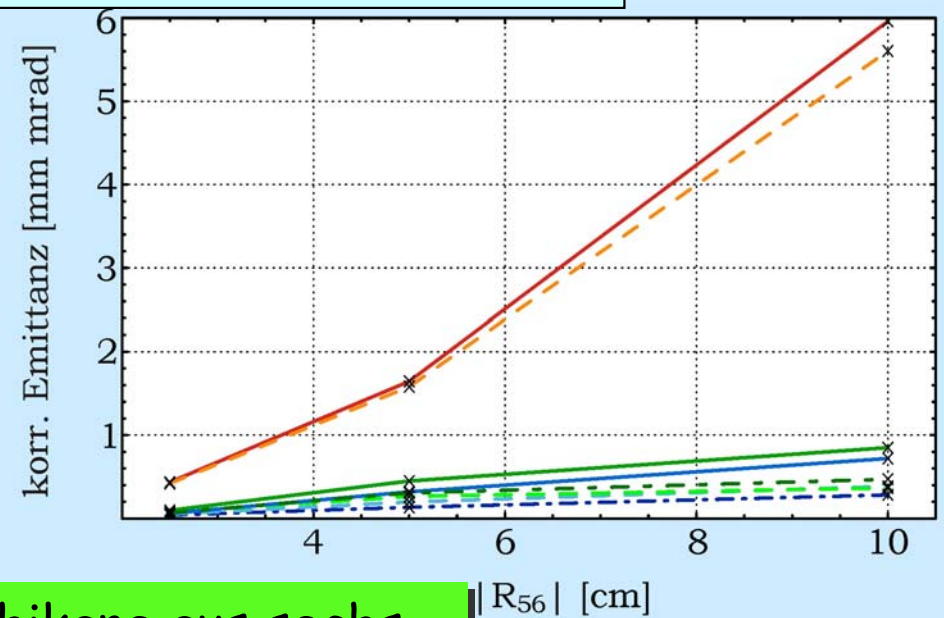
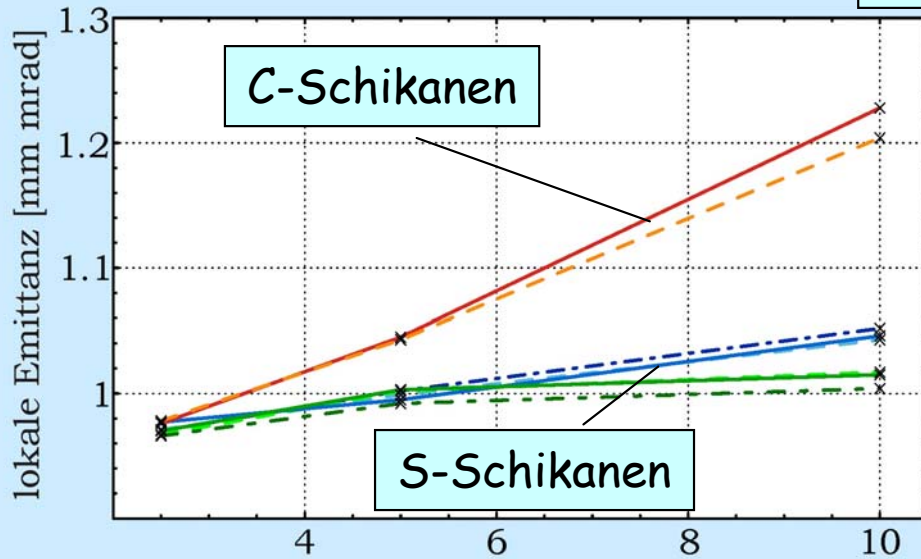
Generating Bunch



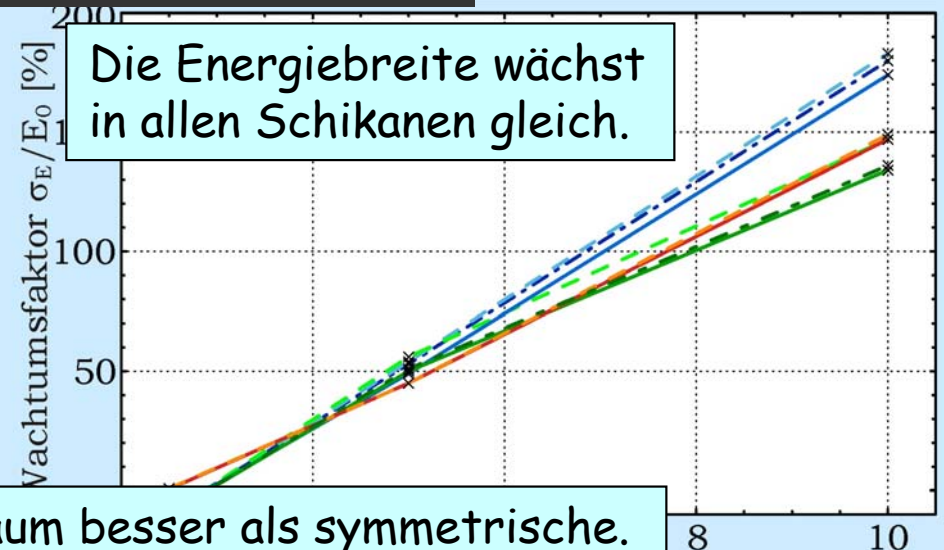
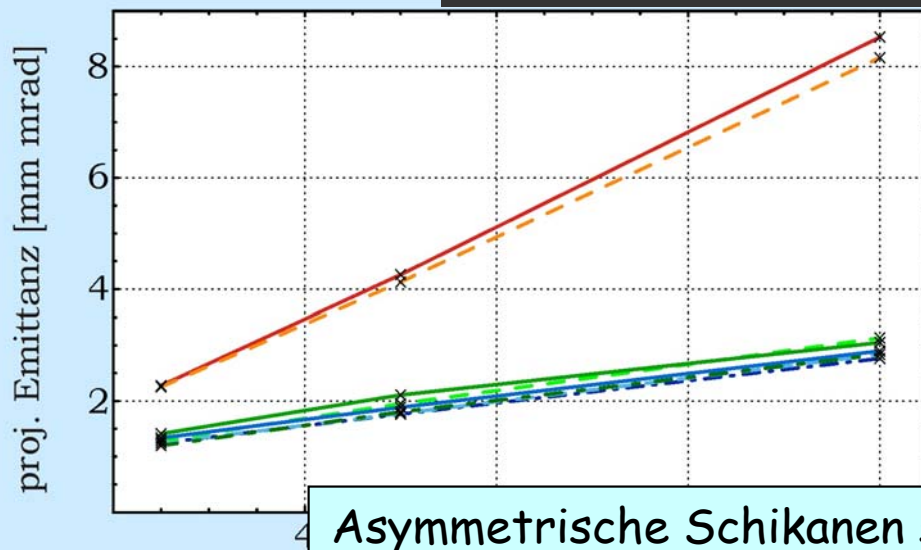
Sampling Bunch

lokale Energiebreite

Vergleich Die Emittanz wächst stärker in den Schikanen für BC3
C-Schikanen als in den S-Schikanen.



Eine symmetrische S-Schikane aus sechs Dipolmagneten ist eine gute Wahl für BC3!

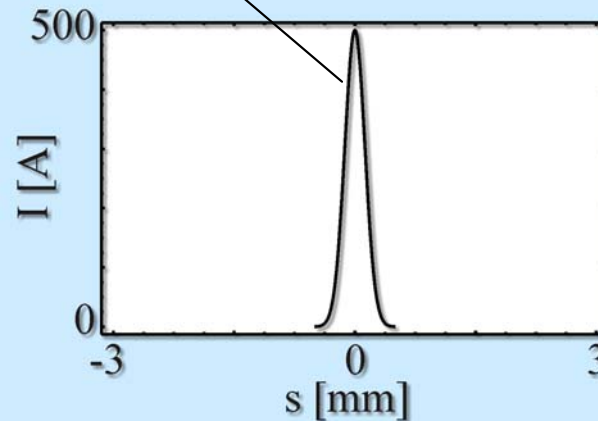


Asymmetrische Schikanen sind kaum besser als symmetrische. Auch 4-Dipol S-Schikanen und 6-Dipol S-Schikanen sind gleich.

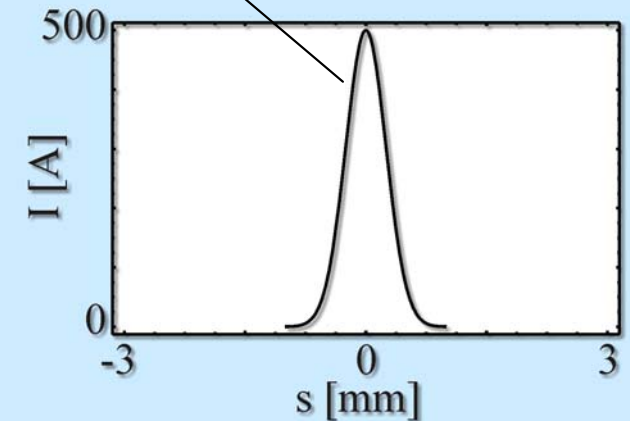
Vergleich der symmetrischen C-Schikane und der symmetrischen 6-Dipol S-Schikane bei verschiedenen Ladungen:

- gaußförmige Ladungsverteilung
- σ_s variiert mit der Ladung
- Spitzenstrom 500A \rightarrow 2500A
- Kompressionsfaktor $c_f = 5$
- transversale Verteilung gleich

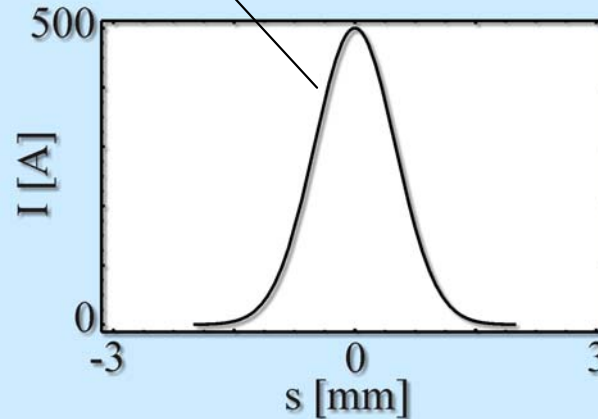
$q = 0.5 \text{ nC}, \sigma_s = 125 \mu\text{m}$



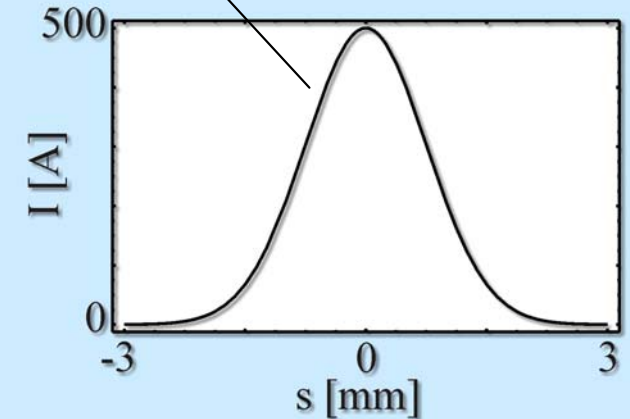
$q = 1 \text{ nC}, \sigma_s = 250 \mu\text{m}$



$q = 2 \text{ nC}, \sigma_s = 500 \mu\text{m}$



$q = 3 \text{ nC}, \sigma_s = 750 \mu\text{m}$



Es müssen zwei Fälle unterschieden werden:

Kompressionsfaktor:

$$c_f = \frac{\sigma_{s,i}}{\sigma_{s,f}} \approx \frac{1}{1 - R_{56} \frac{1}{E_0} \frac{dE}{ds}}$$

konstant!

Energiebreite:

$$\sigma_E \approx \frac{dE}{ds} \sigma_s$$

variiert!

- R_{56} konstant
- dE/ds konstant
- σ_E variiert
- R_{56} variiert
- dE/ds variiert
- σ_E konstant

$$P_{p.c.} \propto \frac{N_e^2 e_0^2}{R^{2/3} \sigma_s^{4/3}} \propto \frac{q^2 R_{56}^{1/3}}{\sigma_s^{4/3}}$$

- schwache Variation von $P_{p.c.}$
- stärkere Variation von $P_{p.c.}$

Ladungsvariation, festes R_{56} , festes dE/ds , variables σ_E

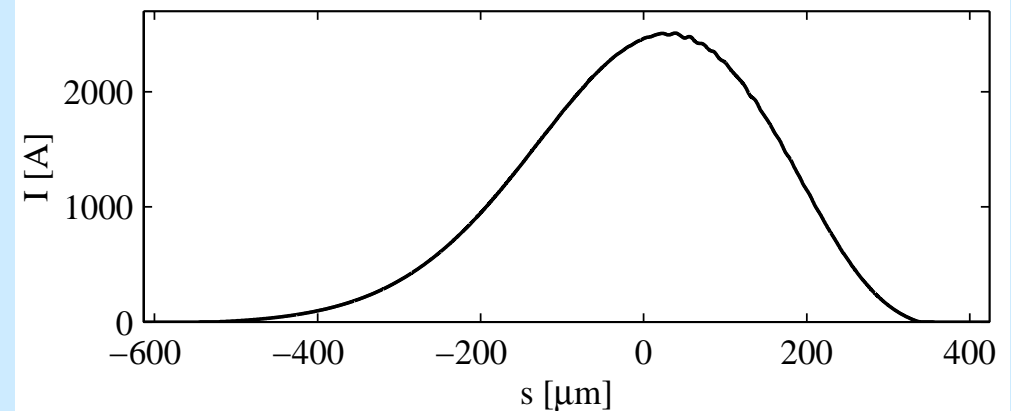
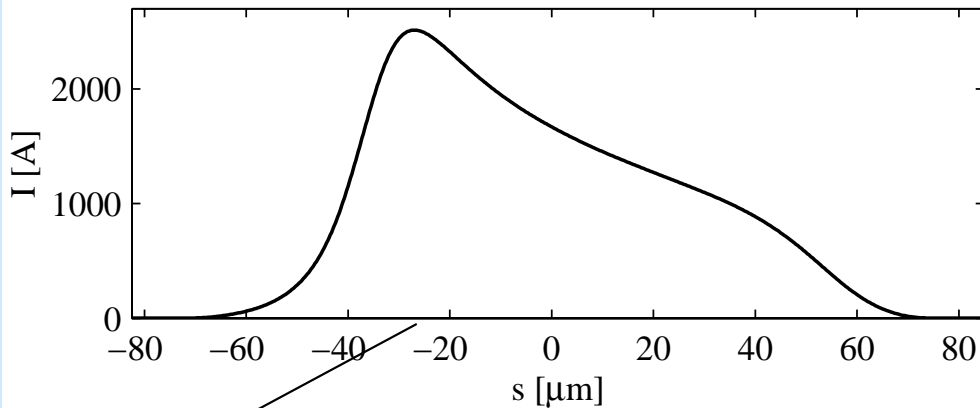
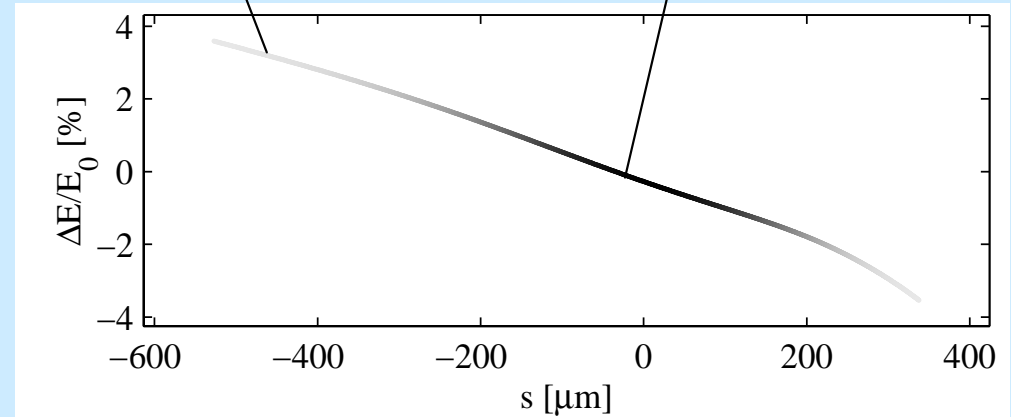
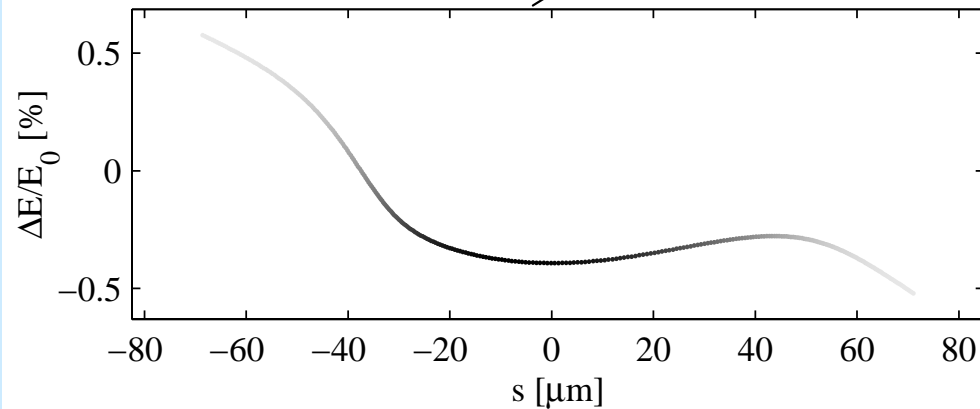
hell = kleine Ladung

dunkel = große Ladung

0.5nC

longitudinaler Phasenraum

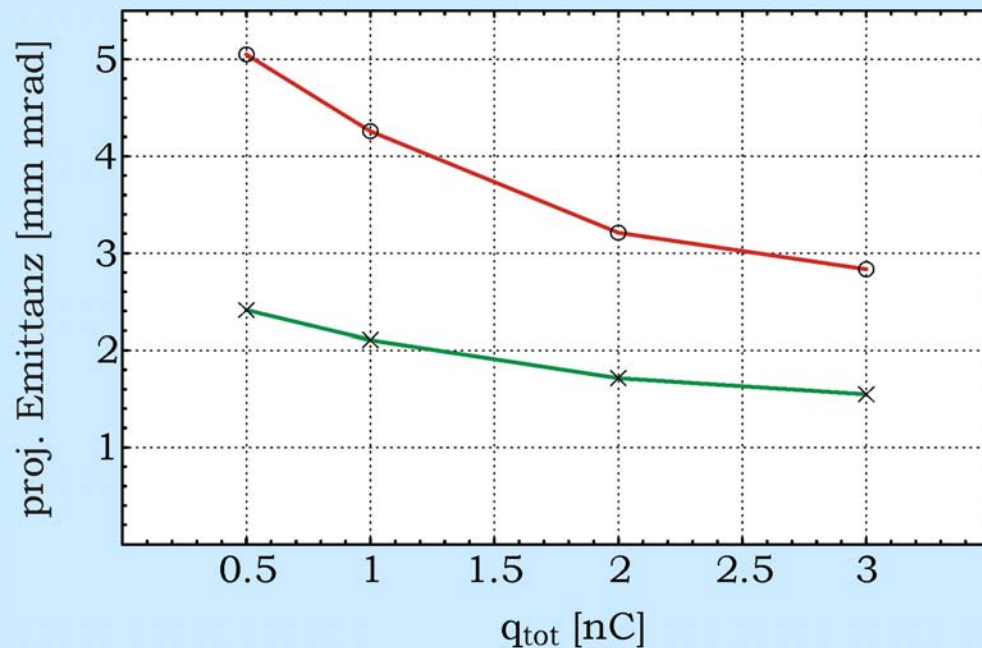
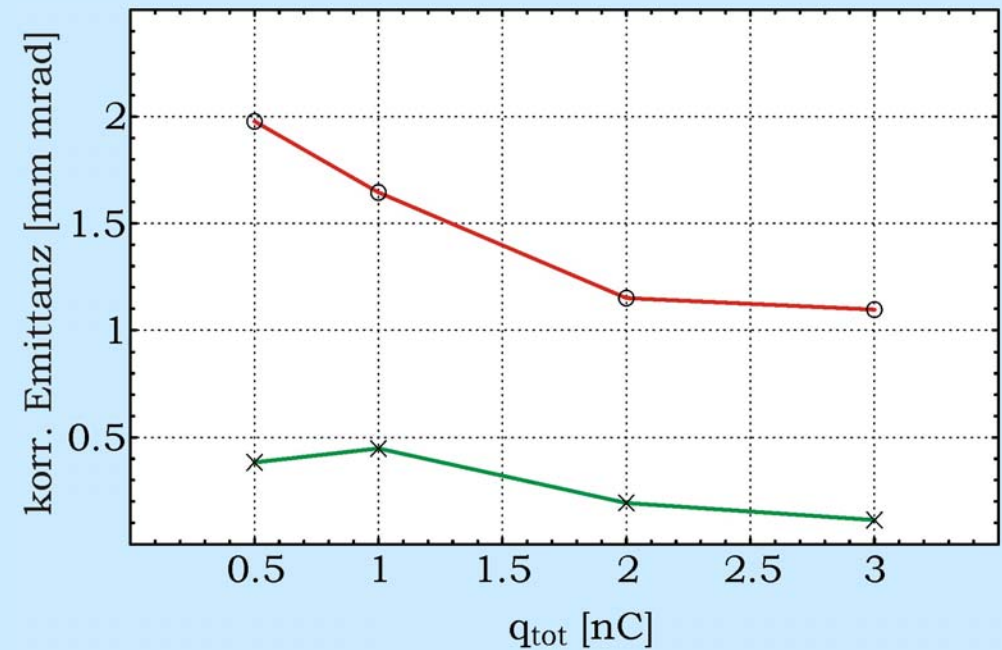
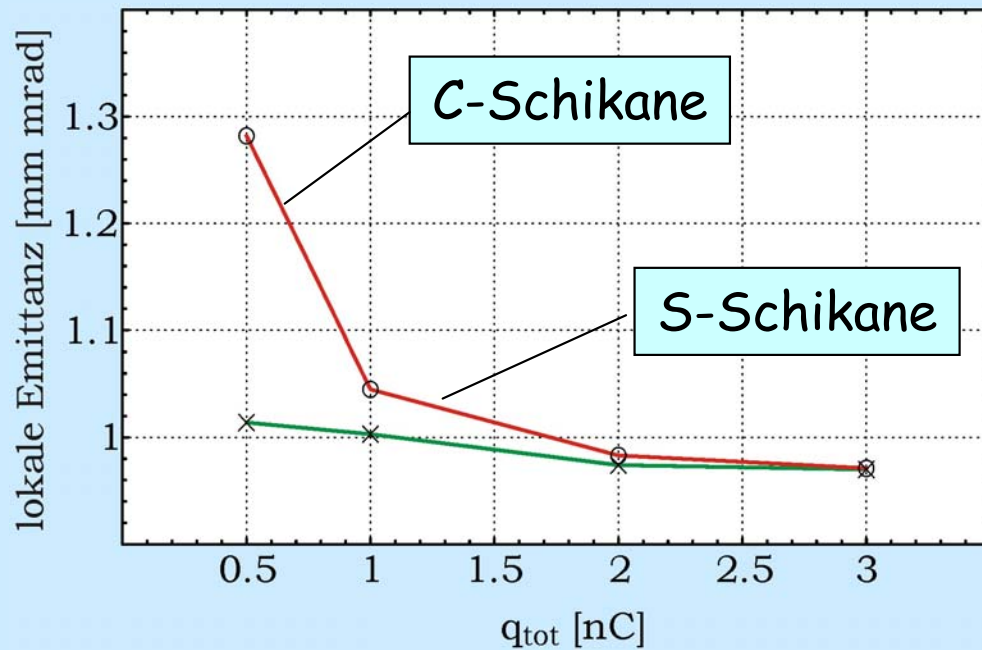
3nC



Stromprofil

Da mit Abnahme der Strahllänge auch die Energiebreite abnimmt, hat die Synchrotronstrahlung einen stärkeren Einfluß, obwohl die Strahlungsleistung sinkt.

Ladungsvariation, festes R_{56} , festes dE/ds , variables σ_E



Auch im transversalen Phasenraum verliert die Synchrotronstrahlung mit zunehmender Ladung an Einfluss.

Ladungsvariation, variables R_{56} , variables dE/ds , konstantes σ_E

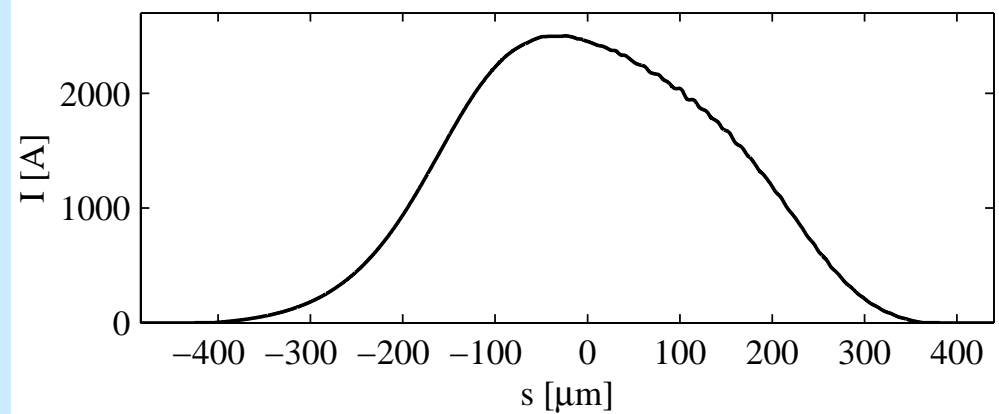
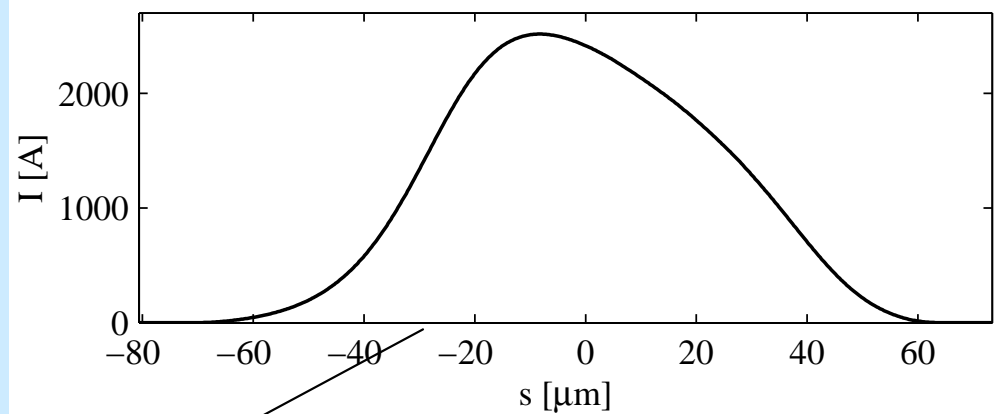
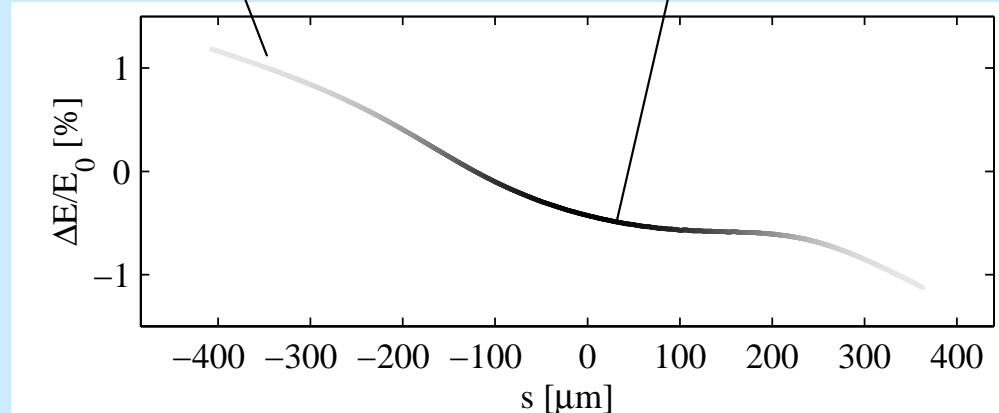
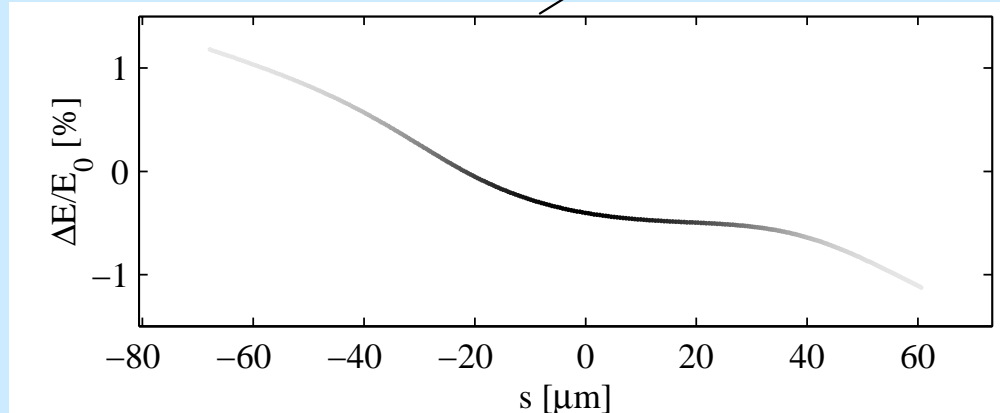
hell = kleine Ladung

dunkel = große Ladung

longitudinaler Phasenraum

0.5nC

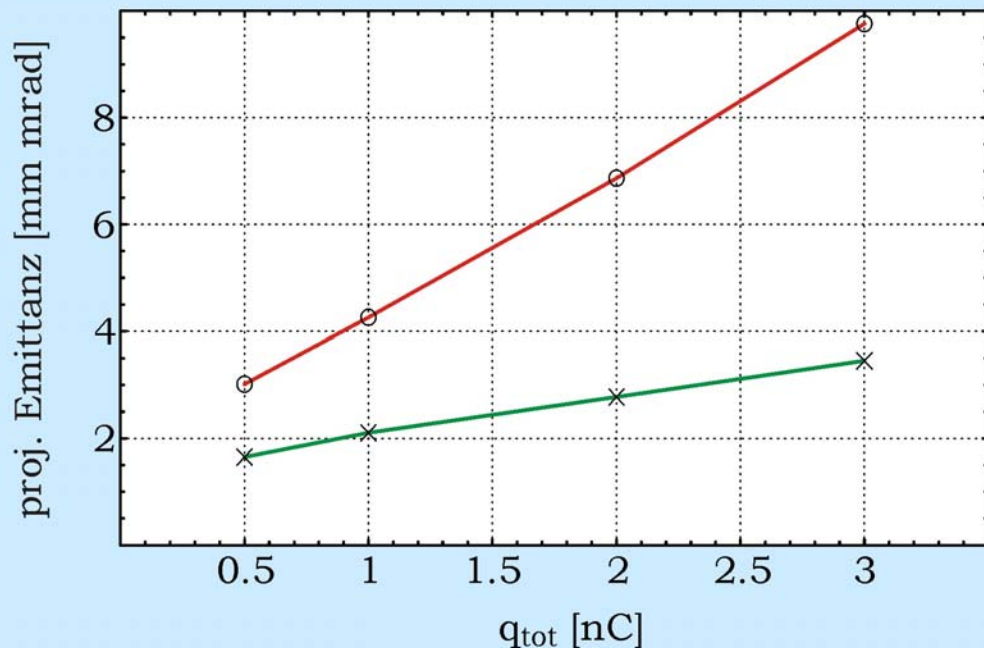
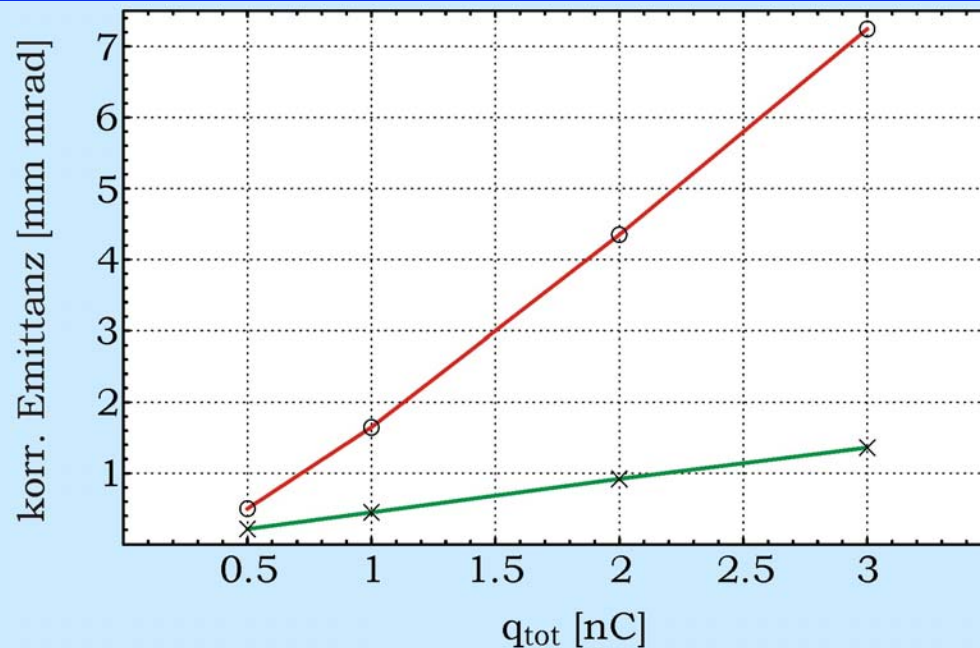
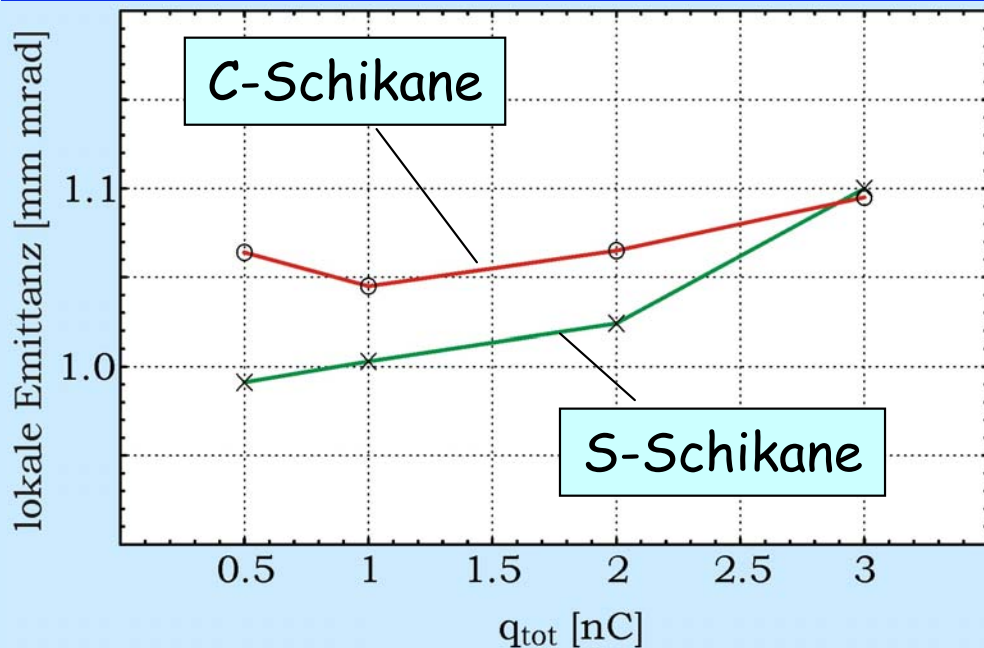
3nC



Stromprofil

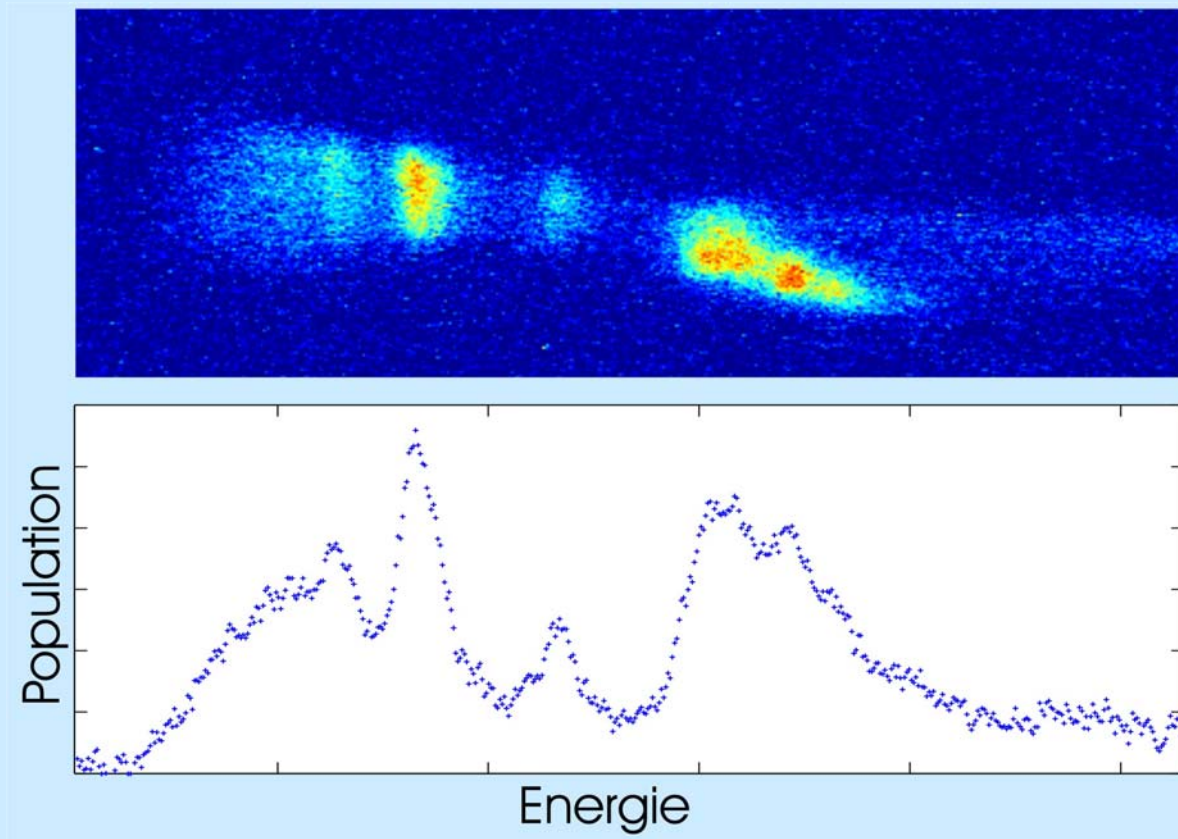
Profil und long. Phasenraum ändern sich kaum. Nur ihre Länge variiert.

Ladungsvariation, variables R_{56} , variables dE/ds , konstantes σ_E



Mit zunehmender Ladung wird R_{56} erhöht und die Synchrotronstrahlungsleistung steigt.

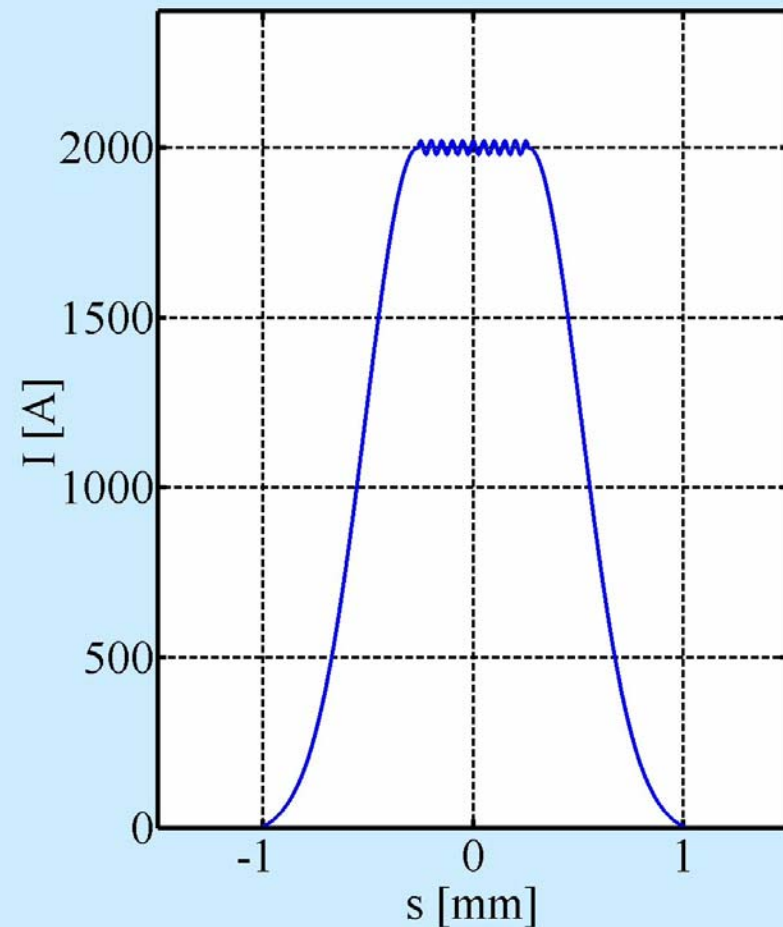
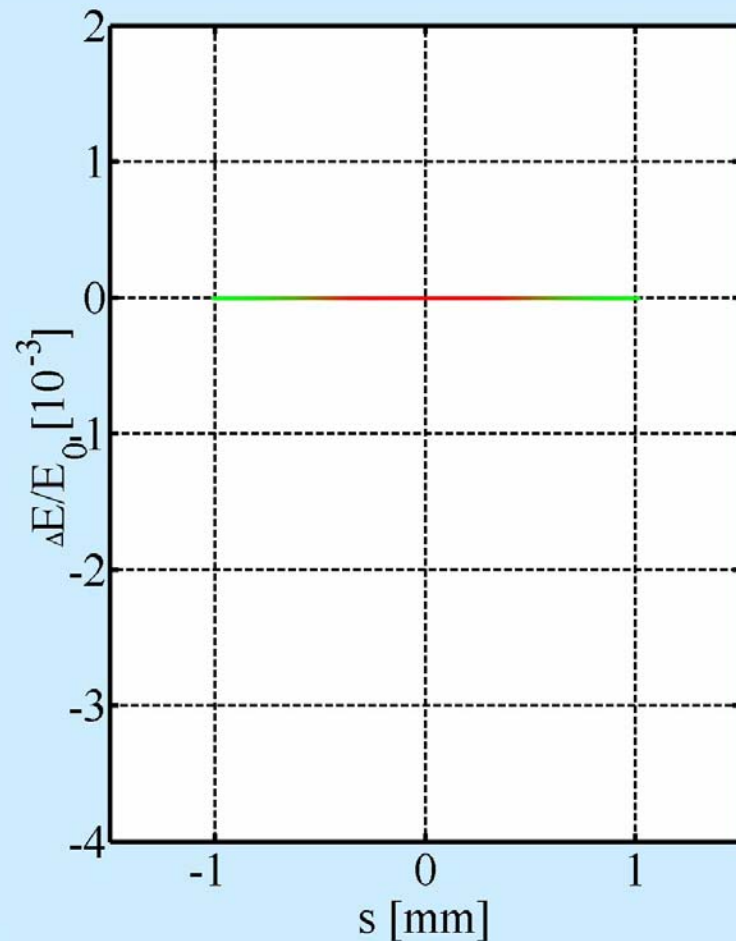
Entlang des Elektronenstrahls können die Energie und die Ladungsdichte fluktuieren.



Elektronenstrahl hinter dem Spektrometer bei TTF1

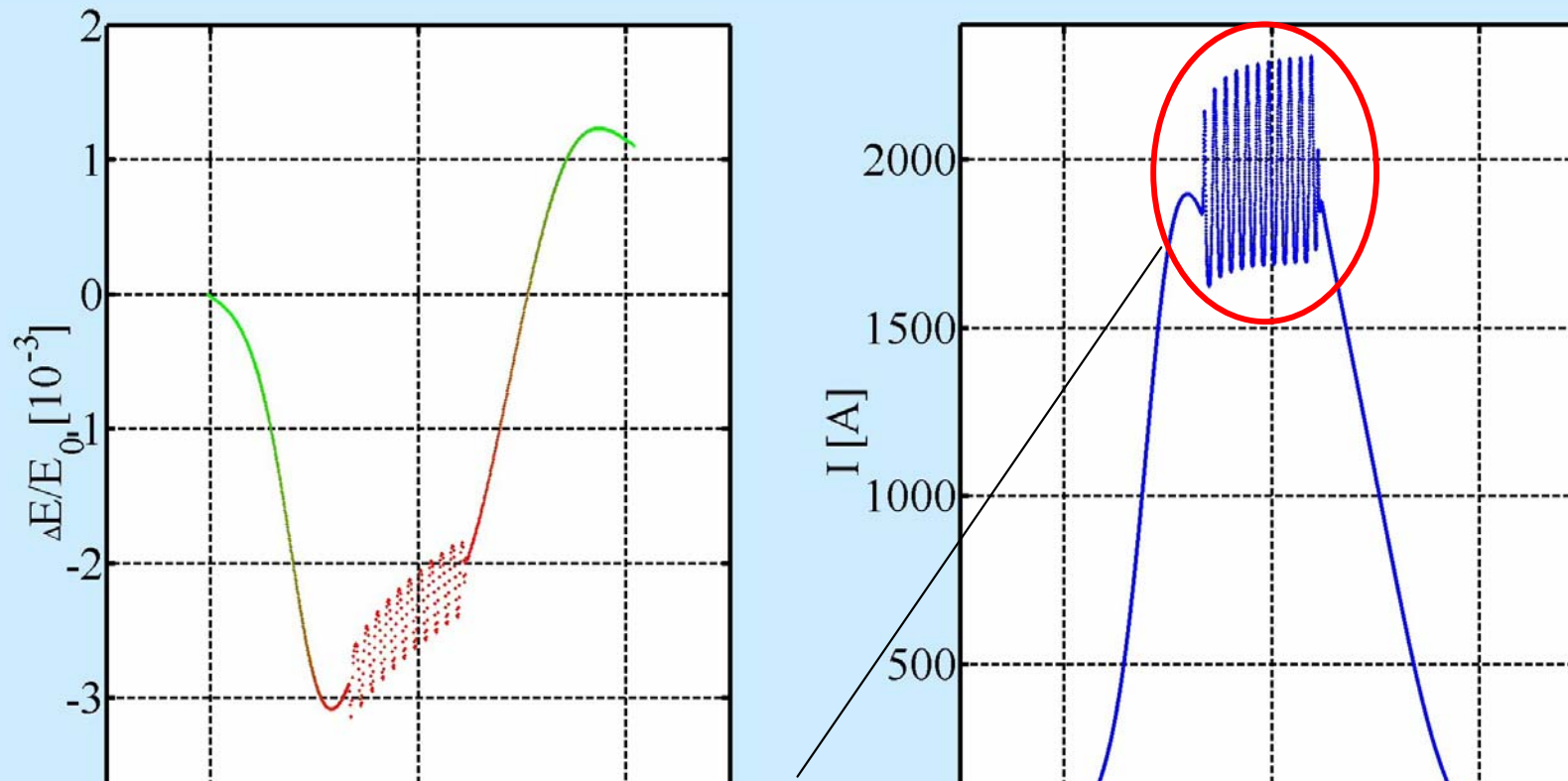
Kohärente Synchrotronstrahlung kann zu einer Verstärkung der Modulationen in der Ladungsdichte oder der Elektronenenergie führen.

- Ladungsdichtemodulationen erzeugen Energiemodulationen auf Grund von CSR
- Energiemodulationen erzeugen Dichtemodulationen auf Grund der Dispersion

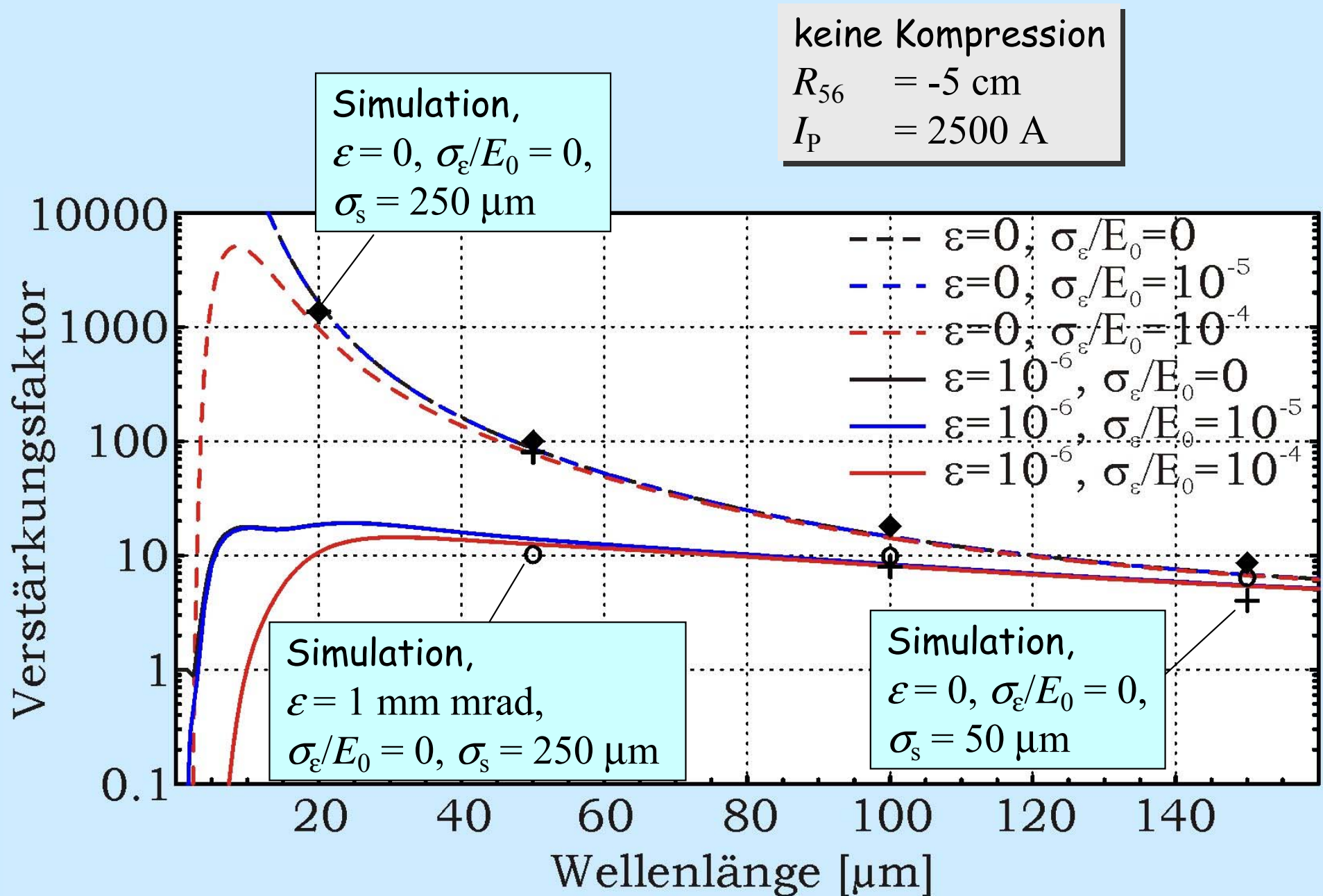


kohärente Synchrotronstrahlung kann zu einer Verstärkung der Modulationen in der Ladungsdichte oder der Elektronenenergie führen.

- Ladungsdichtemodulationen erzeugen Energiemodulationen auf Grund von CSR
- Energiemodulationen erzeugen Dichtemodulationen auf Grund der Dispersion



Der Verstärkungsfaktor lässt sich mit Hilfe von Simulationen bestimmen oder mit einer Integralgleichung numerisch berechnen.

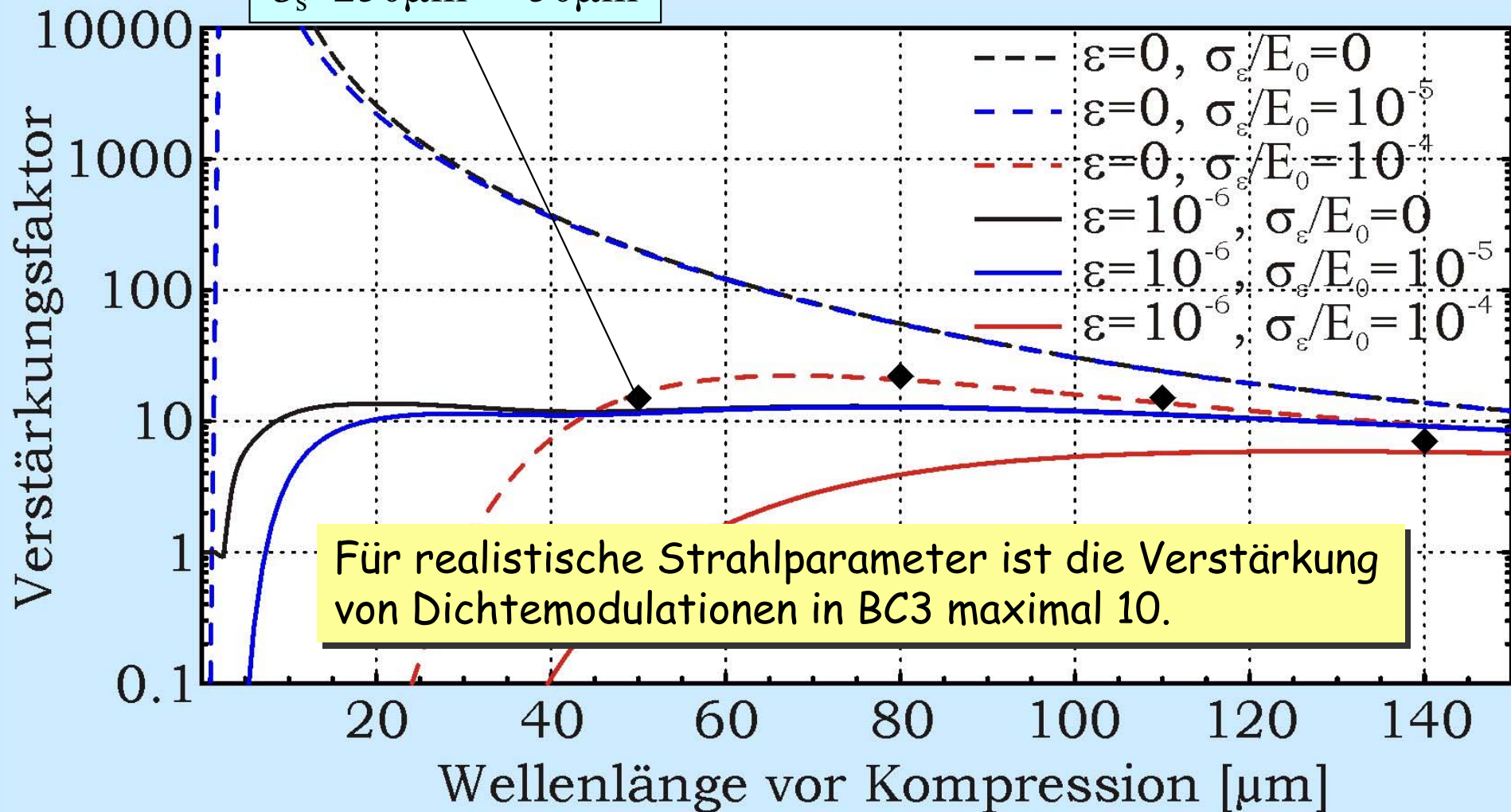


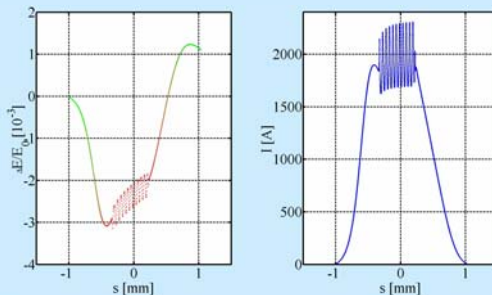
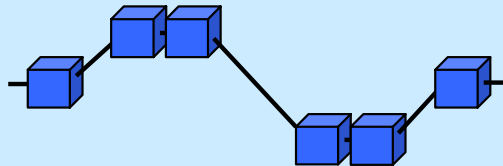
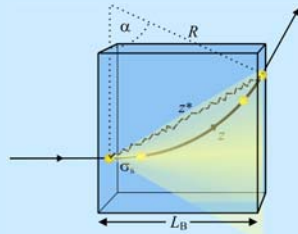
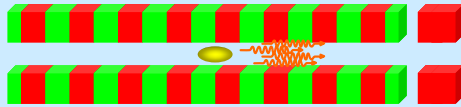
mit Kompression

$$R_{56} = -5 \text{ cm}$$

$$I_P = 500 \text{ A} \rightarrow 2500 \text{ A}$$

Simulation,
 $\varepsilon = 0, \sigma_\varepsilon/E_0 = 10^{-4}$
 $\sigma_s = 250 \mu\text{m} \rightarrow 50 \mu\text{m}$





- der VUV-FEL kann laserartige Röntgenstrahlung mit $\lambda_L=6\text{nm}$ erzeugen
- die Elektronenstrahlen werden in Magnet-schikanen komprimiert und erzeugen dabei kohärente Synchrotronstrahlung
- in einer symmetrischen S-Schikane aus sechs Dipolen ist das induzierte Emittanzwachstum klein, sie ist eine gute Wahl für BC3
- CSR führt zu einer Verstärkung von Dichte- und Energiemodulationen, in BC3 werden Dichtemodulationen um bis zu eine Größenordnung verstärkt