

SwissFEL Injektor Testanlage

Komponenten und strahldynamische Konzepte

- **Übersicht SwissFEL Injektor Testanlage**
 - **Systeme und Komponenten**
 - **Diagnostik, Messungen**
- **Strahldynamik für Fussgänger**
 - **Die wichtigsten Konzepte**
 - **Emittanzmessung**

...das nötigste, um die Messungen morgen zu verstehen.

Anforderungen eines FEL

- Elektronen
- Fokussierung („Optik“)
- Lokalisierung („Orbit“)
- Energie
- Spitzenstrom
- Kleine Emittanz/Strahlgrösse

Anforderungen eines FEL

Anforderung	Umsetzung bei SwissFEL (Testinjektor)	Messung/Verifizierung bei SwissFEL (Testinjektor)
Elektronen	Laser-Elektronenkanone (Photokathode + HF-Kavität)	z.B. Wall Current Monitor
Fokussierung (Optik)	Quadrupolmagnete	Schirmmonitor
Lokalisierung (Orbit)	Steuer magnete (Dipole)	Strahllagemonitor (BPM)
Energie	Hochfrequenzkavitäten (3 GHz = S-Band)	Spektrometer (Dipolmagnet)
Spitzenstrom	<ul style="list-style-type: none"> • Laserpulsform • Magnet-Schikane (Bunch-Kompressor) 	Strahlprofilmessung durch Hochfrequenzdeflektor und Schirmmonitor
Emittanz/Strahlgrösse	<ul style="list-style-type: none"> • Design Elektronenkanone • „Emittanzkompensation“ 	<ul style="list-style-type: none"> • „Pepperpot“/Schlitze (niedrige Energien) • Strahloptische Methoden (höhere Energien)

Anforderungen eines FEL

Anforderung	Umsetzung bei SwissFEL (Testinjektor)	Messung/Verifizierung bei SwissFEL (Testinjektor)
Elektronen	Laser-Elektronenkanone (Photokathode + HF-Kavität)	z.B. Wall Current Monitor
Fokussierung (Optik)	Quadrupolmagnete	Schirmmonitor
Lokalisierung (Orbit)	Steuer magnete (Dipole)	Strahllagemonitor (BPM)
Energie	Hochfrequenzkavitäten (3 GHz = S-Band)	Spektrometer (Dipolmagnet)
Spitzenstrom	<ul style="list-style-type: none"> • Laserpulsform • Magnet-Schikane (Bunch-Kompressor) 	Strahlprofilmessung durch Hochfrequenzdeflektor und Schirmmonitor
Emittanz/Strahlgrösse	<ul style="list-style-type: none"> • Design Elektronenkanone • „Emittanzkompensation“ 	<ul style="list-style-type: none"> • „Pepperpot“/Schlitze (niedrige Energien) • Strahloptische Methoden (höhere Energien)

Messungen morgen

- **Gun setup:**
 - Betriebsphase (Schottky-Scan)
 - Energie (Spektrometer)
- **Orbit steering (one-to-one)**
- **Endenergie**
- **Emittanz (Quadrupol-Scan)**
- **Bunch-Länge, Slice-Emittanz***

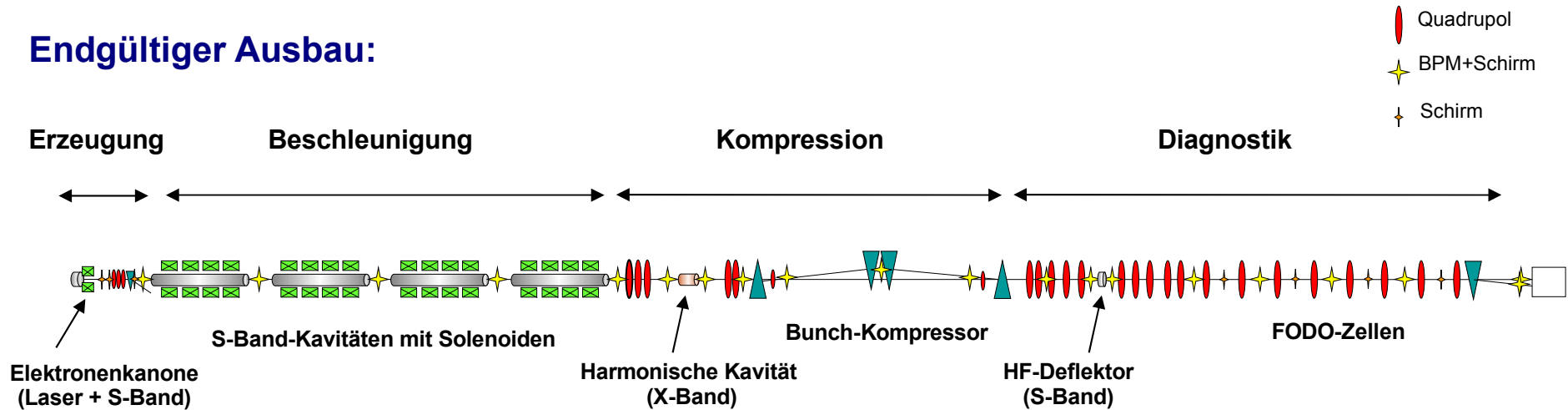
* falls Zeit erlaubt

Teil I

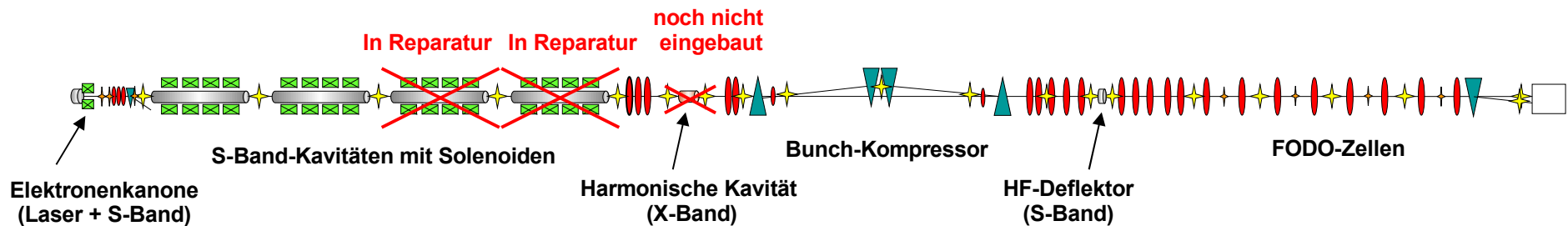
Übersicht SwissFEL Injektor Testanlage

SwissFEL Injektor Testanlage

Endgültiger Ausbau:

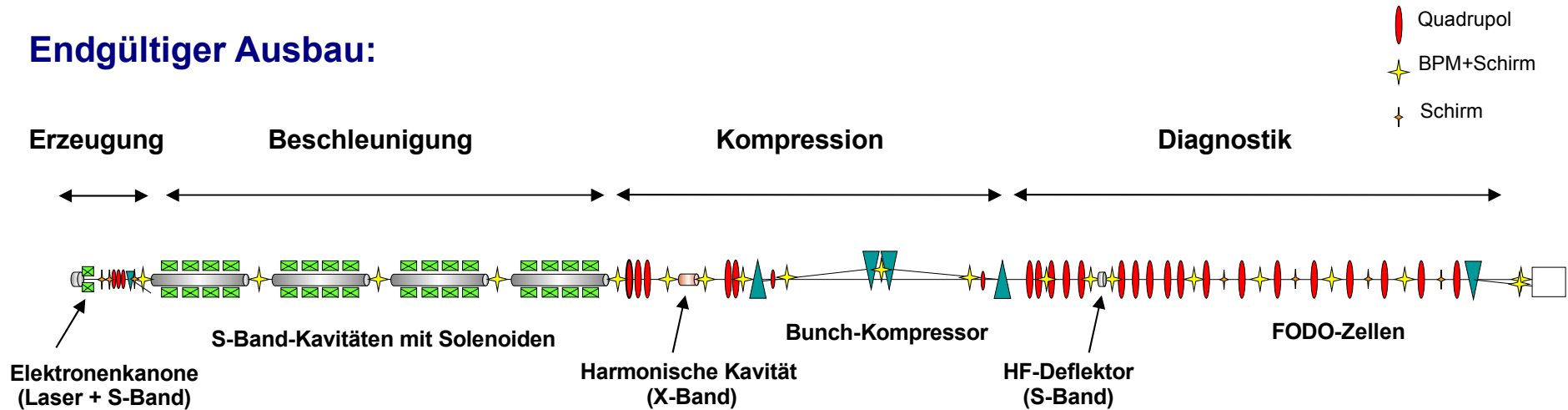


Momentane Situation:

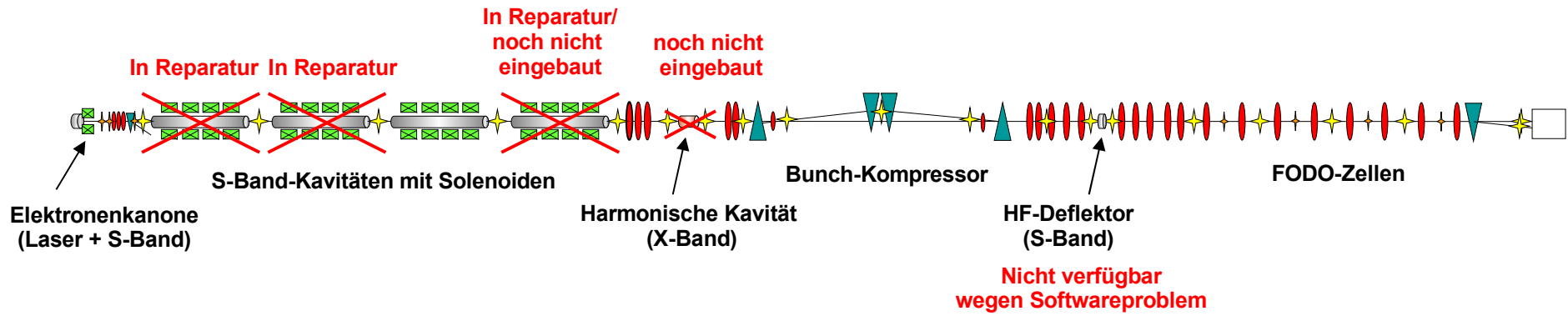


SwissFEL Injektor Testanlage

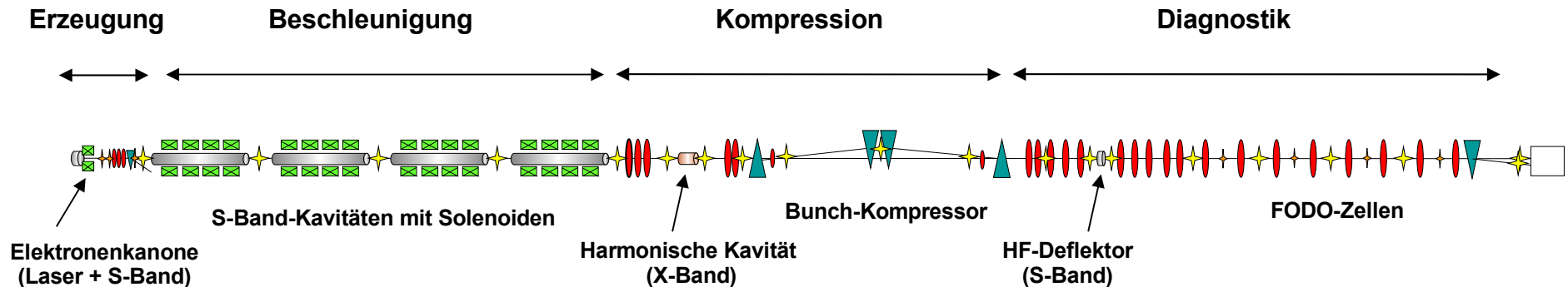
Endgültiger Ausbau:



Situation vor einem Jahr (Praktikum 2011):



Grundkonzept und Schlüsselkomponenten



Der SwissFEL Injektor ist ein **zweigeteilter Photoinjektor mit anschliessendem Bunch-Kompressor:**

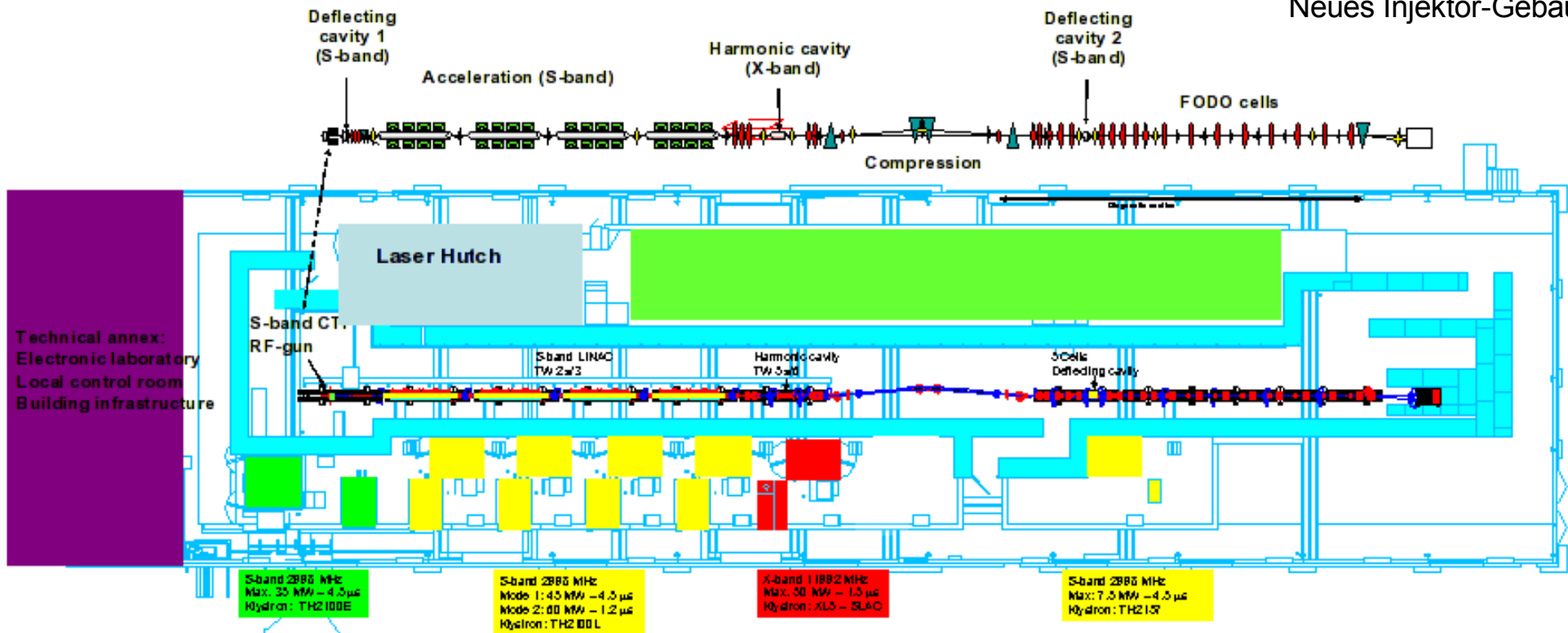
- **Zweigeteilter Photoinjektor:** 2.5-Zellen S-Band Kanone getrennt vom S-Band Booster durch ca. 3 m Drift (S-Band = 3 GHz).
- Die Drift erlaubt die Korrektur von Raumladungseffekten durch magnetische Fokussierung („**Emittanzkompensation**“)
- Der Elektronenpuls wird durch einen **10 ps UV-Laserpuls** aus einer Kupferkathode herausgelöst (photo-elektrischer Effekt). Bei noch kürzeren Pulsen würden die Raumladungseffekte zu stark.
- Mit dem **Bunch-Kompressor** gelingt es, trotzdem noch kürzere Elektronenpulse zu erreichen (0.03–0.2 ps, je nach Ladung). Wegen der Raumladung muss dies bei relativ hoher Energie geschehen.
- Eine harmonische Kavität (X-Band = 12 GHz) vor dem Bunch-Kompressor gibt dem Elektronenpuls das nötige Längsprofil für eine optimale Kompression („**Linearisierung**“).

SwissFEL Injektor Testanlage

- Elektronenkanone und erste Beschleunigersektion („erste ~60 m von SwissFEL“).
- Test von Komponenten und Prozeduren im Hinblick auf SwissFEL.
- Die Anlage wird später zum definitiven SwissFEL Tunnel transferiert.



Neues Injektor-Gebäude



SwissFEL Injektor Testanlage

Besuch heute nachmittag!
(15:30 – 16:30)

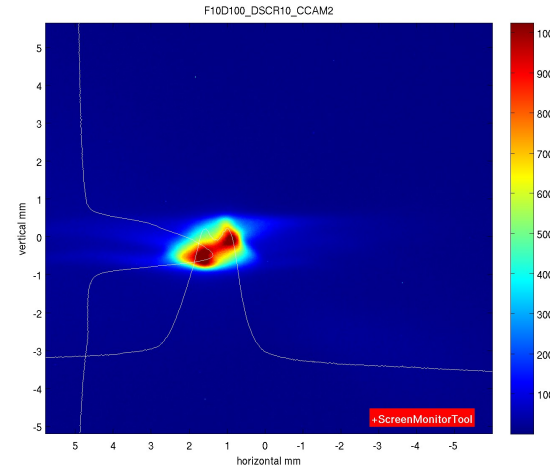


Feierliche Einweihung (24. August 2010)

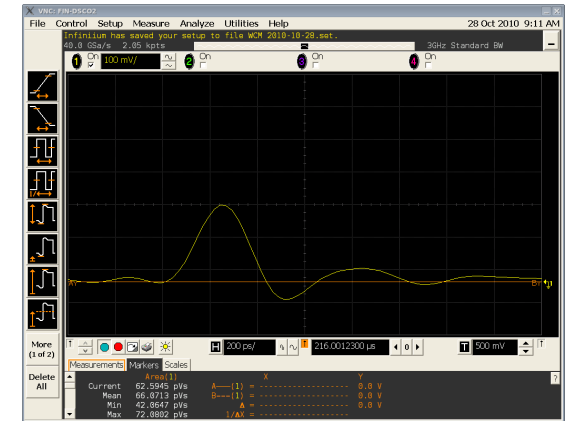
Bundesrat Didier Burkhalter am Drücker.



Knopf verbunden mit Laser-Verschluss. Nach Betätigung öffnet sich der Laser-Verschluss, Laserlicht trifft auf die Kathode und löst Elektronen heraus (Photoeffekt), welche dann sofort beschleunigt werden.



Strahl auf einem Schirm am Ende der Strahllinie.



Ladungsimpuls nach der Elektronenkanone.



Besuch im Injektor-Tunnel.

SwissFEL Injektor Testanlage

Systeme / Komponenten

Anforderungen eines FEL

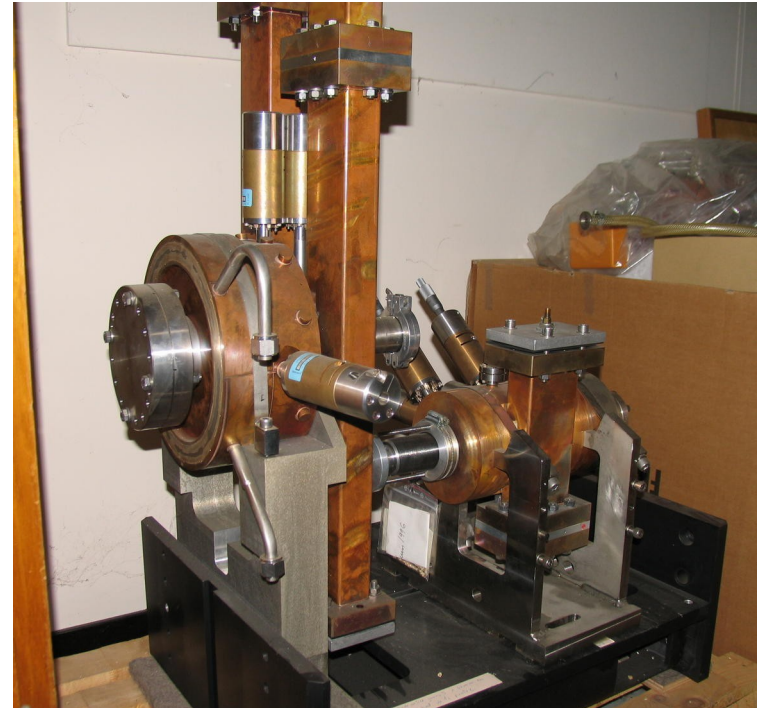
Anforderung	Umsetzung bei SwissFEL (Testinjektor)	Messung/Verifizierung bei SwissFEL (Testinjektor)
Elektronen	Laser-Elektronenkanone (Photokathode + HF-Kavität)	z.B. Wall Current Monitor
Fokussierung (Optik)	Quadrupolmagnete	Schirmmonitor
Lokalisierung (Orbit)	Steuer magnete (Dipole)	Strahllagemonitor (BPM)
Energie	Hochfrequenzkavitäten (3 GHz = S-Band)	Spektrometer (Dipolmagnet)
Spitzenstrom	<ul style="list-style-type: none"> • Laserpulsform • Magnet-Schikane (Bunch-Kompressor) 	Strahlprofilmessung durch Hochfrequenzdeflektor und Schirmmonitor
Emittanz/Strahlgrösse	<ul style="list-style-type: none"> • Design Elektronenkanone • „Emittanzkompensation“ 	<ul style="list-style-type: none"> • „Pepperpot“/Schlitze (niedrige Energien) • Strahloptische Methoden (höhere Energien)

Elektronenkanone

- Ausrangierte CERN-Kanone „CTF3 Gun Nr. V“ (CLIC Test Facility)
- Kurzfristiger Ersatz für sog. „Low-Emittance Gun“ (LEG), welche die Erwartungen nicht erfüllen konnte.
- Neue Kupferkathode vom PSI.
- Neue PSI-Kanone (basierend auf LCLS Design) ist in Produktion, Einbau 2013.



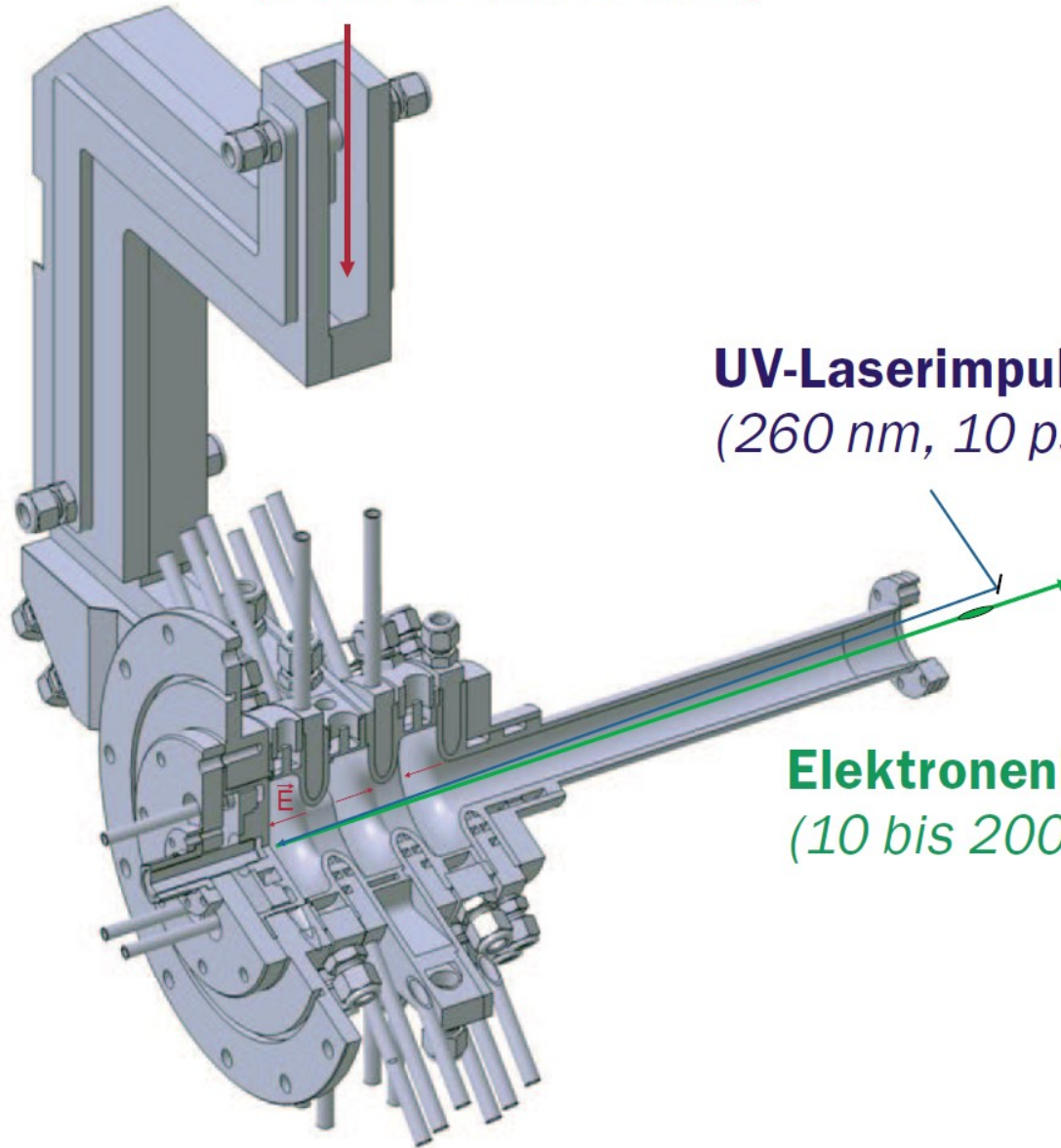
Neue Kupferkathode (PSI)



CTF3 Gun Nr. 5 kurz nach der Ankunft am PSI

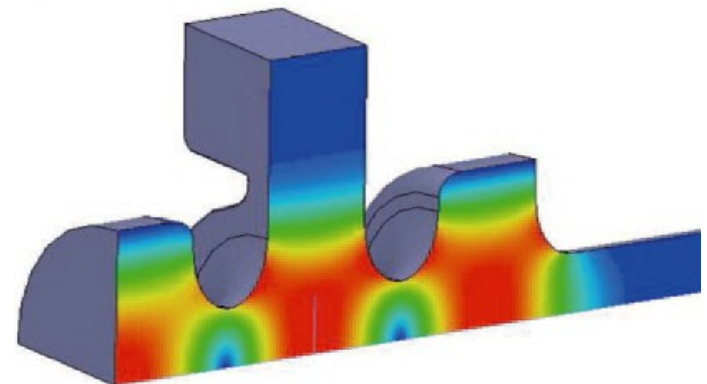
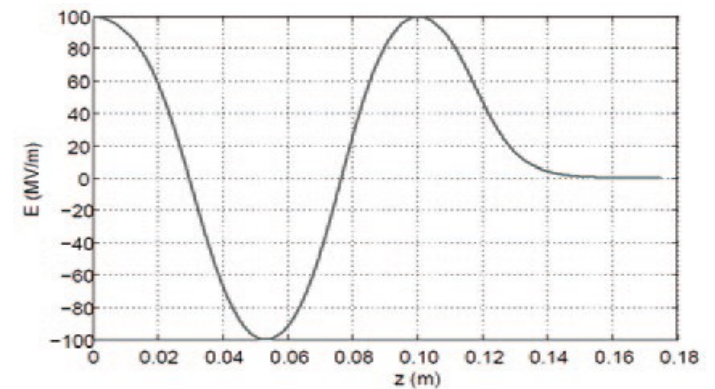
Neue PSI-Kanone (in Fertigung)

Mikrowellen
(3 GHz, 2 μ s, 23 MW)

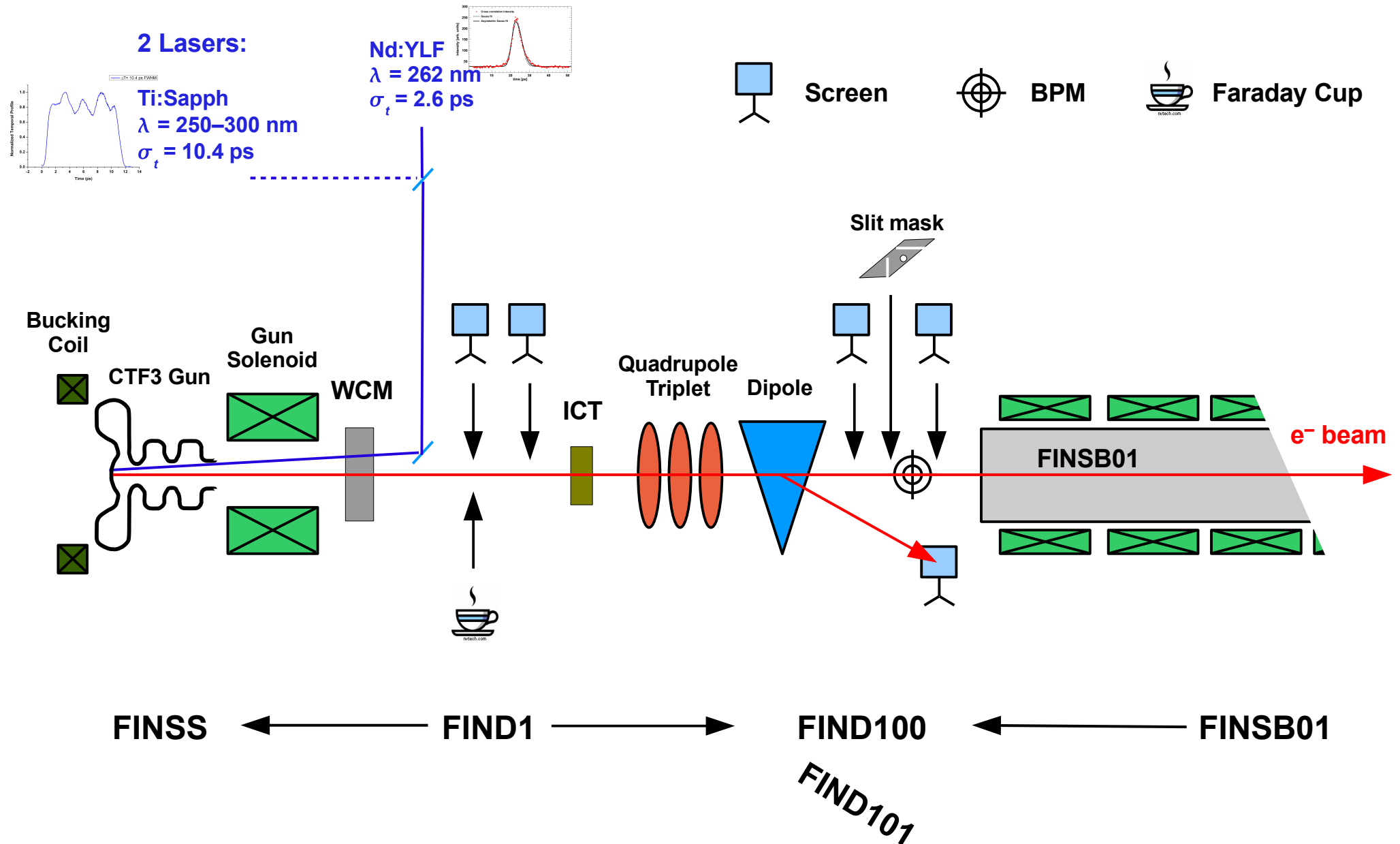


UV-Laserimpuls
(260 nm, 10 ps)

Elektronenbündel
(10 bis 200 pC)

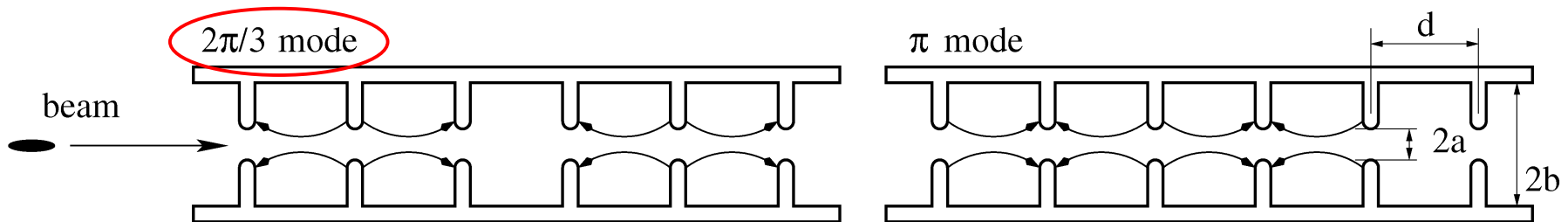
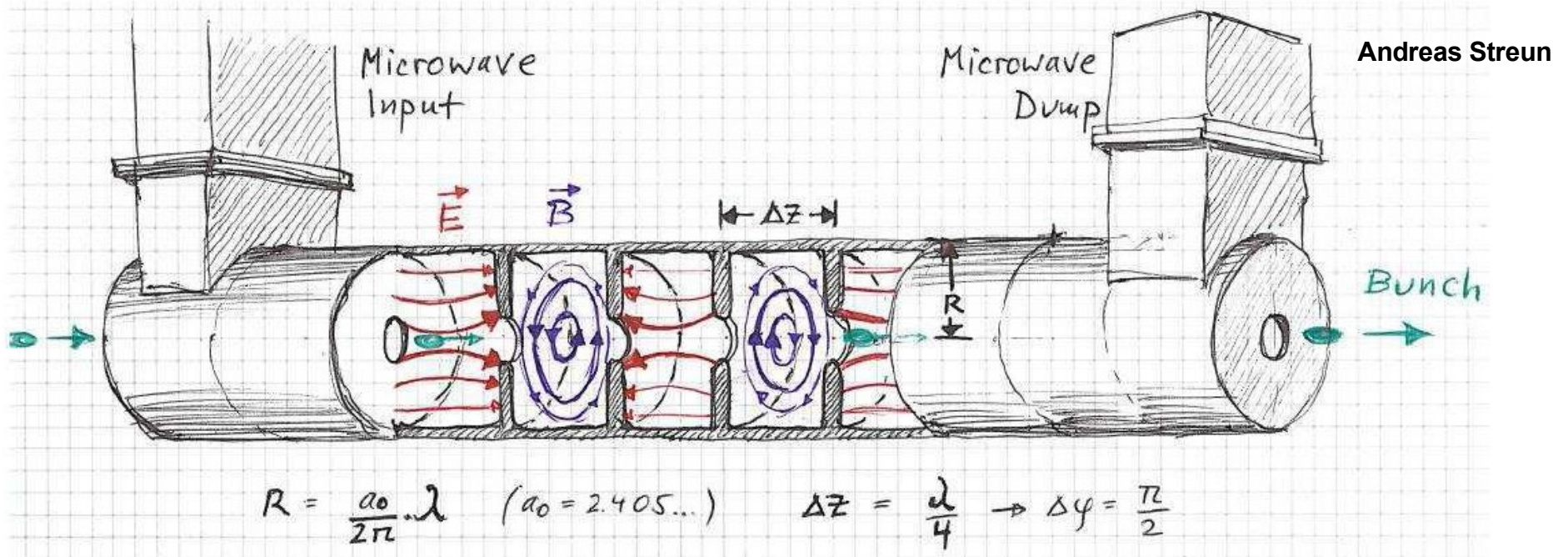


Instrumentierung im Bereich der Gun



Hochfrequenz-Kavitäten

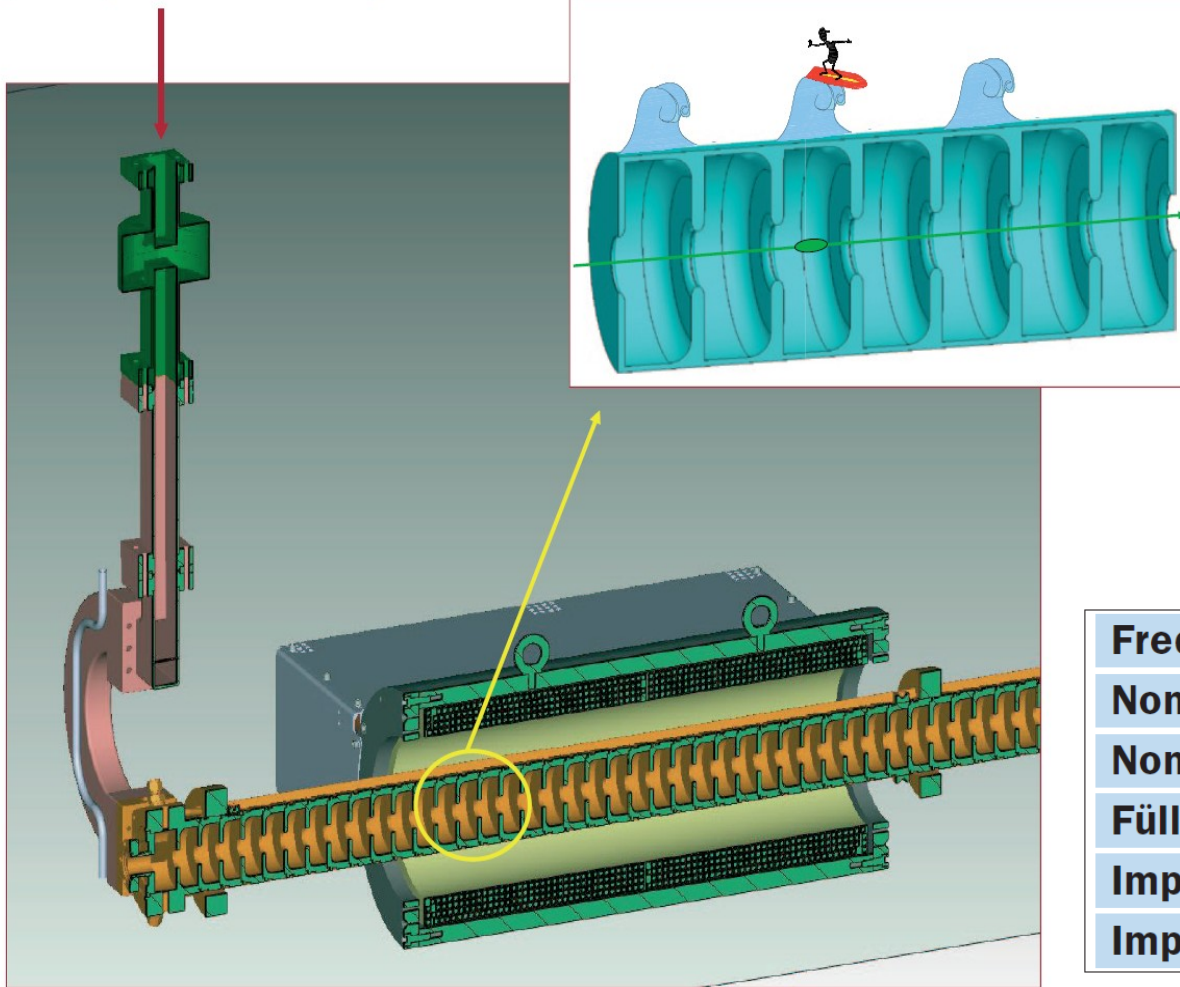
- Wellenleiter mit Iris-Bestückung (Reduktion der Phasengeschwindigkeit)
- Eine Wanderwelle („travelling wave“) wird durch die Struktur geschickt, der Elektronenbunch wird durch die Welle stetig beschleunigt.



HF Kavitäten im SwissFEL Injektor

Mikrowellen

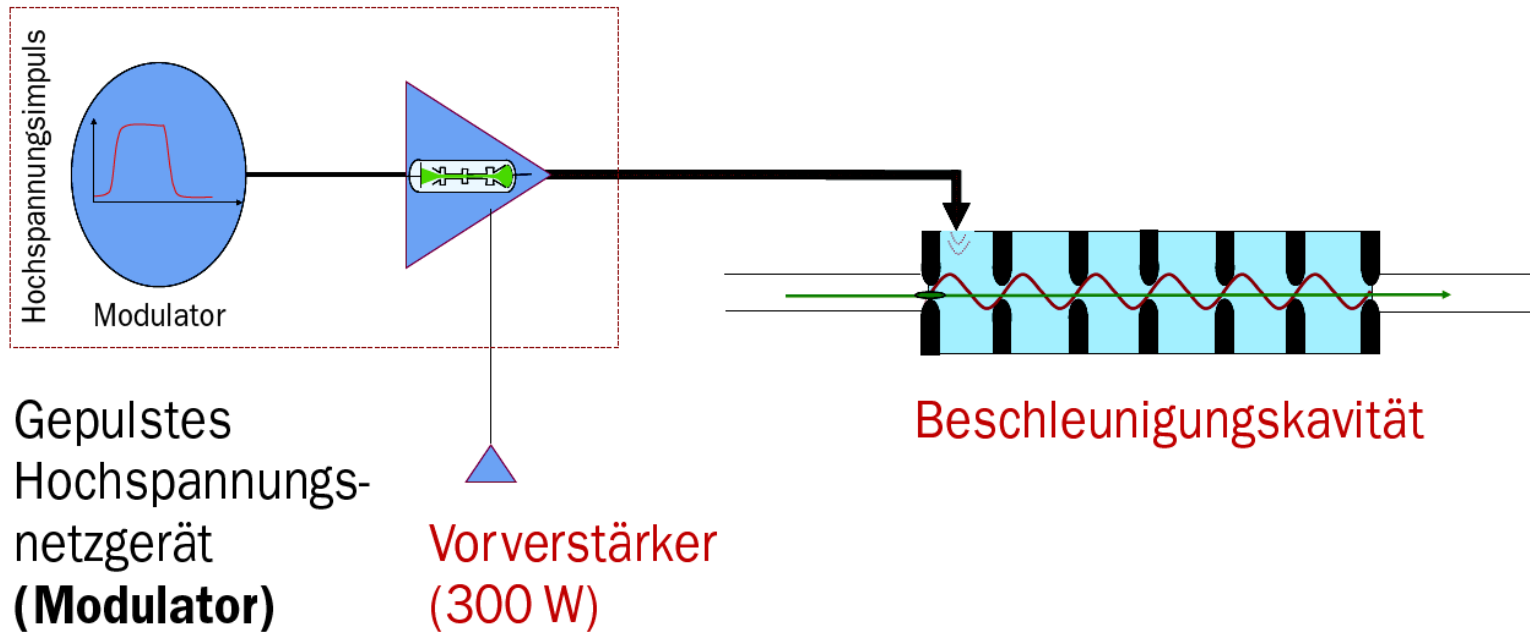
(1.5 μ s, 36.5 MW)



Frequenz	3 GHz
Nominaler Gradient	20 MV/m
Nominale HF-Leistung	36.5 MW
Füllzeit	0.9 μs
Impulsfrequenz	100 Hz
Impulslänge	3 μs

Woher kommt die HF-Leistung?

Mikrowellen **Klystron**
Verstärker (3 GHz)

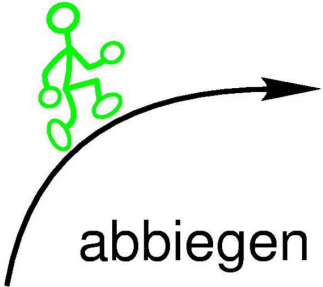
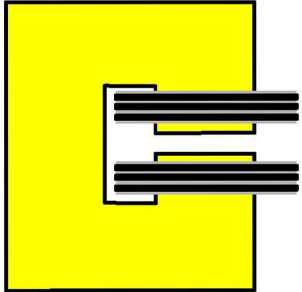


Klystron Spannung	350 kV	} Modulator-Parameter
Klystron Strom	300 A	
HF-Frequenz	3 GHz	} HF-Parameter
Klystron HF-Leistung	45 – 60 MW	
HF-Pulslänge	4.5 – 1.5 μs	
Impulsfrequenz	100 Hz	

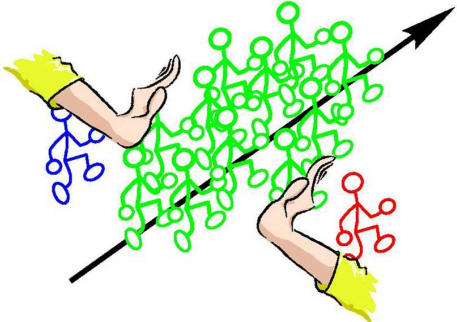
Magnete (Orbit, Optik)



Dipol

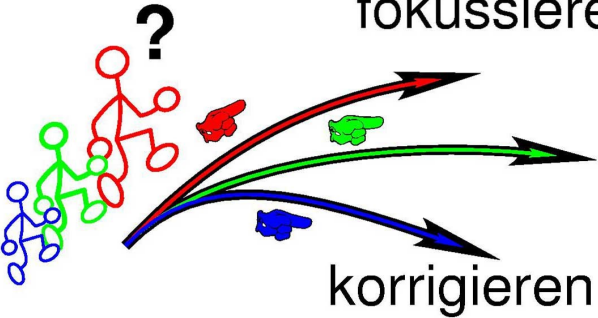
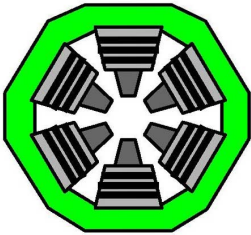


Quadrupol



fokussieren

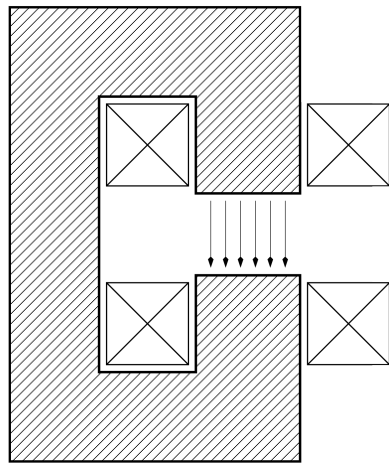
Sextupol



Magnete (Orbit, Optik)

Dipol

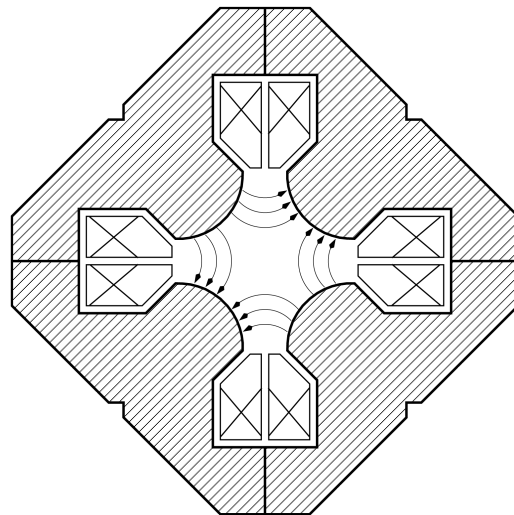
(Ablenkung, festes $B=b_0$)



$$d^2x/ds^2 = \pm 1/\rho$$

Quadrupol

(Fokussierung, $B=b_1 \cdot x$)

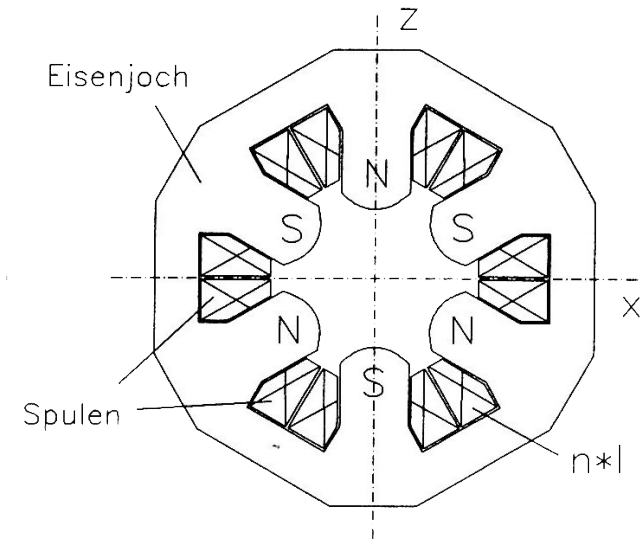


$$d^2x/ds^2 = \pm k \cdot x$$

„ortsabhängiger Dipol“

Sextupol

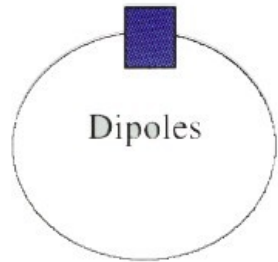
(chromatische Korrekturen, $B=b_2 \cdot x^2$)



$$d^2x/ds^2 = \pm k' \cdot x^2$$

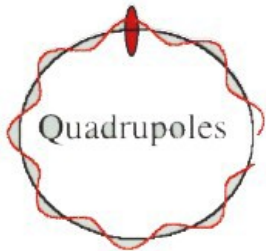
„ortsabhängiger Quadrupol“

Magnete (Orbit, Optik)



Dipoles **guide** the electrons

$$A_\phi = -\frac{\rho B}{2}$$



Quadrupoles **focus** the electrons

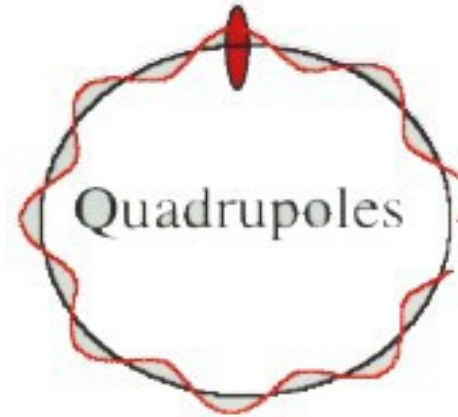
$$A_s = -\frac{Q}{2} (x^2 - y^2)$$



Sextupoles correct first-order chromatic aberrations

$$A_s = -\frac{S}{3} (x^3 - xy^2)$$

Linac: praktisch nur Quadrupole von Bedeutung!



Schwingungen um Sollorbit:

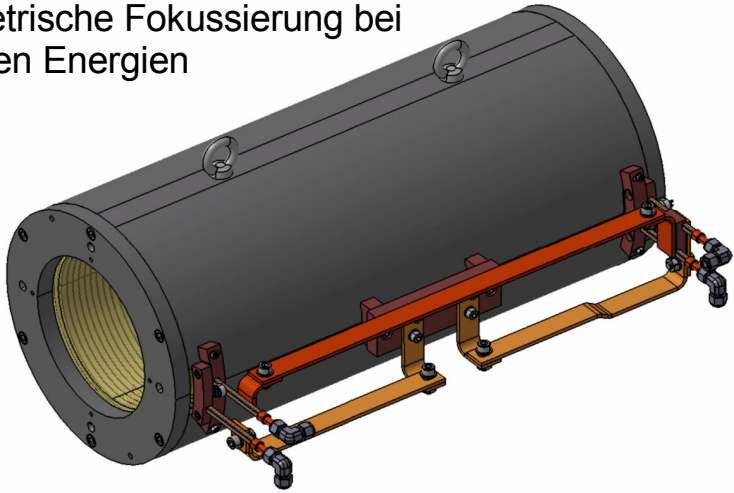
Betatron-Oszillationen

Auch in Linearbeschleunigern von Bedeutung!

Magnete im SwissFEL Injektor

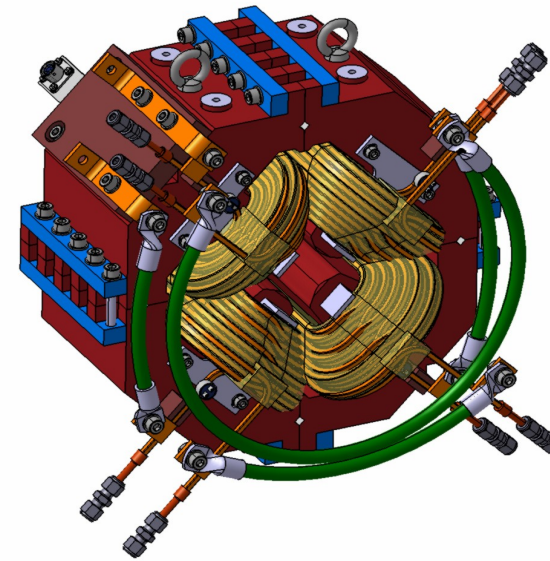
Solenoid:

Symmetrische Fokussierung bei niedrigen Energien



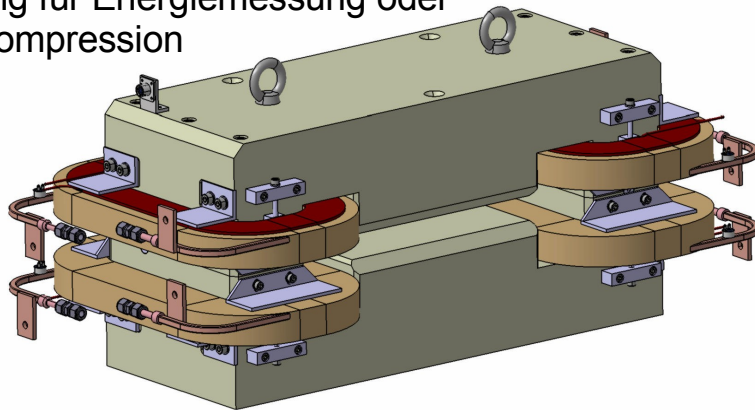
Quadrupol:

Fokussierung/Defokussierung (Optik)

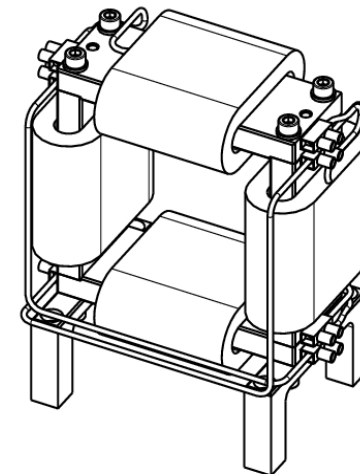


Dipol:

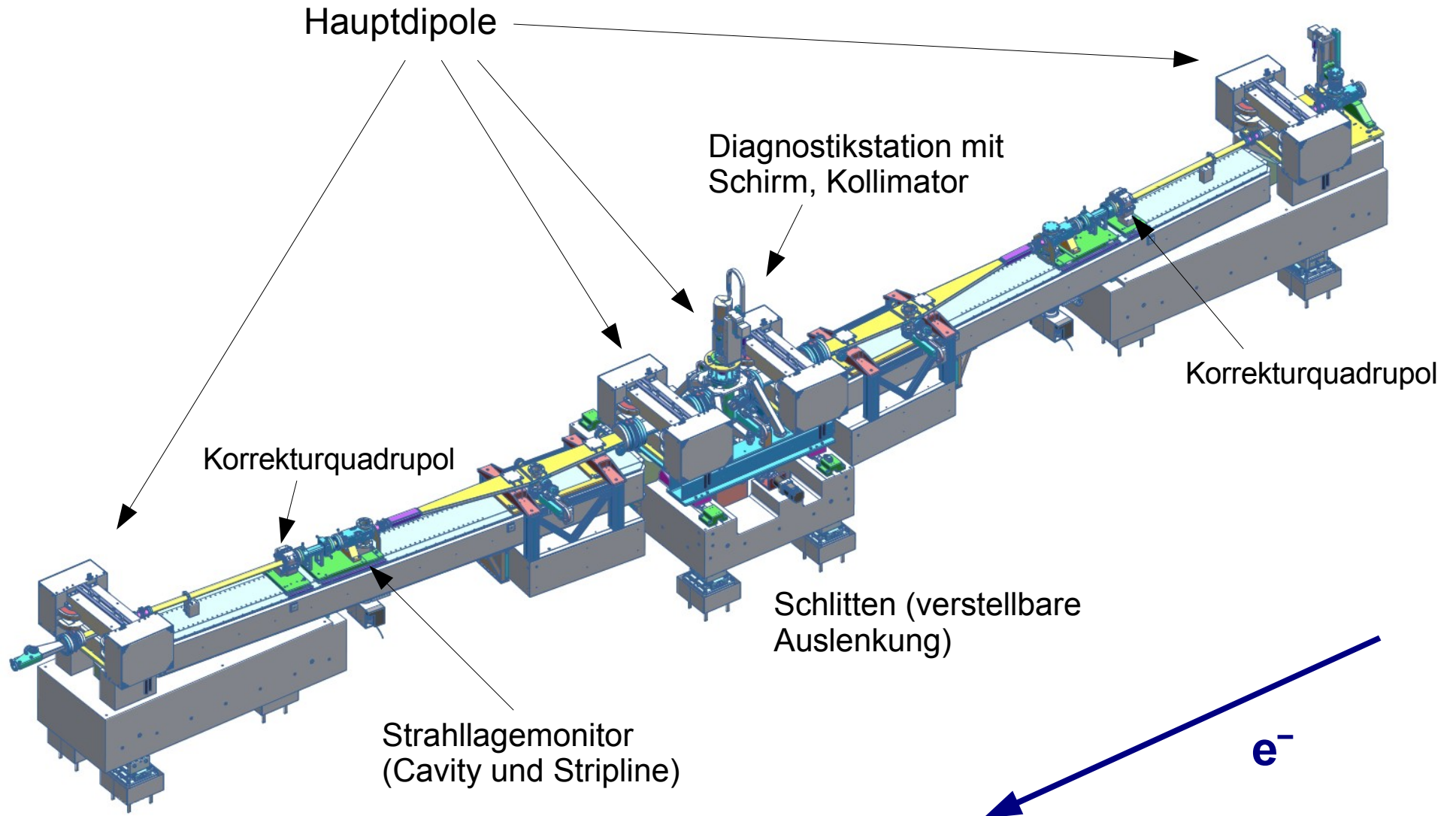
Ablenkung für Energiemessung oder Bunch Kompression



Steuermagnet
(Dipol):
Orbit-Korrektur

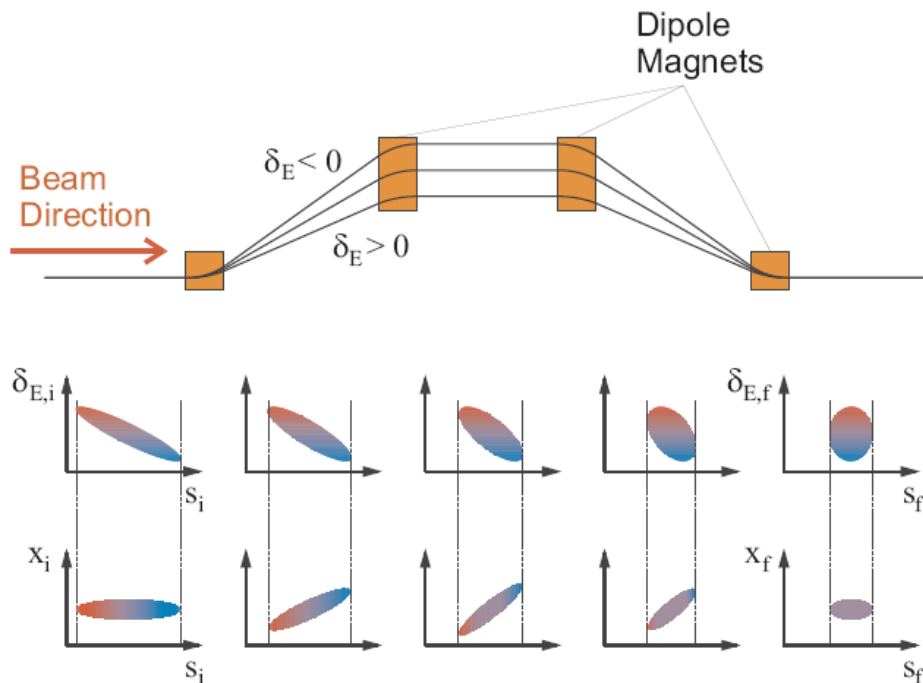


Bunch-Kompressor: Elemente

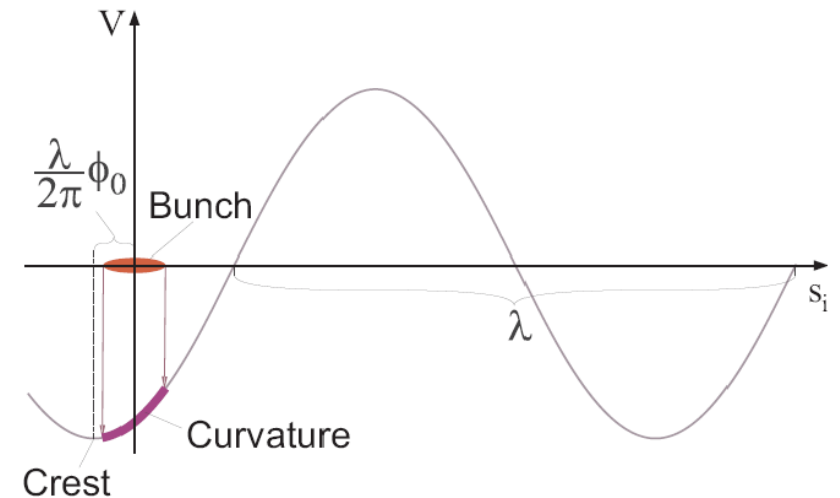


Bunch-Kompressor

- Dispersion in *magnetischer Schikane*: zwingt die ersten Elektronen auf eine längere Bahn, die letzten Elektronen auf eine kürzere.
- Nur möglich, falls Energie und Position *korreliert* sind, d.h. die ersten Elektronen eine tiefere Energie haben als die letzten.
- Die Korrelation wird in der S-Band Beschleunigung erreicht (Steigung der Sinuskurve) und in der X-Band Kavität geglättet (linearisiert).



Funktionsweise eines Bunch-Kompressors (schematisch)



Beschleunigung des Bunches: der Energiegewinn hängt ab von der Position des Bunches im Teilchen.

Bunch-Kompressor (Installation)



SwissFEL Injektor Testanlage

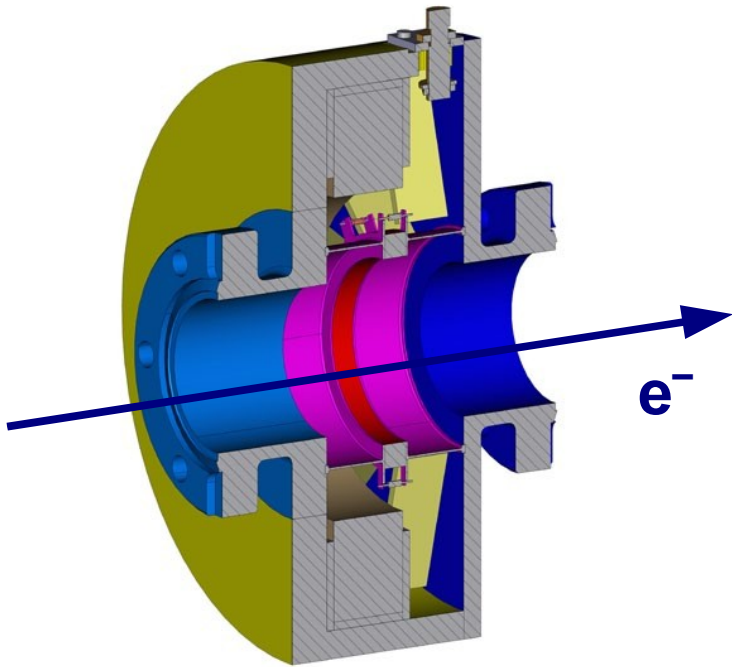
Diagnostik / Messungen

Anforderungen eines FEL

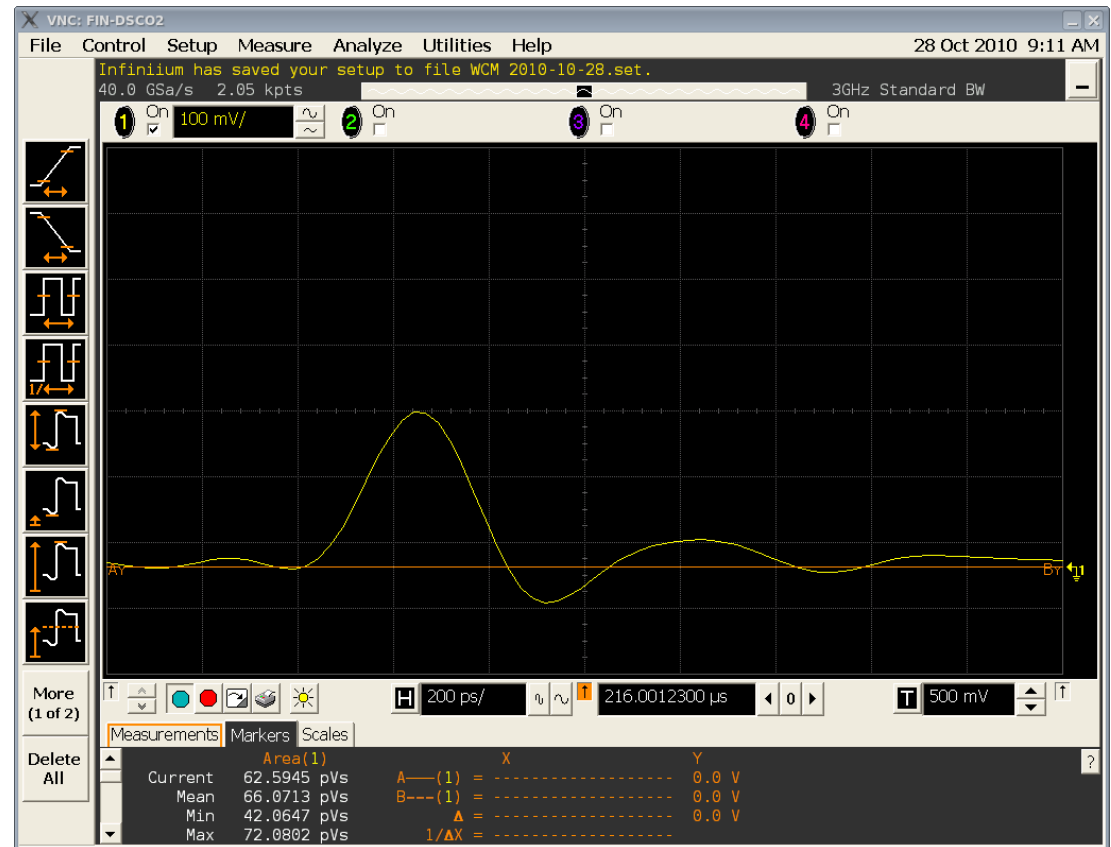
Anforderung	Umsetzung bei SwissFEL (Testinjektor)	Messung/Verifizierung bei SwissFEL (Testinjektor)
Elektronen	Laser-Elektronenkanone (Photokathode + HF-Kavität)	z.B. Wall Current Monitor
Fokussierung (Optik)	Quadrupolmagnete	Schirmmonitor
Lokalisierung (Orbit)	Steuer magnete (Dipole)	Strahllagemonitor (BPM)
Energie	Hochfrequenzkavitäten (3 GHz = S-Band)	Spektrometer (Dipolmagnet)
Spitzenstrom	<ul style="list-style-type: none"> • Laserpulsform • Magnet-Schikane (Bunch-Kompressor) 	Strahlprofilmessung durch Hochfrequenzdeflektor und Schirmmonitor
Emittanz/Strahlgrösse	<ul style="list-style-type: none"> • Design Elektronenkanone • „Emittanzkompensation“ 	<ul style="list-style-type: none"> • „Pepperpot“/Schlitze (niedrige Energien) • Strahloptische Methoden (höhere Energien)

Wie zählen wir die Elektronen?

Ladungsmonitor (Wall Current Monitor)



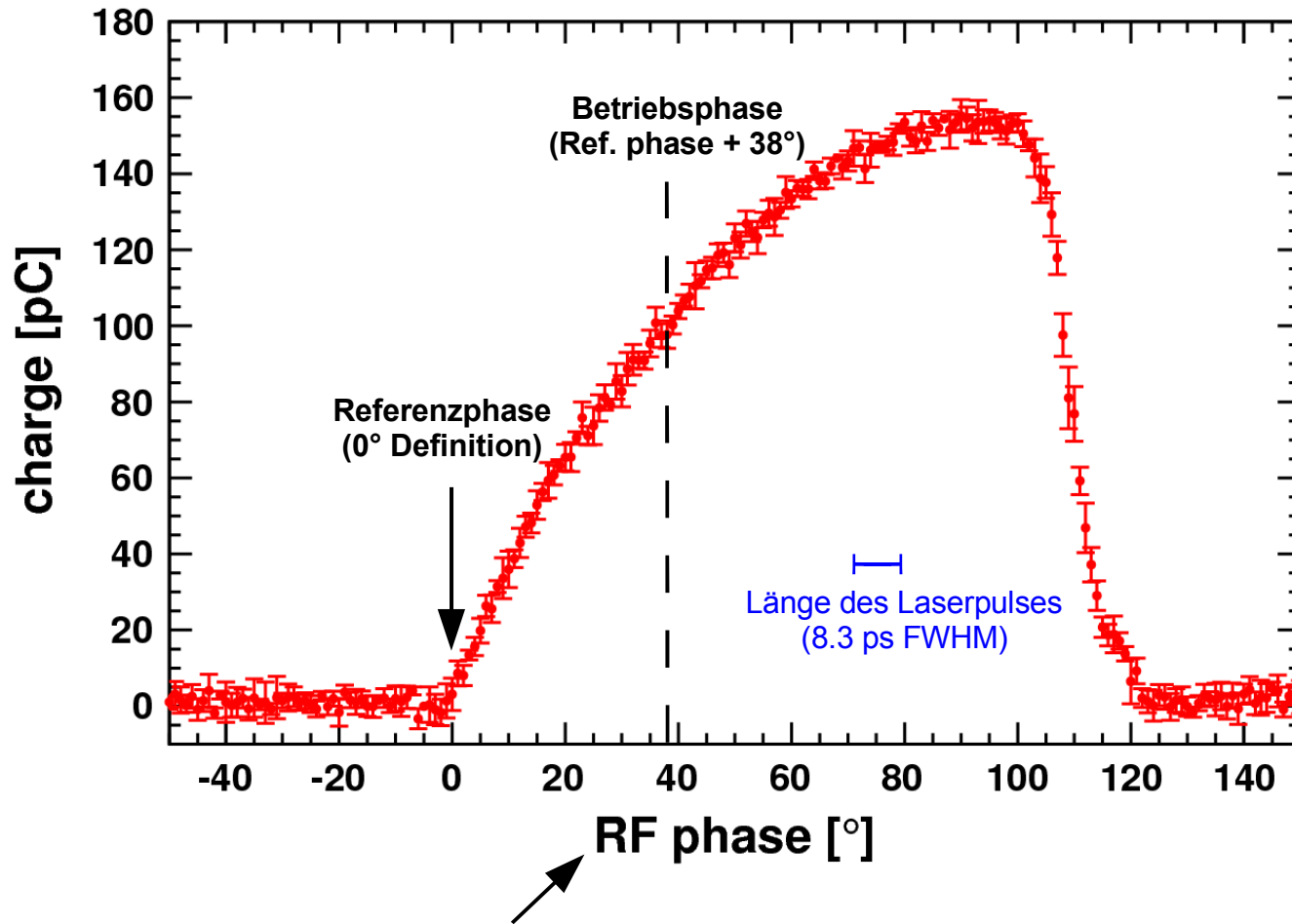
Signal (ferngesteuertes Oszilloskop).



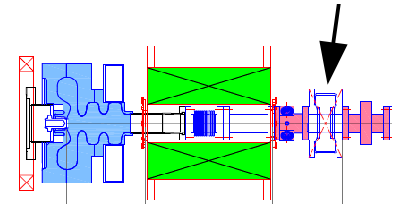
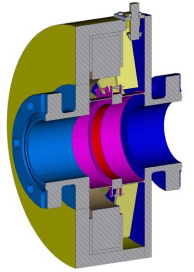
Die Signalbreite ist gegeben durch die Elektronik, nicht durch die Bunchlänge (zu kurz!).

Der Schottky Scan

Elektronenladung als Funktion der Lasereinschussphase
(relativ zur HF-Welle)



(in der Realität drehen wir an der HF-Phase!)



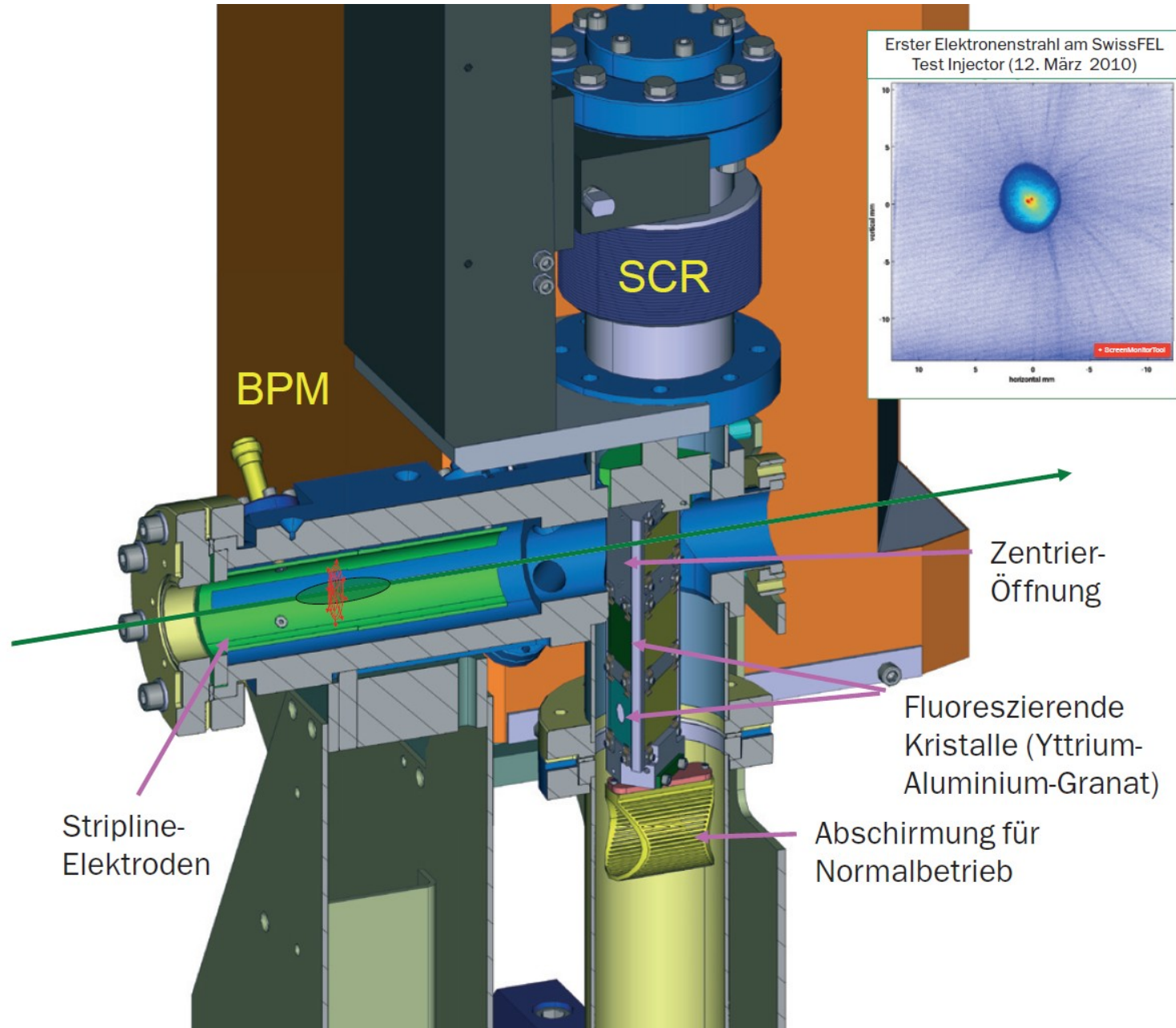
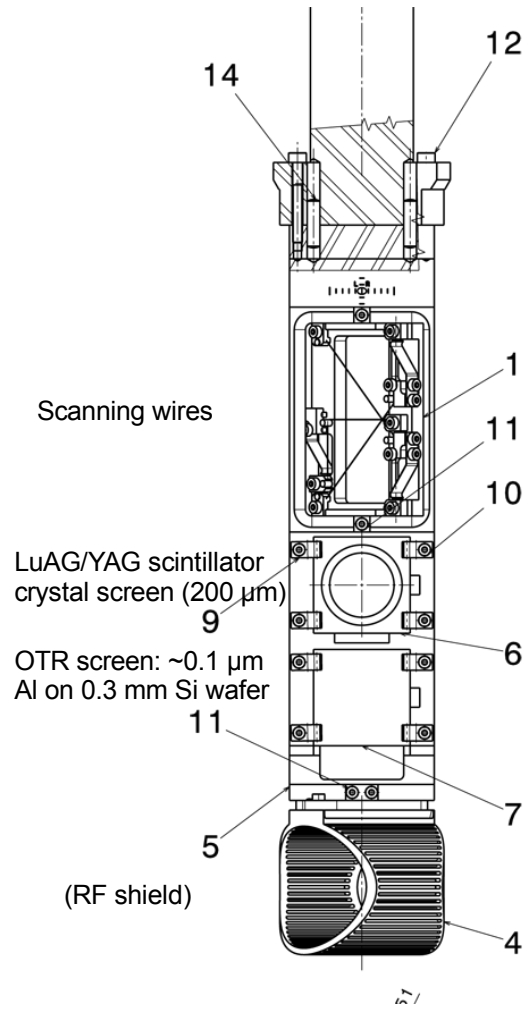
- Ladungsmessung durch Wall Current Monitor
- Bei 2994 MHz, $10^\circ \approx 9.28$ ps

Wo ist der Strahl?

Schirmstation:

BPM = Beam Position Monitor (Strahlagebemonitor)
 SCR = Screen (Schirmmonitor)

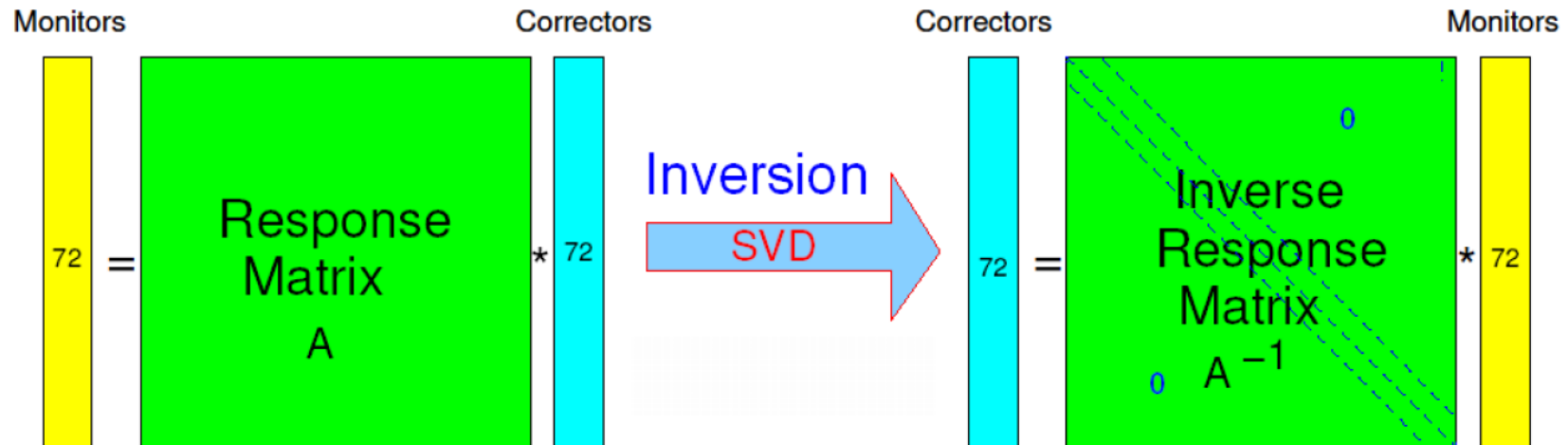
Schirmdurchführung:



Orbitkorrektur

In Ringen (in modifizierter Form auch in Linacs):

- m Korrektormagnete (Dipole) und n Strahlagementonitore (BPM).
- Berechne (oder messe) die $(m \times n)$ Response-Matrix A :
- Das Element A_{ki} enthält Orbit am BPM i für „single kick“ vom Korrektor k :

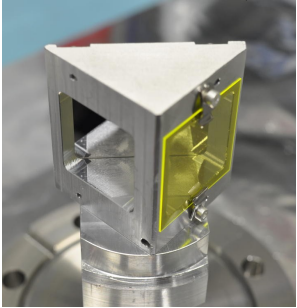
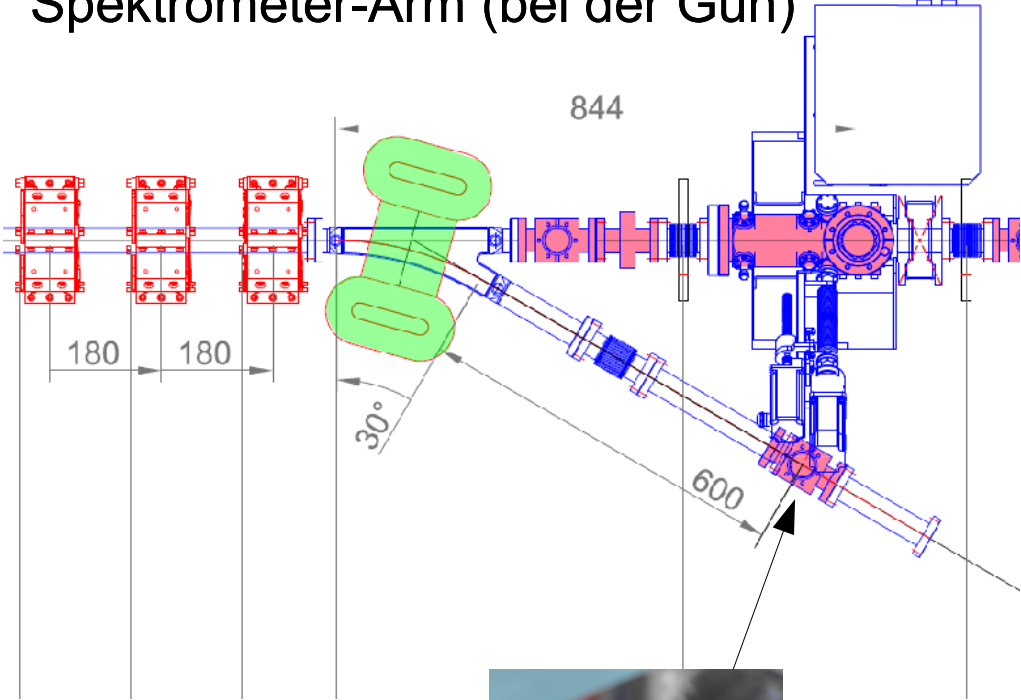


Andreas Streun,
Vorlesung ETH Zürich

- „von Hand“: one-to-one steering (morgen!)

Energie- (Impuls-) Messung

Spektrometer-Arm (bei der Gun)



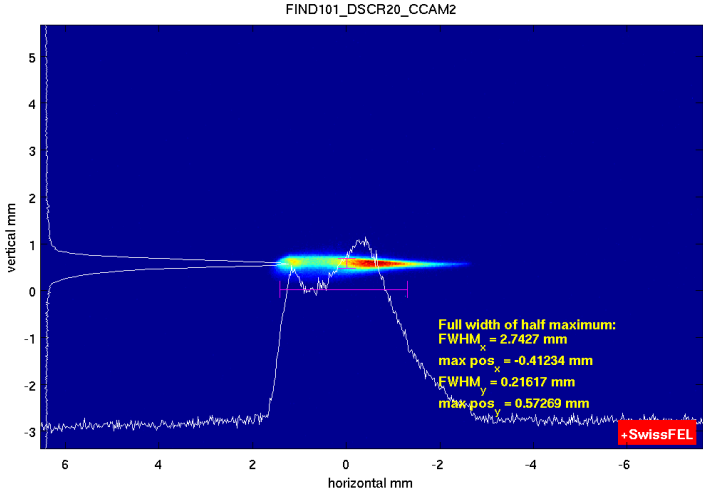
fixed screen

Impuls:

$$p = \frac{eBL_{\text{eff}}}{2 \sin(\theta/2)}$$

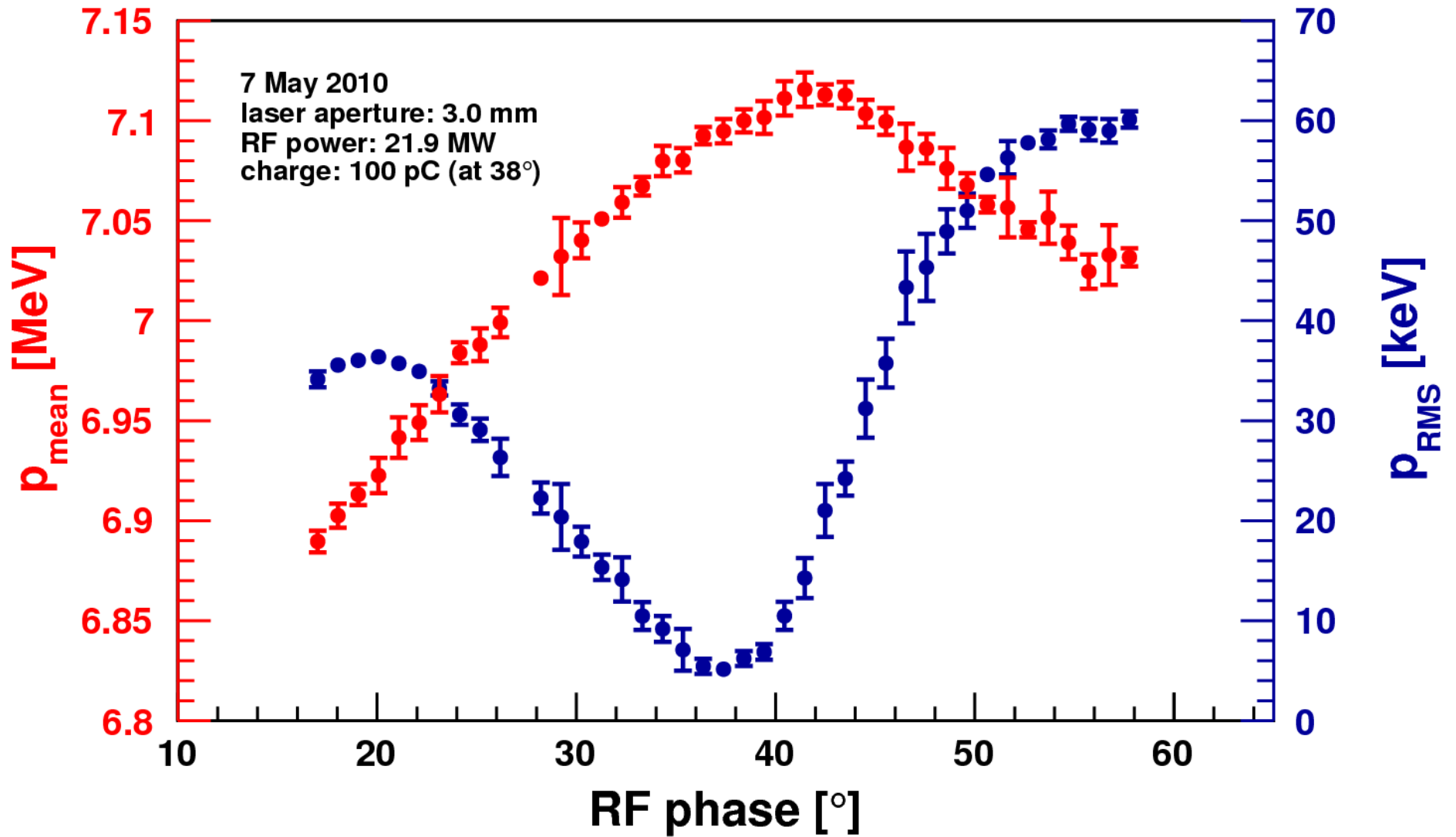
Impulsbreite:

$$\sigma_p^{\text{rms}} \approx \frac{dp}{dx} \sigma_x^{\text{rms}} = \frac{p_0}{2d \tan(\theta_0/2)} \sigma_x^{\text{rms}}$$

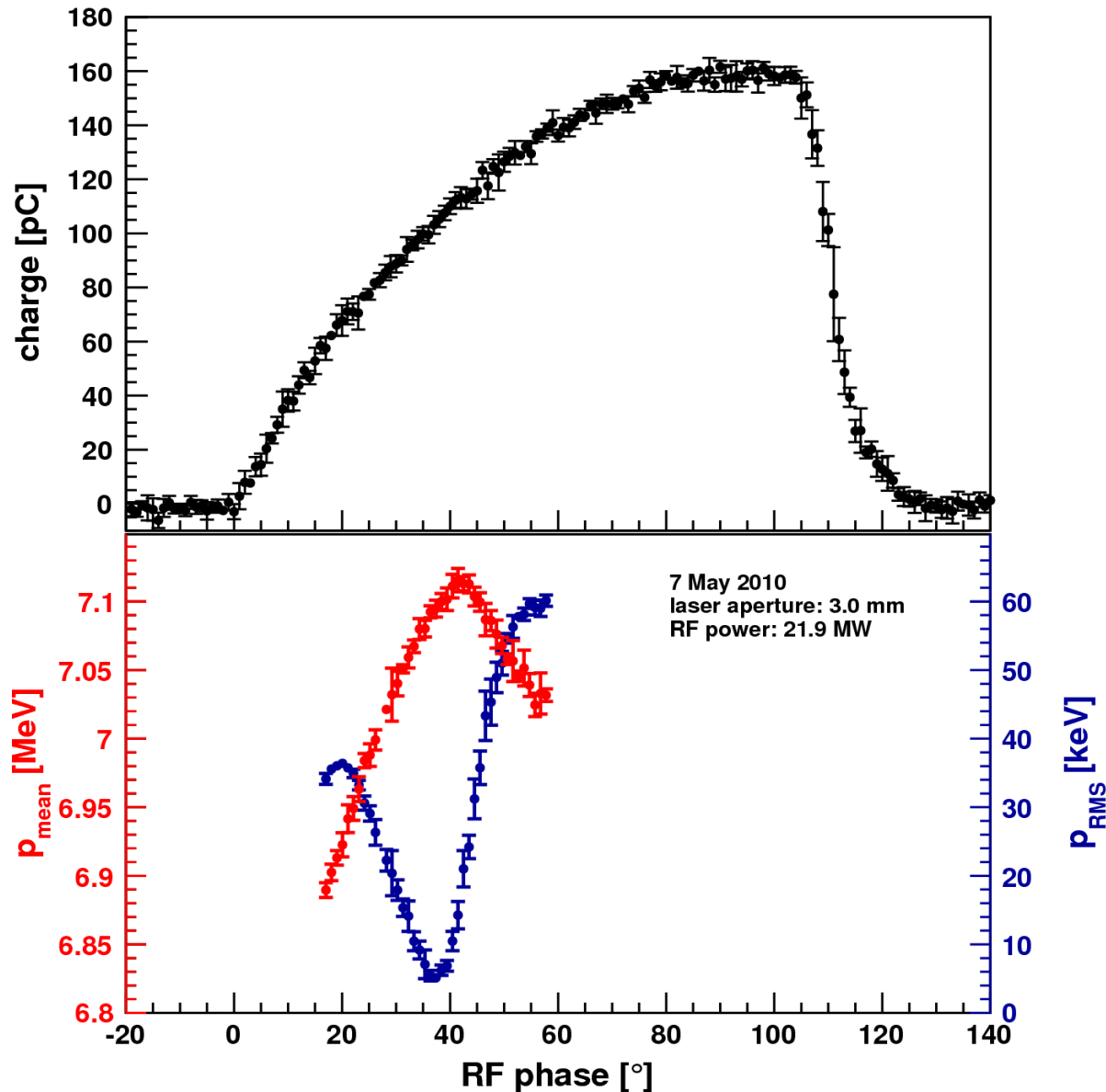


Analog bei Endenergie!

Spektrometer-Scan



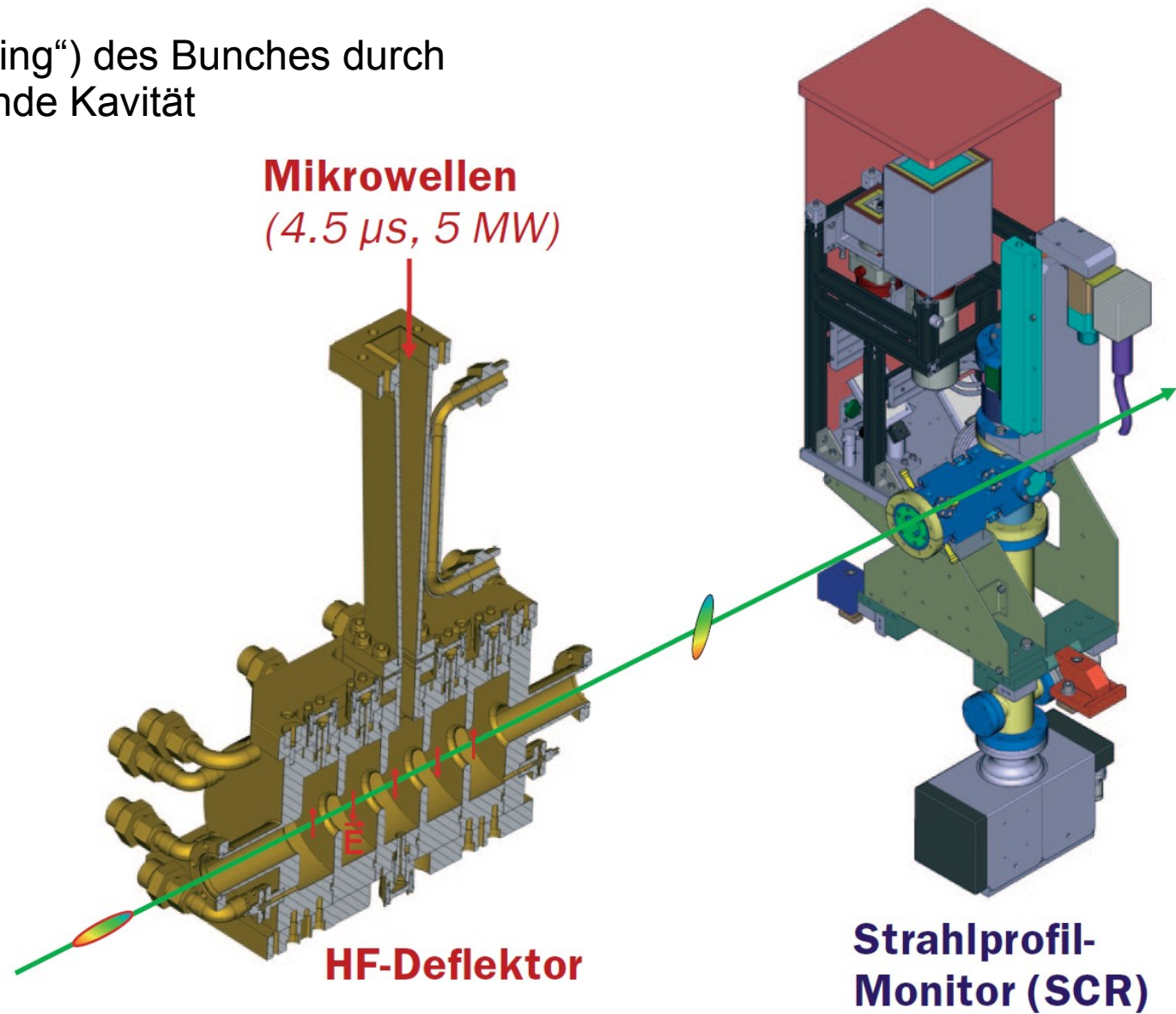
Spektrometer-Scan



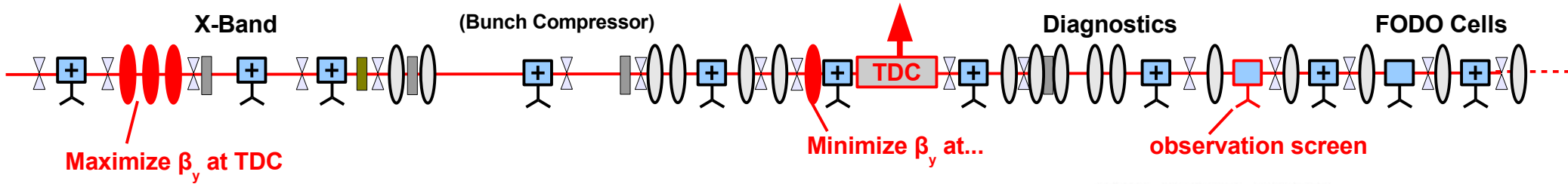
- Spektrometer-Scan mit Schottky-Scan
- Bestätigung, dass Phase von 38° minimale Energieunschärfe ergibt.
- Maximale Energie bei ungefähr 41° (von der Schottky-Kante).

Messung der Bunchlänge

Scherung („Streaking“) des Bunches durch transvers ablenkende Kavität



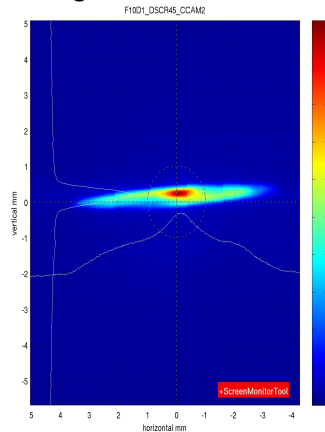
Messung der Bunchlänge



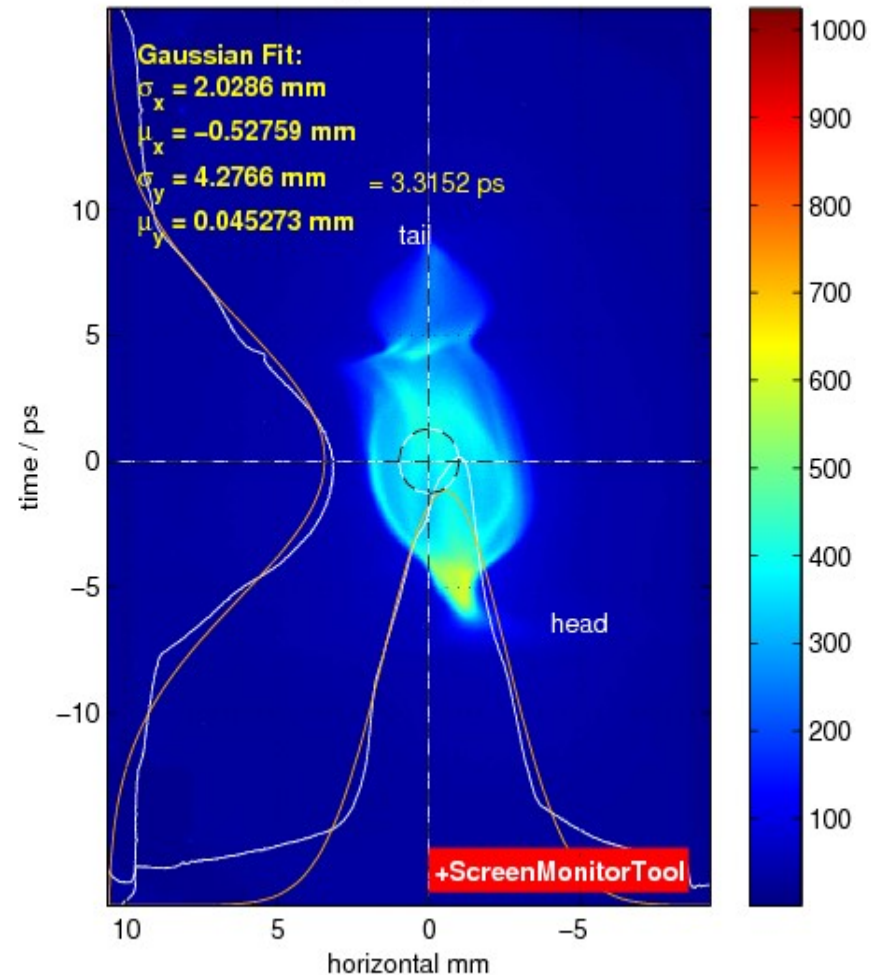
Messung mit „Driftoptik“

- HF Deflektor schert den Strahl vertikal.
- Bunchlänge wird aus der vertikalen Größe des gescherten Strahl nach einer Kalibration bestimmt.
- Die Kalibration (Konversion mm nach ps) geschieht durch Beobachtung der vertikalen Verschiebung des Strahls nach einer Änderung der Phase des Deflektors.
- Identifikation von vorne und hinten durch Einführung einer kleinen Verzögerung des Lasers durch Einschub eines Silika-Glases in der Laser-Transferlinie.

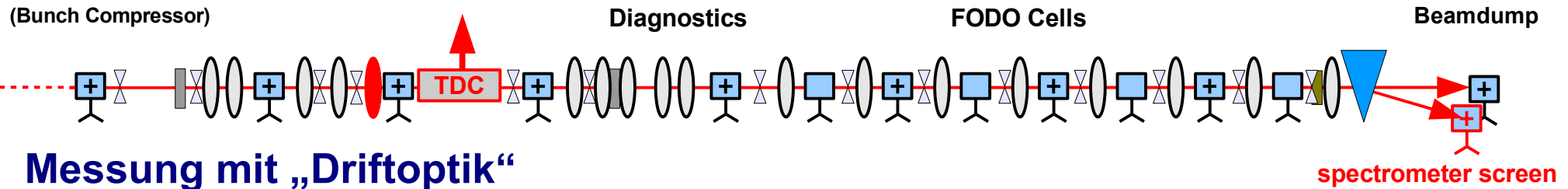
Ungescherter Strahl:



F10D1_DSCR45_CCAM2

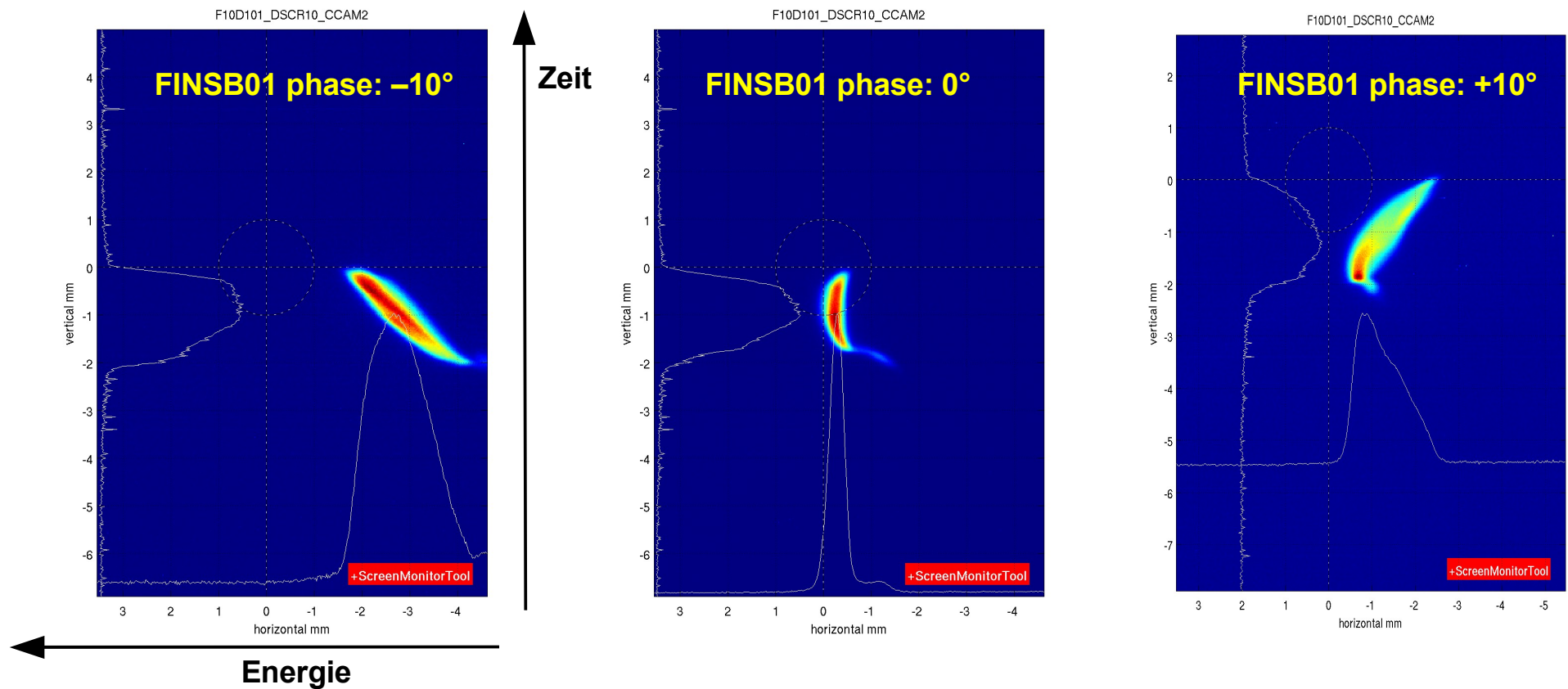


Bunchlänge und Energie: longitudinaler Phasenraum!



Messung mit „Driftoptik“

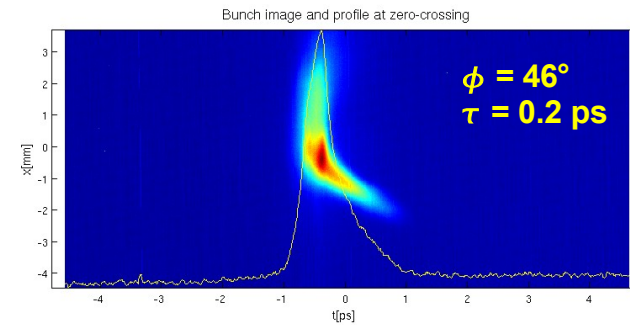
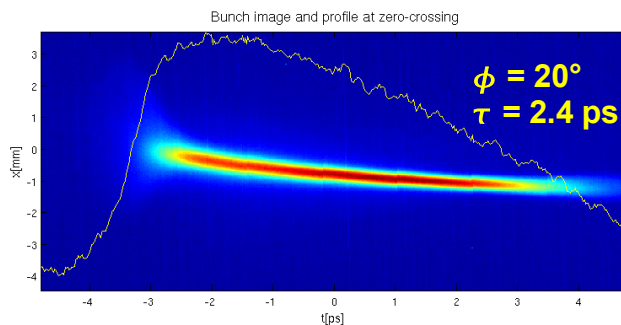
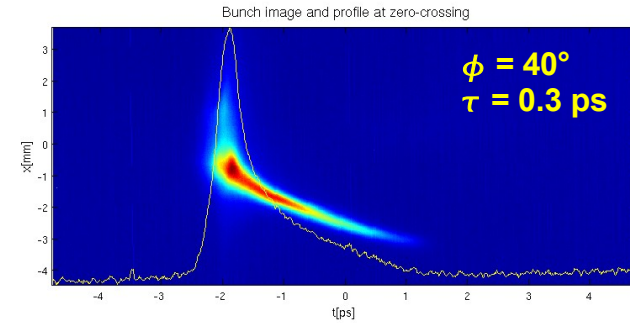
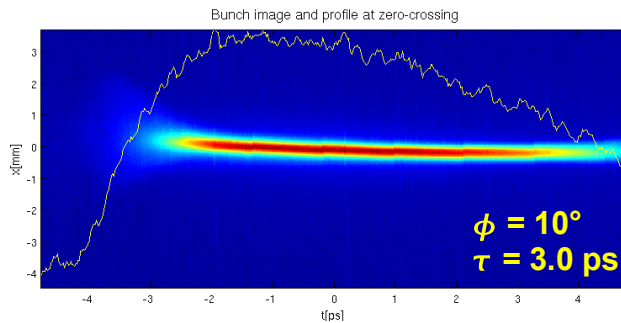
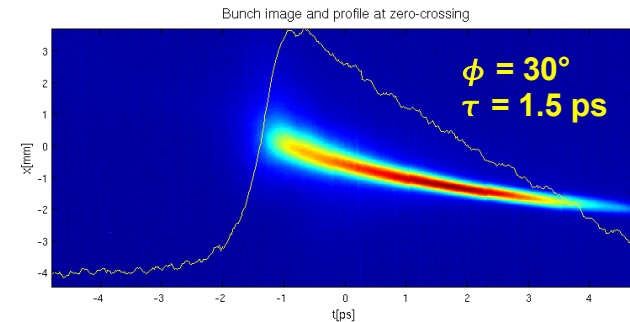
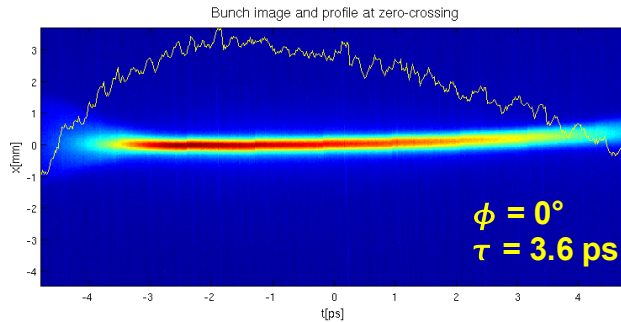
- Beobachtung des vertikal gescherten Strahls im Spektrometer-Arm
- Die HF-Krümmung wird sichtbar!



Bunch-Kompression

ϕ : HF-Phase in FINSB03/04
 τ : Bunchlänge

- Erste Beobachtung des komprimierten Bunches (18. April 2012, Jaguar-Laser)
- Bunchlänge (rms Gauss-Fit) reduziert von 3.6 ps auf 200 fs.
- BC Winkel 4.07° ($R_{56} = -46.19$ mm rad²)



3.6 ps \rightarrow 200 fs (rms)

Teil II

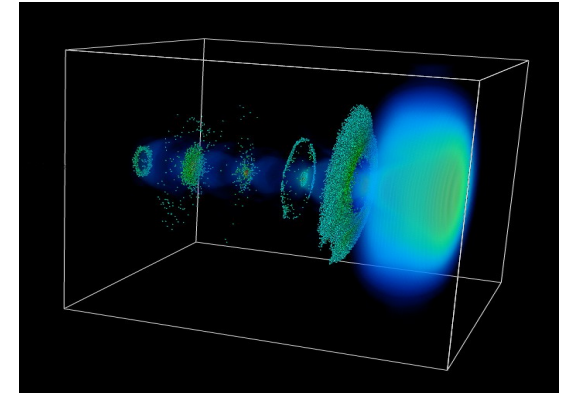
Strahldynamische Konzepte

Strahldynamische Konzepte

- Strahlmomente
- Sigma-Matrix und Strahlellipse
- Transportmatrizen
- Betatron-Schwingungen
- Twiss Parameter
- Beta-Funktion
- Abgleichung der Strahloptik („Matching“)
- Emittanz, Messmethoden

Strahlmomente

- Typisches Strahlpaket im SwissFEL Injektor: 200 pC = 10^9 Elektronen. Exakte Beschreibung durch 10^9 6D-Vektoren (Positionen und Impulse).
- Einfacher: Beschreibung durch *Momente*.
 - Mathematisch konsistente Beschreibung (lineare Strahldynamik).
 - Physikalisch motiviert durch zentralen Grenzwertsatz (Strahl häufig in einem Gleichgewicht zwischen Rauschen und Dämpfung).
 - Die ersten beiden Momente können relativ einfach gemessen werden.

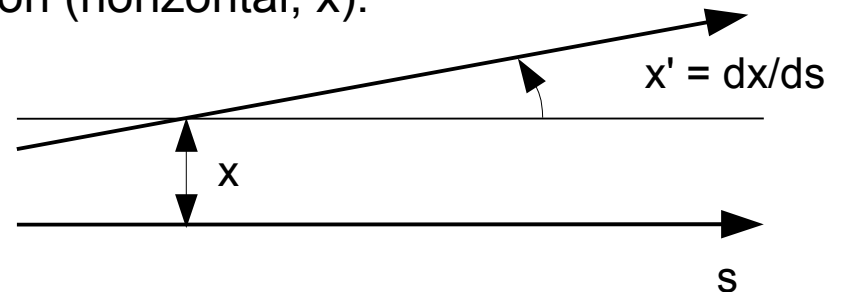


- Erstes Moment: mittlere Strahlposition (Schwerpunkt) $\langle x \rangle$ „Orbit“
 - Messung durch Strahllagemonitor
- Zweites Moment: Strahlbreite (RMS) $\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$ „Optik“
 - Messung mit Schirm oder Drahtabtaster (wire scanner)
- Im folgenden Beschränkung auf eine Dimension (horizontal, x):

– Position: x

– Bewegungsrichtung/Impuls: $x' = \frac{dx}{ds}$

(s: Pfadlänge entlang Beschleunigerachse)



Sigma-Matrix und Strahlellipse

- Beschreibung der transversalen Dynamik in einer Dimension (z.B. horizontal, x):

- Ein Teilchen: Vektor $X = \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}$

- Teilchenverteilung: **Matrix** $\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle \end{bmatrix}$

- Σ ist symmetrisch und beschreibt eine Ellipse, die **Strahlellipse**: $X^T \Sigma^{-1} X = 1$
- Die Strahlbreite ist gegeben durch $\sqrt{\sigma_{11}} = \sqrt{\langle x^2 \rangle}$
- Allgemeiner: Das durch den Strahl eingenommene Phasenraumvolumen ist gegeben durch die Fläche der Ellipse (**Emittanz**): $\varepsilon = \sqrt{\det \Sigma}$
- Transport von einem Teilchen oder einer Teilchenverteilung durch den Beschleuniger (i \rightarrow f) wird durch sogenannte **R**-Matrizen beschrieben (R = Ray-Tracing):

$$\text{Matrix } R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12} & R_{22} \end{bmatrix}$$

$$X_f = R X_i \quad (\text{ein Teilchen})$$

$$\Sigma_f = R \Sigma_i R^T \quad (\text{Teilchenverteilung})$$

R-Matrizen-Formalismus:
Karl Brown,
SLAC-75-rev-4 (1982),
SLAC-91-rev-2 (1977).



Die Strahlellipse

Chao & Tigner,
Handbook of Accelerator
Physics and Engineering

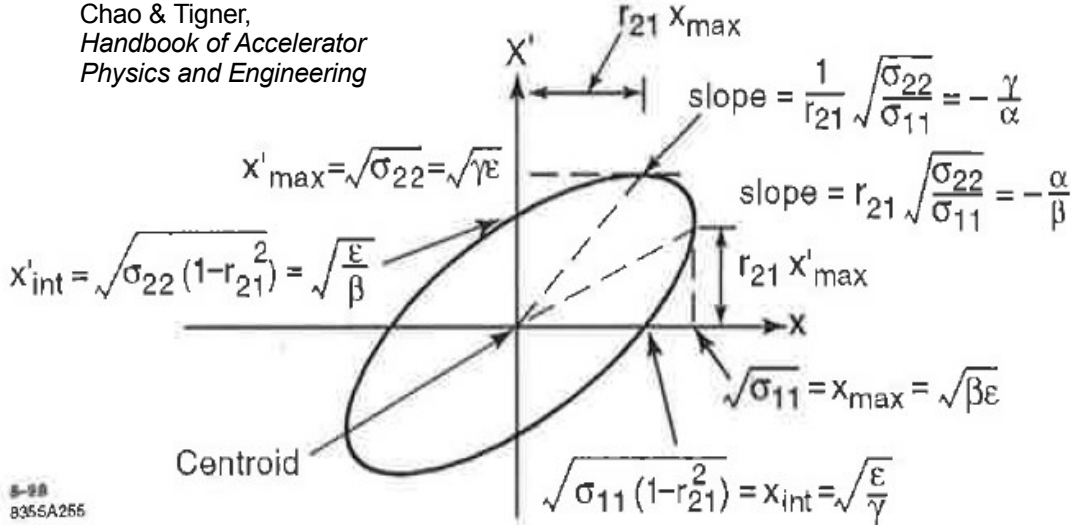
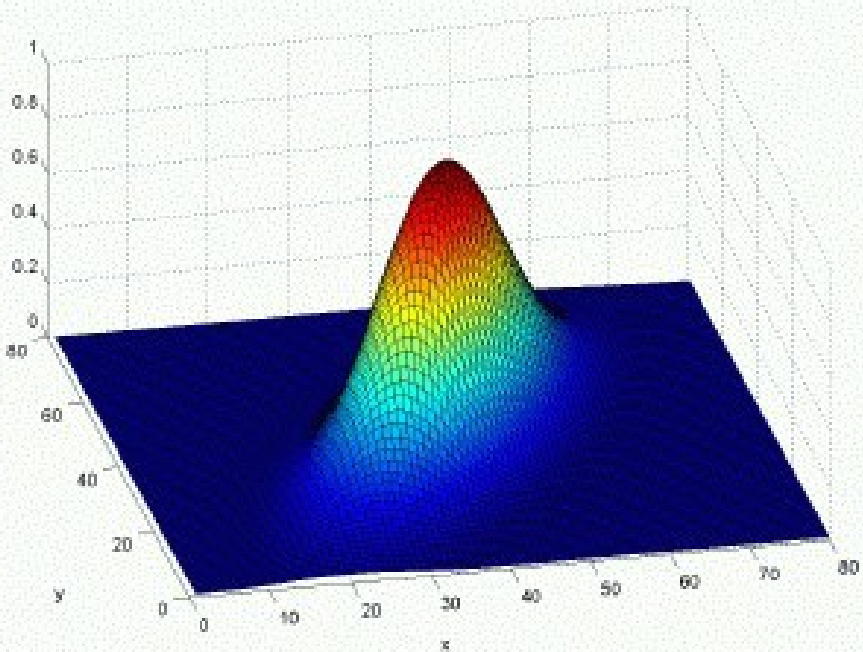
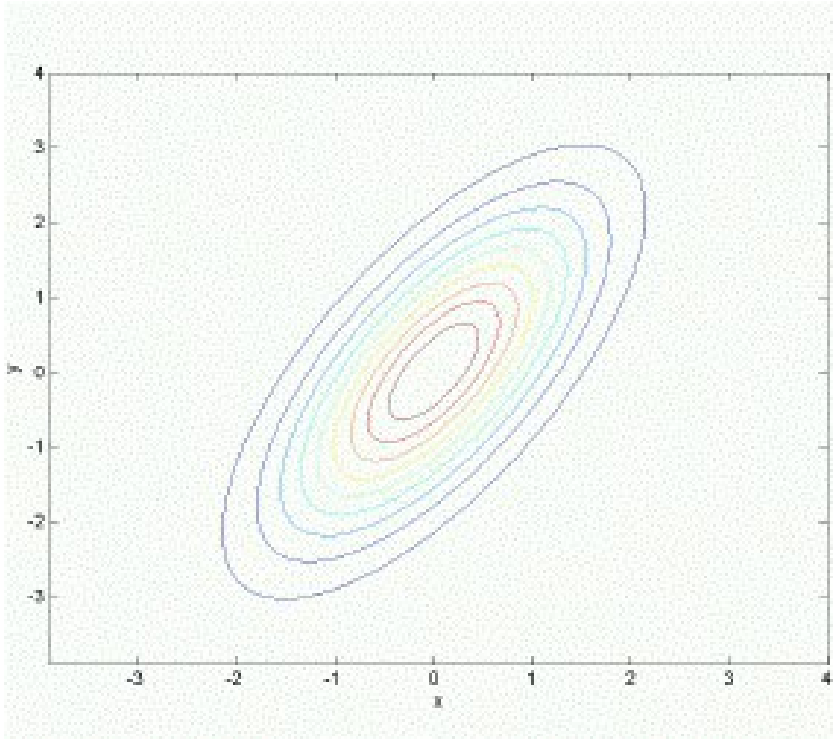


Figure 2: A two-dimensional beam phase ellipse.

$$\phi(x, y) = \frac{1}{2\pi} e^{-(x^2 - 2xy + 2y^2)/2}$$



Einfache Beispiele von Transportmatrizen

- **Driftstrecke**
 - Teilchentransport ohne äussere Kräfte.
 - $R = ?$
 - Charakteristisches Element?
- **Dünnere Quadrupolmagnet**
 - Teilchen werden (in einer Richtung) fokussiert – analog zu optischer Linse
 - $R = ?$
 - Charakteristisches Element?

Bemerkung: für die Fokussierung von Teilchen braucht es Quadrupol und Drift!

Einfache Beispiele von Transportmatrizen

- **Driftstrecke**

- Teilchentransport ohne äussere Kräfte.
- $R = ?$
- Charakteristisches Element? $R_{12} = L$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- **Dünnere Quadrupolmagnet**

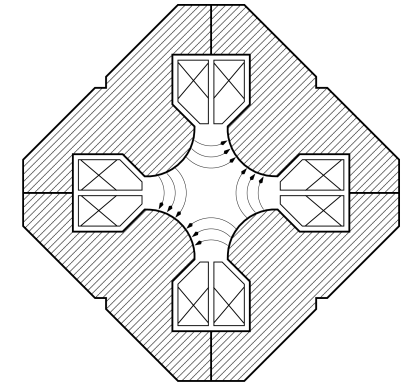
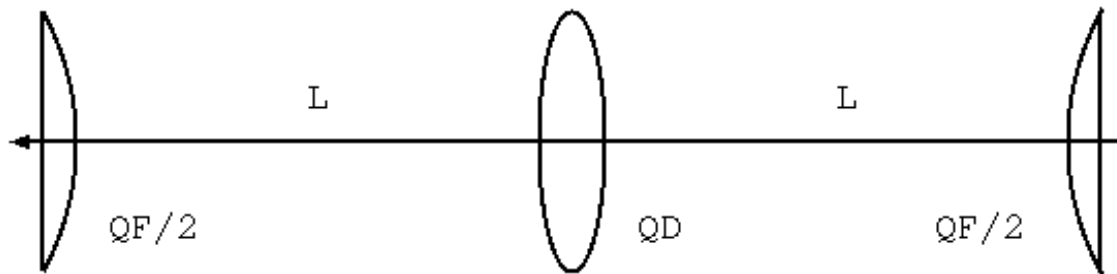
- Teilchen werden (in einer Richtung) fokussiert – analog zu optischer Linse
- $R = ?$
- Charakteristisches Element? $R_{21} = k = 1/f$
- Hausaufgabe: 4 x 4-Matrix für Quadrupol in x und y?

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ k & 1 \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$$

Bemerkung: für die Fokussierung von Teilchen braucht es Quadrupol und Drift!

Die FODO-Zelle



- Ein Quadrupol fokussiert in einer Richtung, defokussiert in der anderen.
- Eine Abfolge von fokussierenden und defokussierenden Quadrupolen mit Driftstrecken dazwischen fokussiert in beide Richtungen (zeige es mit R-Matrizen)!
- Einfachste Realisierung: die FODO-Zelle (Fokussierend/Defokussierend) – Standardelement von Beschleunigern.
- Transportmatrix:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2f} & 1 \end{bmatrix}$$

...rechne!

Betatron-Schwingungen

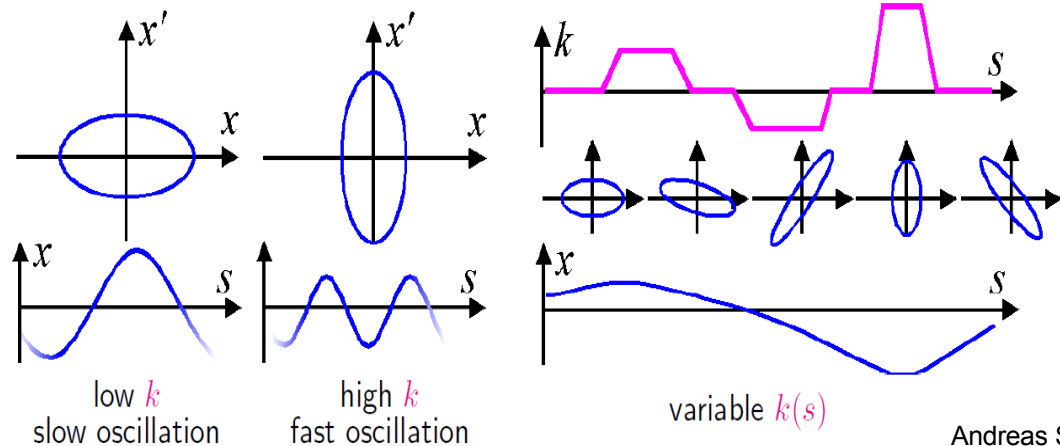
- Transversale Schwingungen der Teilchen um den Sollorbit.
- Rückstellkraft ist gegeben durch die fokussierenden Magnete (meist Quadrupole).
- Beschreibung durch die **Hill-Gleichung** (harmonischer Oszillator mit ortsabhängiger Rückstellkraft)

$$x'' + k(s)x = 0$$

- Lösungsansatz: $x(s) = A\sqrt{\beta(s)} \cos(\phi(s) + \phi_0)$

mit $A = A_0$ invariante Betatron-Amplitude } Teilcheneigenschaften
 ϕ_0 Betatron-Phase }

$\beta(s)$ **Beta-Funktion** } Eigenschaften des Beschleunigers
 $\phi(s)$ **Betatron-Phasenvorschub** } („lattice“)



Andreas Streun,
Vorlesung ETH Zürich

Twiss-Parameter

- Separation zwischen
 - der Strahlgrösse im Phasenraum (die Emittanz ε , eine Eigenschaft des Strahls)
 - und der Verteilung auf die Freiheitsgrade (Fokussierung, eine Eigenschaft des Beschleunigers)

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \langle x^2 \rangle & \langle xx' \rangle \\ \langle xx' \rangle & \langle x'^2 \rangle \end{bmatrix} = \varepsilon \begin{bmatrix} \beta & -\alpha \\ -\alpha & \gamma \end{bmatrix}$$

- Damit ergeben sich die folgenden wichtigen Beziehungen

$$\langle x^2 \rangle = \beta\varepsilon \quad \langle x'^2 \rangle = \gamma\varepsilon \quad \langle xx' \rangle = -\alpha\varepsilon$$

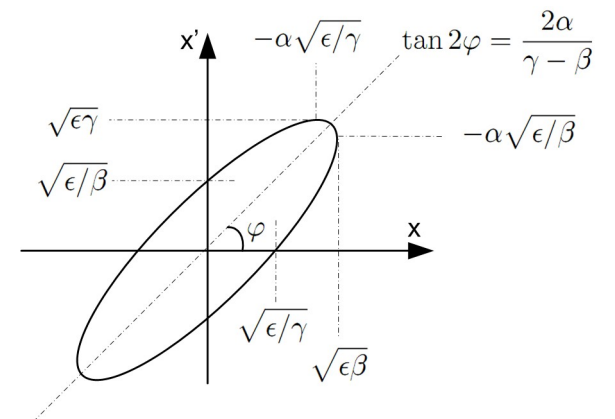
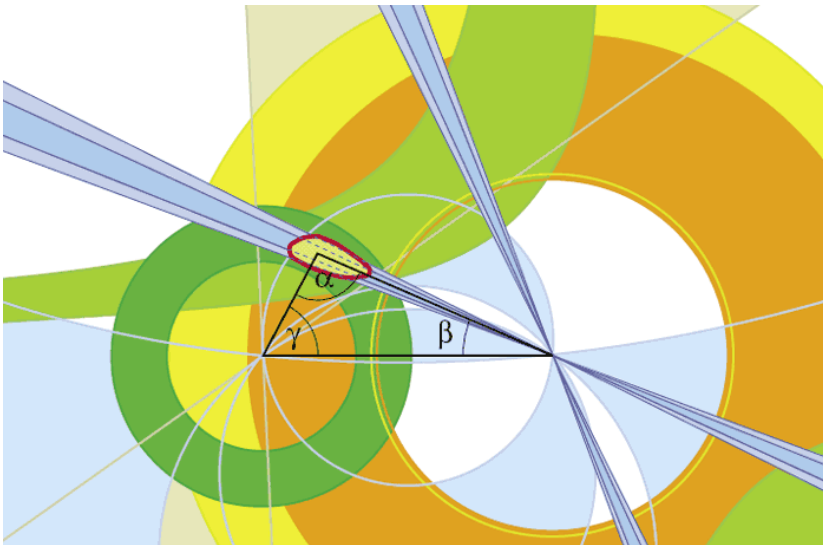
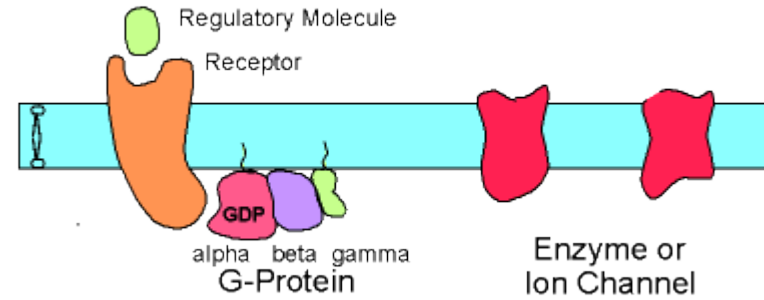
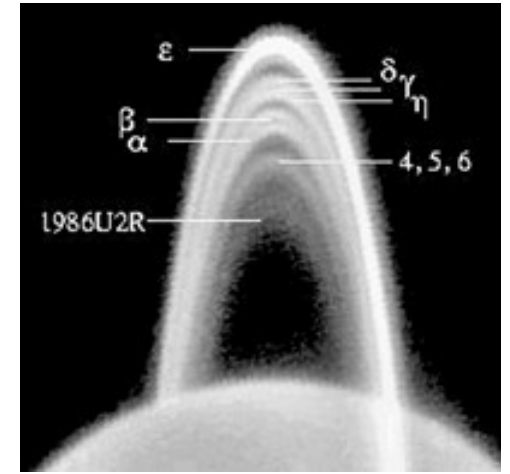
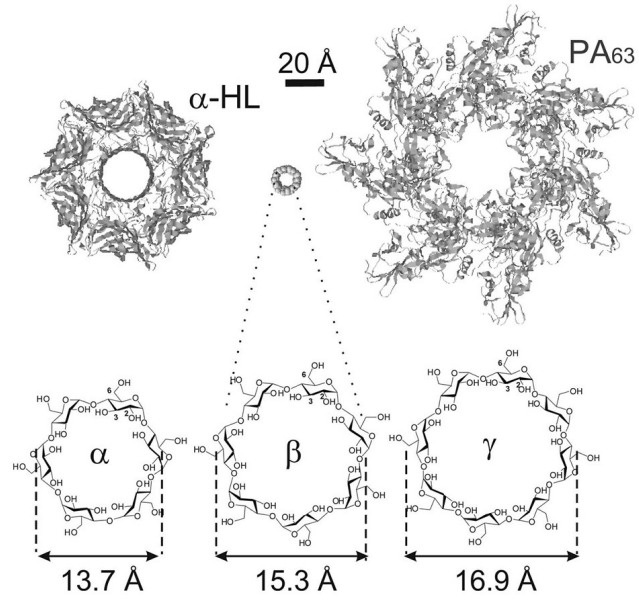
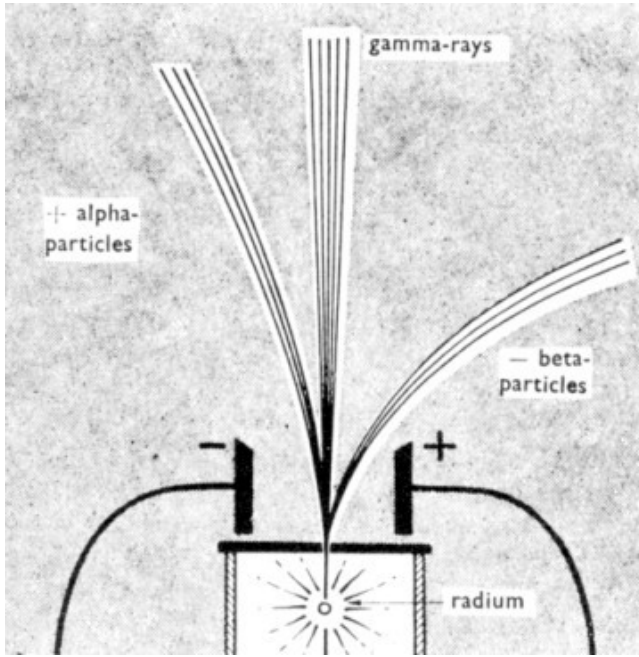
sowie

$$\varepsilon = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

(statistische Definition der Emittanz)

- Die Strahlellipse lässt sich schreiben als $\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2$
- α , β , γ heissen **Courant-Snyder-**, oder **Twiss-Parameter**
- Sie sind nicht unabhängig voneinander: $\alpha = -\frac{\beta'}{2} \quad \gamma = \frac{1 + \alpha^2}{\beta}$

$\alpha, \beta, \gamma \dots$

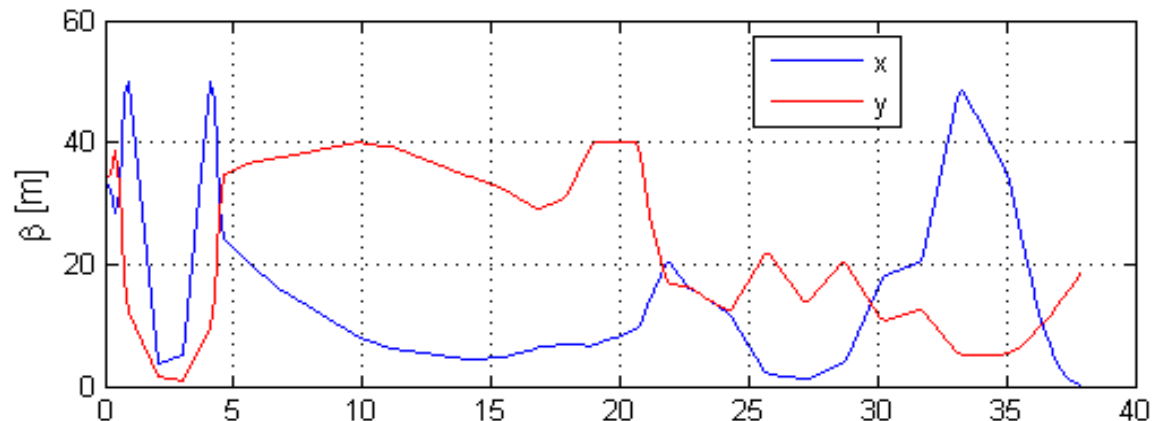


Die β -Funktion

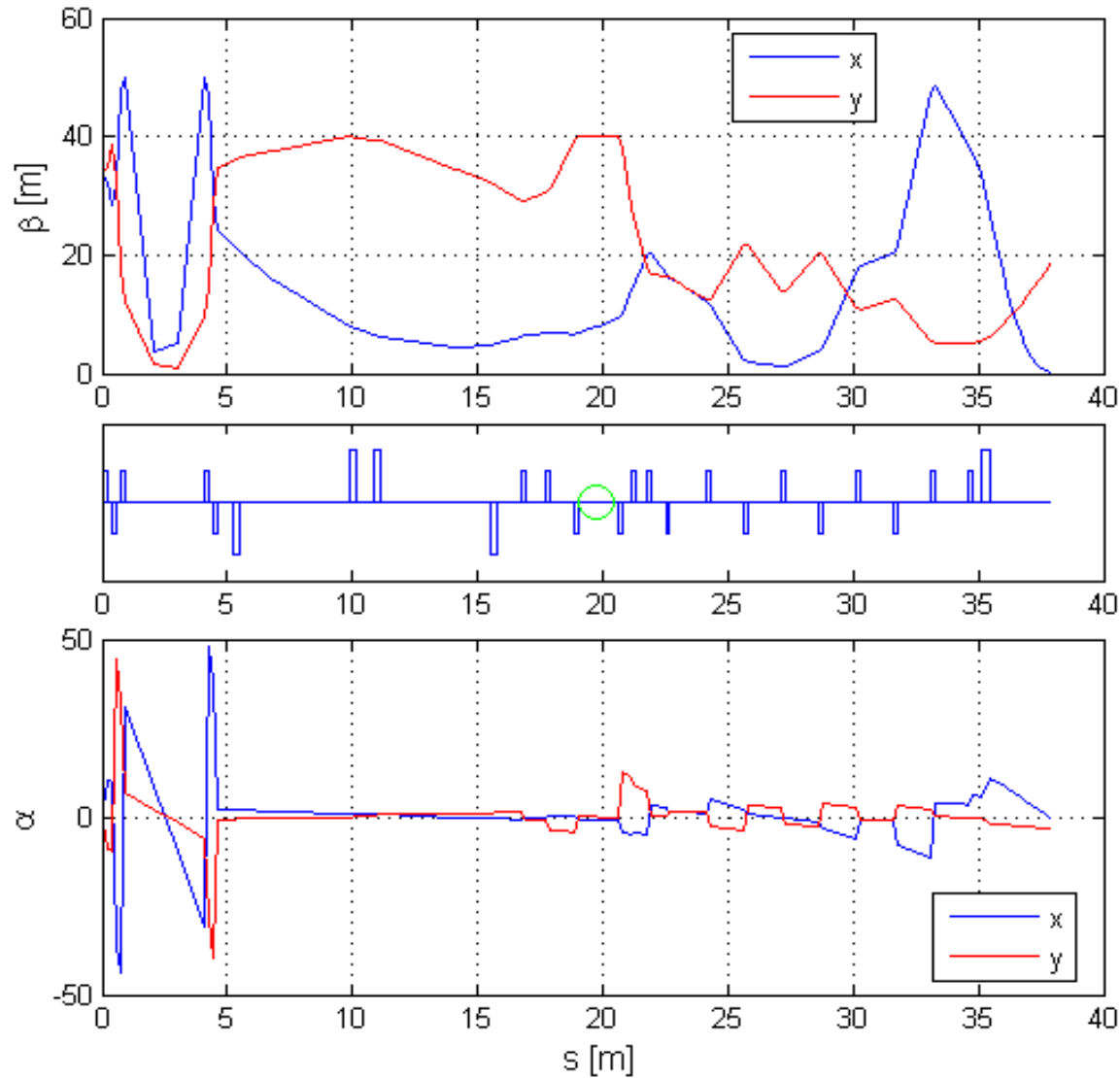
$$x(s) = A\sqrt{\beta(s)} \cos(\phi(s) + \phi_0)$$

Die β -Funktion hat eine *überragende Bedeutung* in der Strahldynamik:

- ...definiert die Optik eines Beschleunigers vollständig (α aus β')
- ...gibt an, wie sich die Emittanz (invariantes Phasenraumvolumen) auf Strahlgrösse und Strahldivergenz aufteilt.
- ...beschreibt die Envelope der Betatronschwingungen.
- ...ist proportional zur inversen Frequenz der Betatronschwingungen.
- ...muss separat für x und y definiert werden.
- ...wird in Metern gemessen.

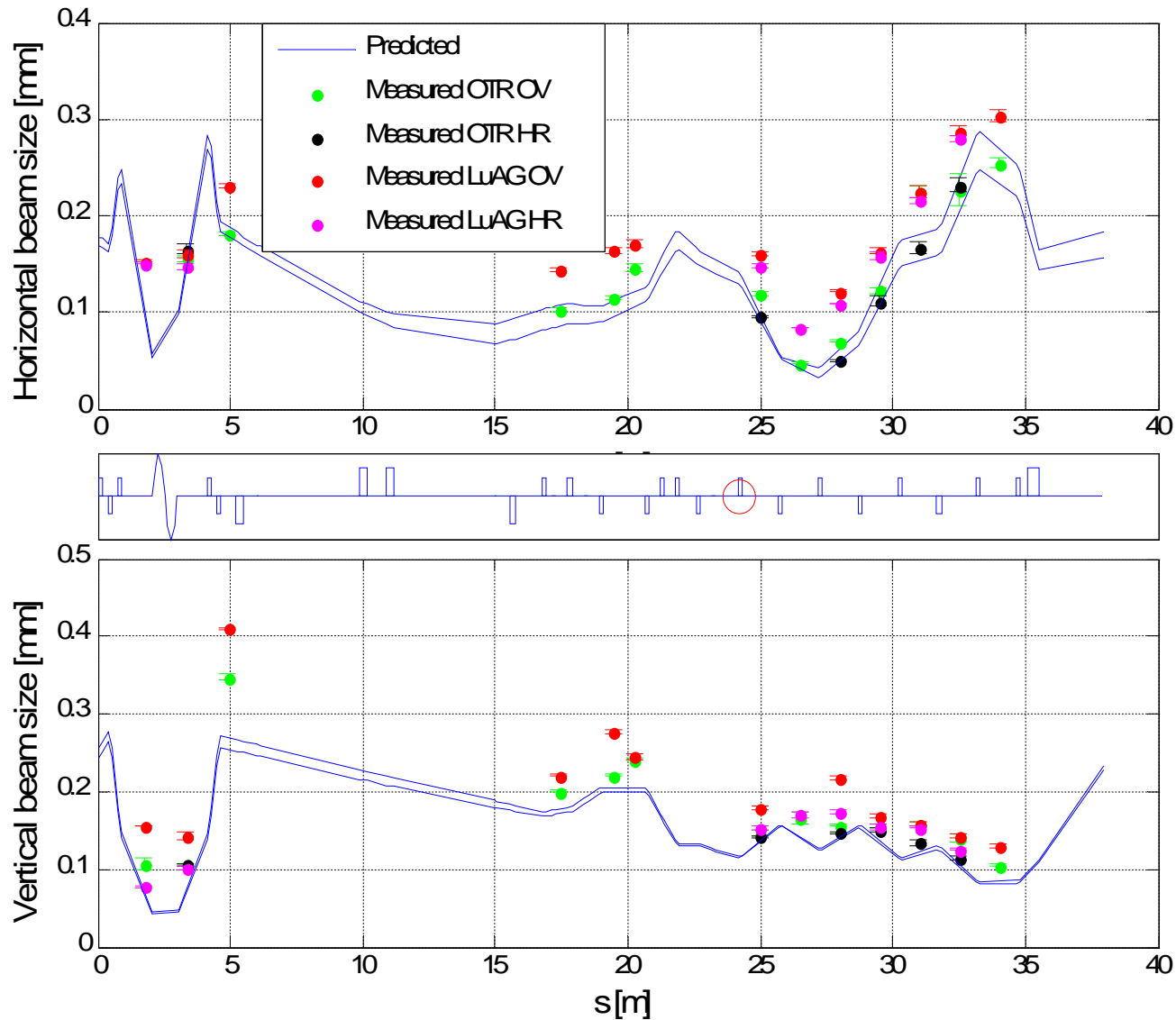


α - und β -Funktionen des SwissFEL Injektors



Courtesy E. Prat

Strahlbreite beim SwissFEL Injektor (Messung)



E. Prat

Abgleichung der Strahloptik („Matching“)

- β : eine Funktion der Teilchen oder der Maschine?

- Einerseits:
$$\beta = \frac{\langle x^2 \rangle}{\varepsilon} = \frac{\langle x^2 \rangle}{\sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}}$$

d.h. β gegeben durch die *Teilchenverteilung*

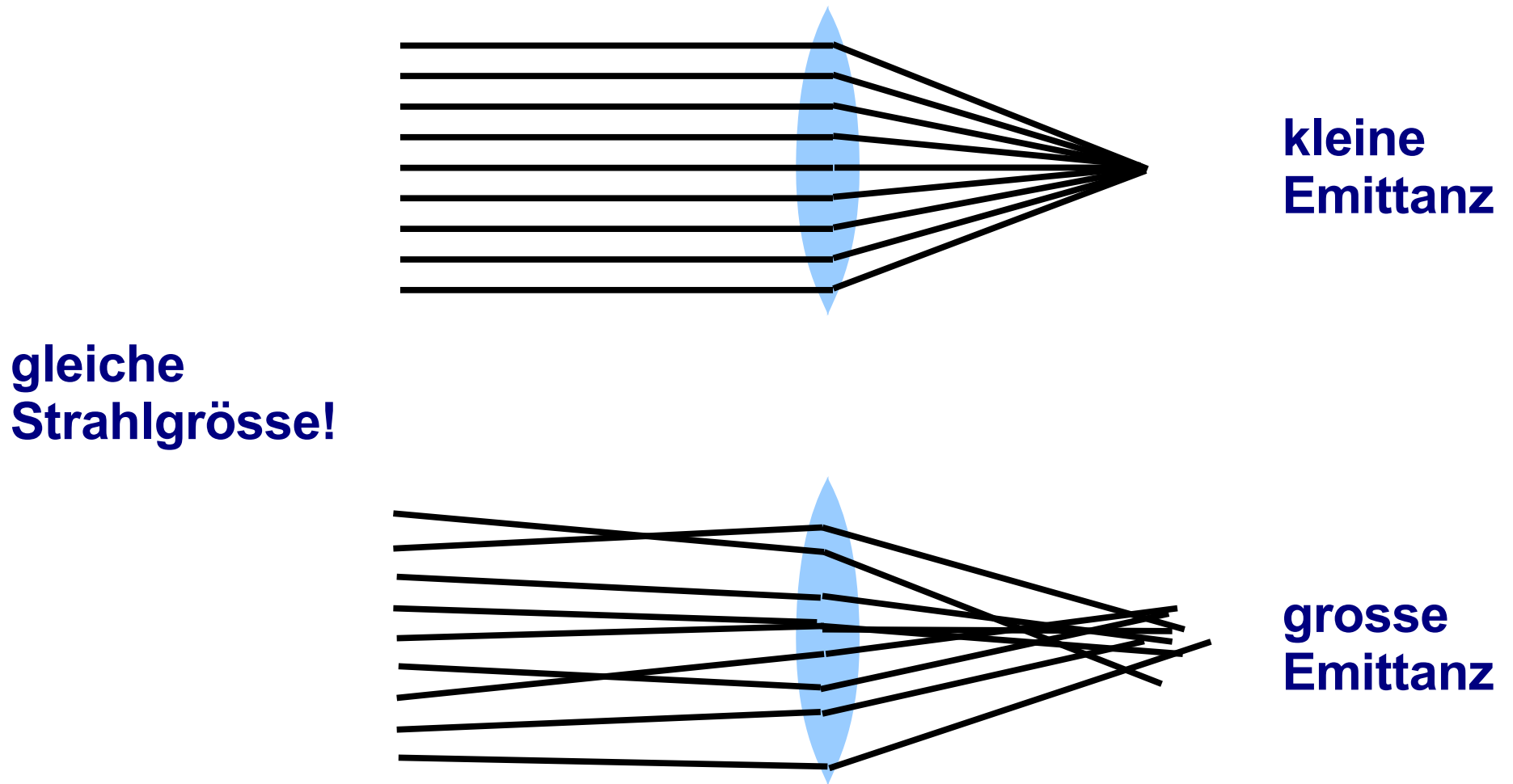
- Andererseits: $\beta(s)$ gegeben durch $k(s)$, die *Beschleunigeroptik*

→ Der Strahl muss an die Optik angepasst werden („optics matching“)

In der Praxis: eine Serie von Quadrupolen („matching quads“) wird so eingestellt, bis der Strahl die erwarteten Twiss-Parameter aufweist (Verifikation durch Messung der Strahlbreite unter verschiedener Fokussierung)

Emittanz = Parallelität, Fokussierbarkeit

Für Freie-Elektronen-Laser wichtig: kleiner Strahl, der klein bleibt! (Überlapp mit Photonen!)



Emittanz: Definition

Emittanz beschreibt, wieviel Phasenraum ein Strahlpaket einnimmt.

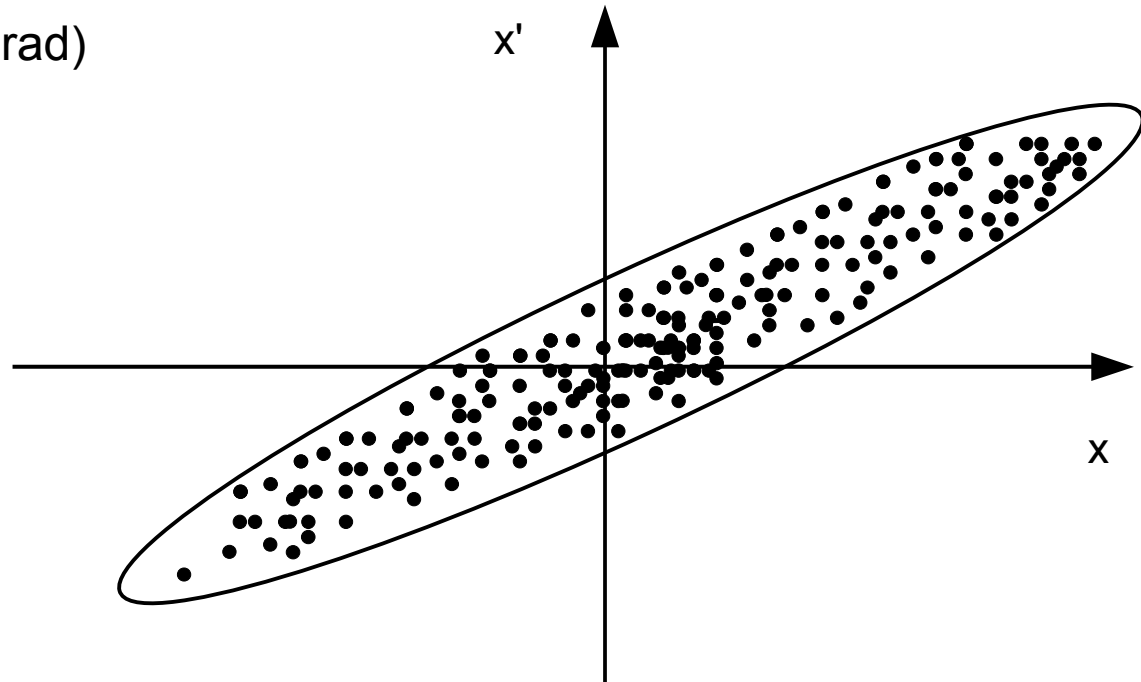
Klassische Definition (2d):

ε = Fläche der Phasenraumellipse in (x, x')

(Einheit: m rad, oder mm mrad)

Statistische Definition (2d):

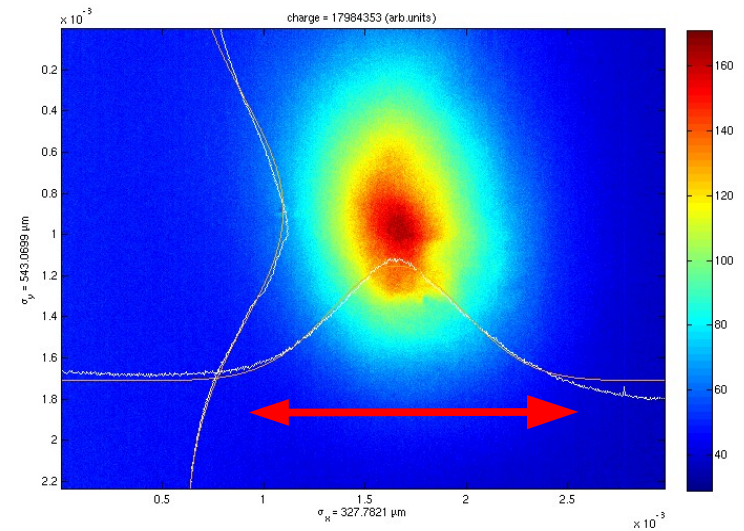
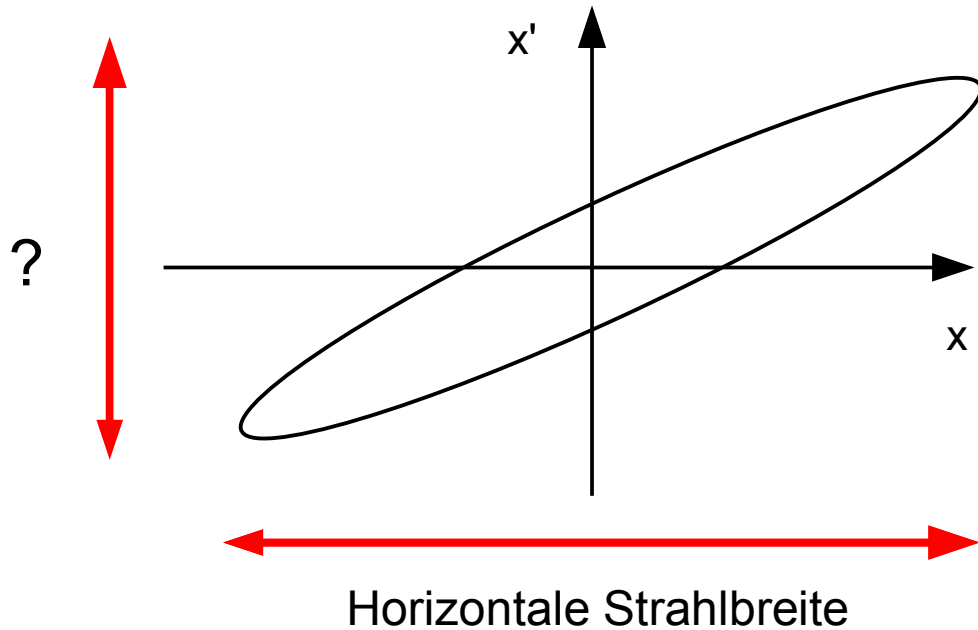
$$\varepsilon_x = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$



Messung?

Emittanz: Messung

Direkt können wir nur entlang der x-Achse messen (Strahlgrösse).

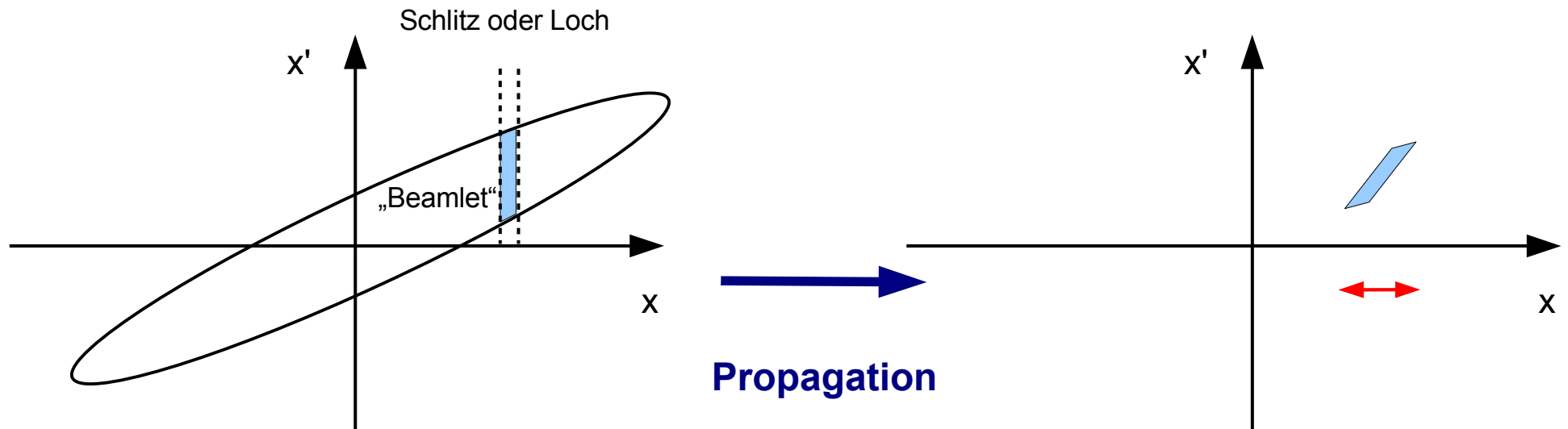


Messung der Strahlaufweitung (Divergenz) nur möglich durch *Propagation*.

Zwei Möglichkeiten:

Emittanz: Messung durch Zerlegung

1. Methode: Strahl in (horizontale und/oder vertikale) Scheiben zerlegen und die Aufweitung der entstehende „Beamlets“ beobachten.

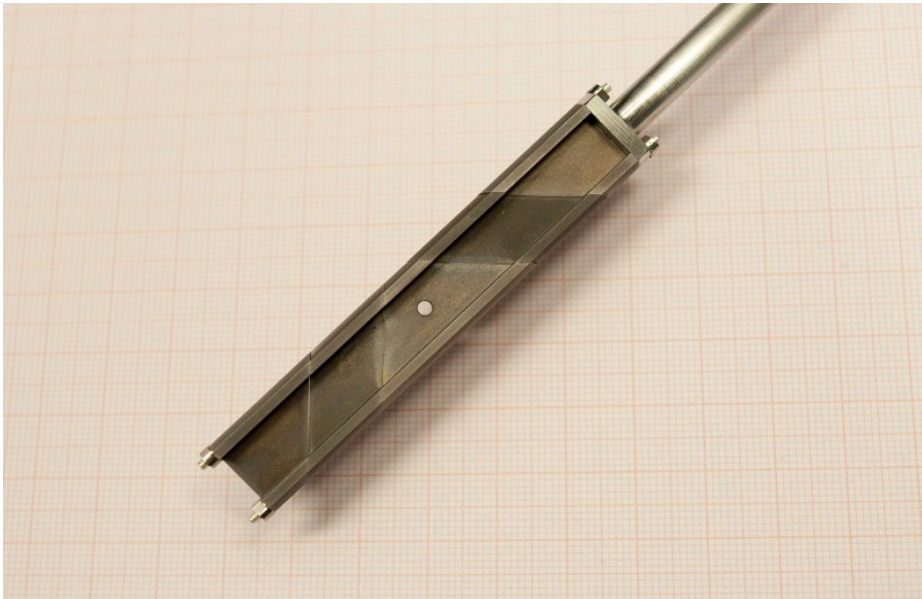


Vergleich von Beamletbreite nach einer Driftstrecke mit Schlitzbreite gibt Information über Divergenz (x')

- Einfaches Prinzip, aber teuflische Details (systematische Fehler von Schlitzbreite, Streuung an der Maske etc.)
- Geht **nur bei niedrigen Energien** (sonst Maske futsch!)

Schlitze und Löcher

Schlitzmaske



Wird durch den Strahl gefahren.

Messung nur in einer Dimension und über mehrere Bunches.

„Pepperpot“



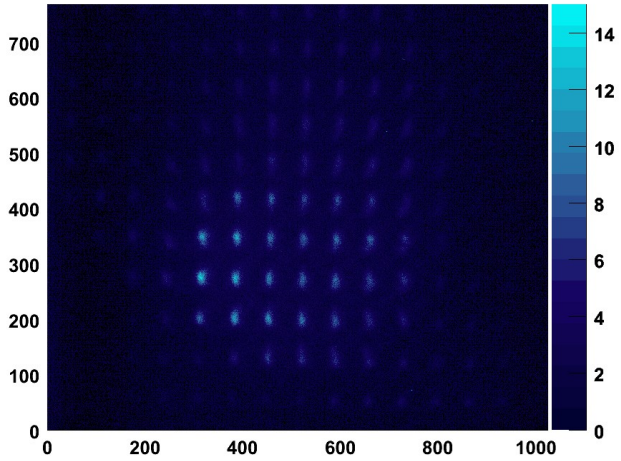
Messung in beiden Dimensionen mit einem Bild!

Nachteil: Beamlets können überlappen!

Installiert in SwissFEL Injektor Testanlage!

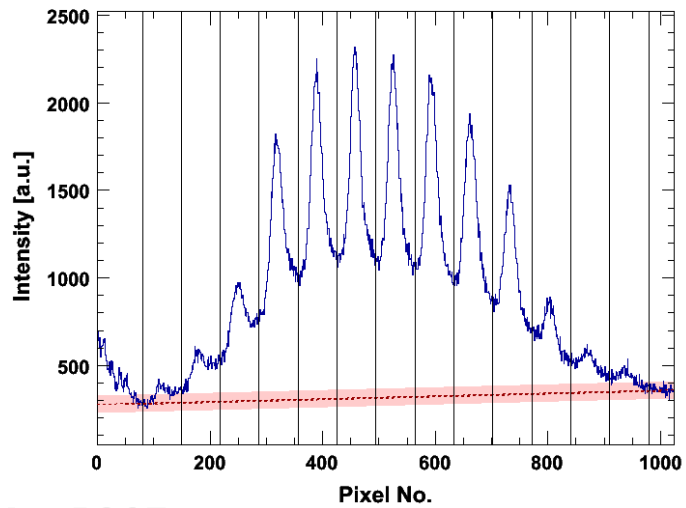
„Pepperpot“-Messung

Pepperpot_18:06_PPT_60_FSC_60_TS_3p7.pgm Wed Apr 9 15:35:17 2008



XanaROOT

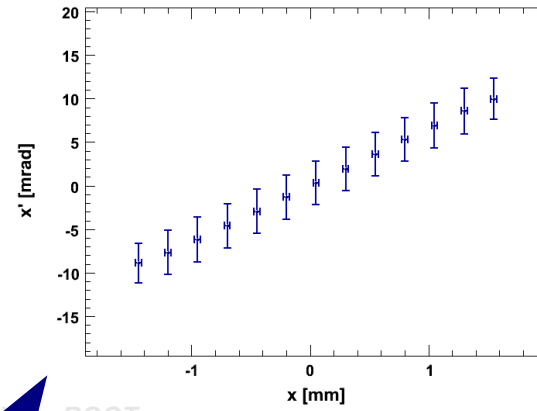
Pepperpot_18:06_PPT_60_FSC_60_TS_3p7.pgm (X) Wed Jun 25 15:18:01 2008



XanaROOT

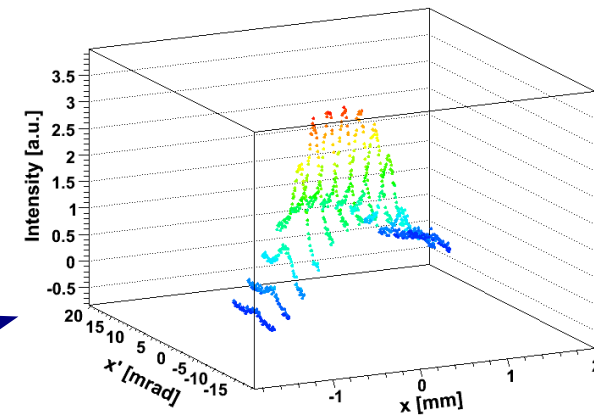
Pepperpot_18:06_PPT_60_FSC_60_TS_3p7.pgm (phase space, X)

Wed Jul 23 08:57:31 2008



Pepperpot_18:06_PPT_60_FSC_60_TS_3p7.pgm (phase space density, X)

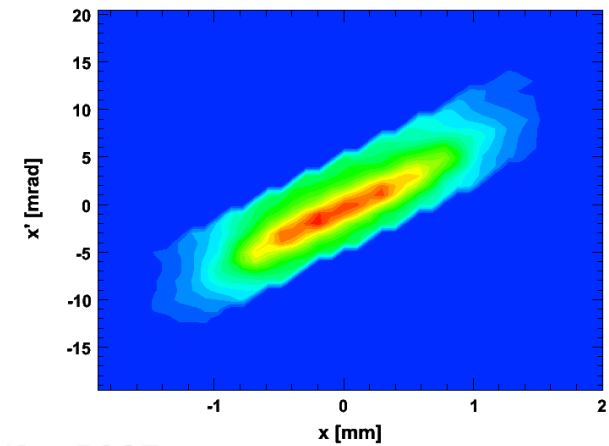
Wed Jul 23 08:57:45 2008



XanaROOT

Pepperpot_18:06_PPT_60_FSC_60_TS_3p7.pgm (phase space density, X)

Wed Jul 23 08:58:38 2008



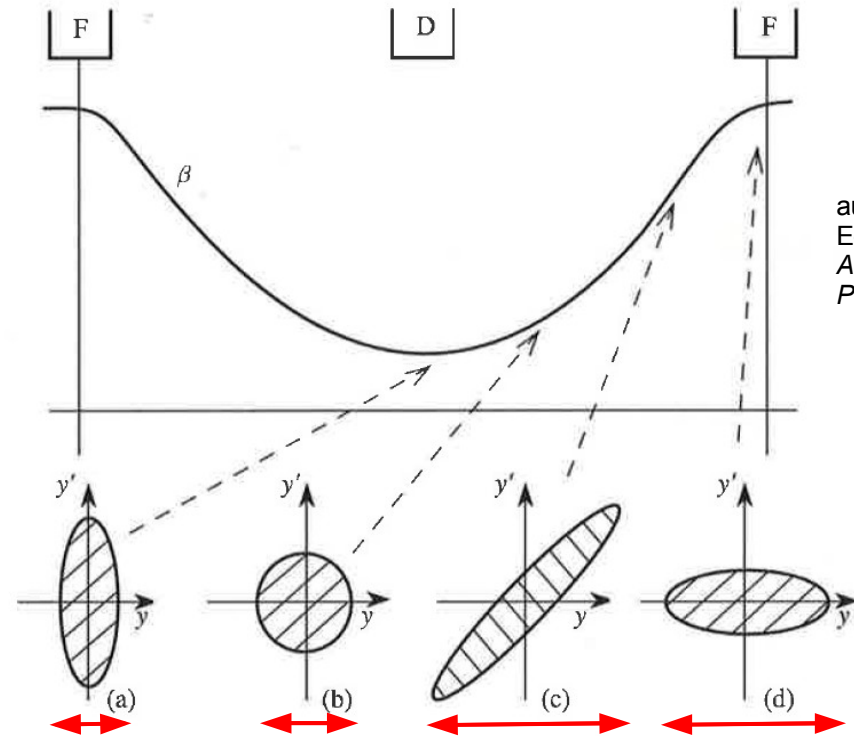
XanaROOT

Emittanz: strahloptische Messung

2. Methode: den ganzen Strahl propagieren lassen und die Strahlbreite als Funktion der Distanz („Envelope-Scan“) oder als Funktion der Fokussierung (Quadrupol-Scan) messen.

Beispiel: FODO-Zelle

Abfolge von Fokussierenden und Defokussierenden Quadrupolen – Standardanordnung in Speicherringen



aus:
Edmund Wilson,
*An introduction to
Particle Accelerators*

Voraussetzungen:

- Gute Kenntnis der Strahloptik
- Keine Raumladungseffekte (d.h. relativ hohe Energie)

Fig. 4.2 How the conserved phase space appears at different points in a FODO cell. The development of a constant-emittance beam in phase space at (a) a narrow waist, (b) and (c) places where the beam is diverging, and (d) at a broad maximum at the centre of an F lens.

Entscheidender Parameter in beiden Fällen (Envelope- und Quadrupol-Scan):
Phasenvorschub der Betatron-Schwingung

Envelopen- und Quadrupolscan

- Aus der Transportgleichung ergibt sich sofort für das Quadrat der Strahlbreite σ_{11} :

$$\sigma_{11,f} = R_{11}^2 \sigma_{11,i} + 2R_{11}R_{12} \sigma_{12,i} + R_{12}^2 \sigma_{22,i}$$

- Wenn wir die Strahlbreite genug oft (mind. dreimal) unter verschiedenen Transportbedingungen messen, können wir σ_{11} , σ_{12} , σ_{22} rekonstruieren und daraus die Emittanz berechnen!
- Beispiel: Drift der Länge L :

$$\sigma_{11,f} = \sigma_{11,i} + 2L\sigma_{12,i} + L^2\sigma_{22,i}$$

- Einfacher Quadrupol-Scan: $R = R_L R_Q$, dann $\sigma_{11,f} = f(k) = \dots$ (Hausaufgabe auf morgen!), siehe auch M.C. Ross et al., Proceedings PAC1987.
- Wir werden die Strahlbreite bei verschiedener Fokussierung messen und so die Emittanz bestimmen!

Optische Messungen in der Praxis

- **Einfacher Quadrupolscan:**

- Simpel, Strahloptik muss nicht genau bekannt sein
- Abtastung des Phasenvorschubs jedoch nicht ideal
- grösste Phasenabdeckung im Fokus, wo der Strahl am kleinsten ist!
- Auflösungslimitiert im Fokus, Raumladungseffekte

**Unsere Messung
morgen!**

- Besser (und ursprünglich vorgesehen für SwissFEL): **FODO-Scan**
(= Envelopenscan in FODO-Sektion)

- exakt bekannter, regelmässiger Phasenvorschub.
- Gleiche Strahlgrösse bei allen Messungen.
- Aber: sehr aufwendig (zeitintensiv): sieben Schirme müssen eingefahren werden, kalibriert sein etc.
- Relativ wenig Messpunkte.

- Noch besser: **Multiquadrupol-Scan**

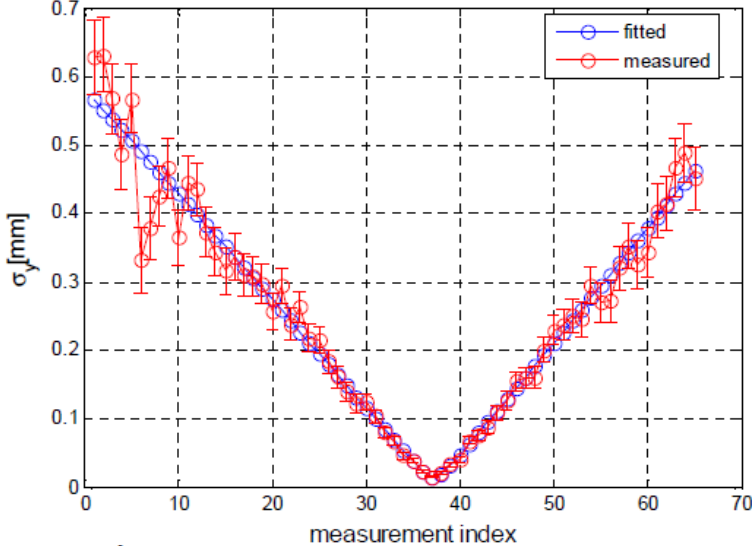
- Fast beliebig wählbarer Phasenvorschub.
- Beliebige viele Messpunkte.
- Strahlbreite kann ungefähr konstant gehalten werden.
- Nur ein Schirm wird verwendet (Vor- und Nachteil...)

- Am besten: **Einzel-Quadrupol-Scan mit symmetrisierter Optik** (E. Prat, 2012)

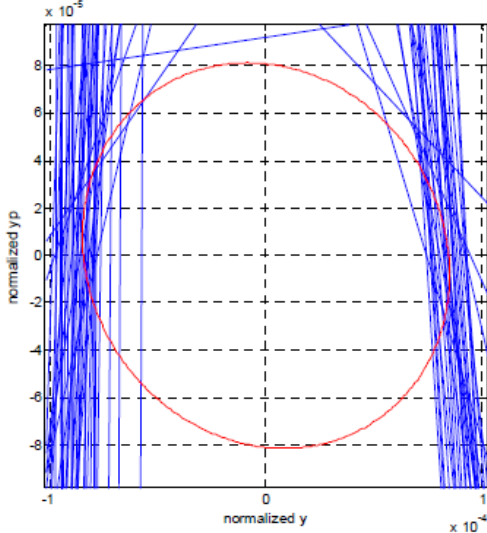
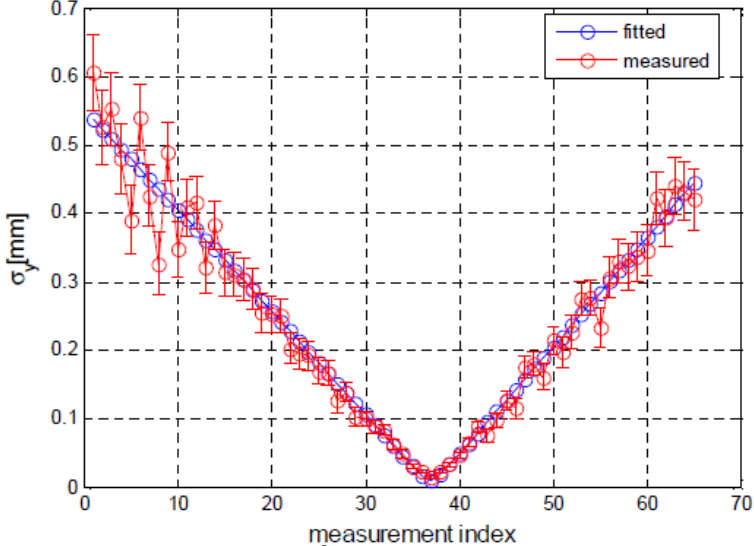
- Gleiche Vorteile wie Multiquadrupol-Scan
- Zusätzlich: gleichzeitige Messung in x und y dank besonders ausgeklügelter Optik

Beispiel Quadrupol-Scan

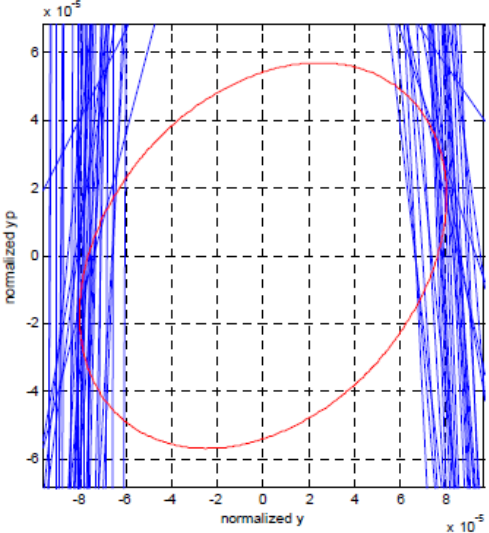
$\epsilon_y = 2.01741e-006, \beta_y = 35.4528, \alpha_y = 0.943368$
 $\epsilon_{y0} = 2e-006, \beta_{y0} = 33.689, \alpha_{y0} = 0.80168$



$\epsilon_y = 1.28118e-006, \beta_y = 50.1555, \alpha_y = 0.869713$
 $\epsilon_{y0} = 2e-006, \beta_{y0} = 33.689, \alpha_{y0} = 0.80168$

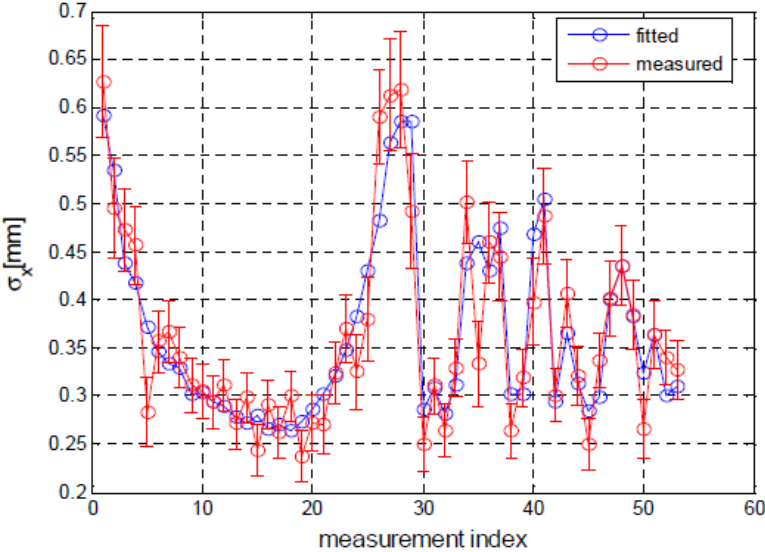


Beam size error = 10%
 $\Delta k = 0.25$ (0.43A for 150 MeV)
 Very sensitive to measurement
 in the waist
 Much higher errors than with
 phase-advance scan

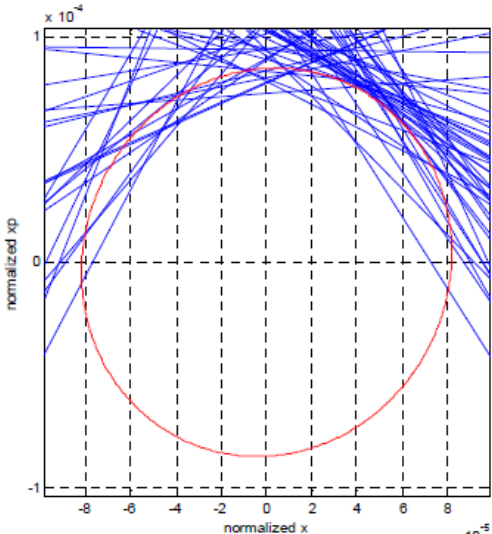
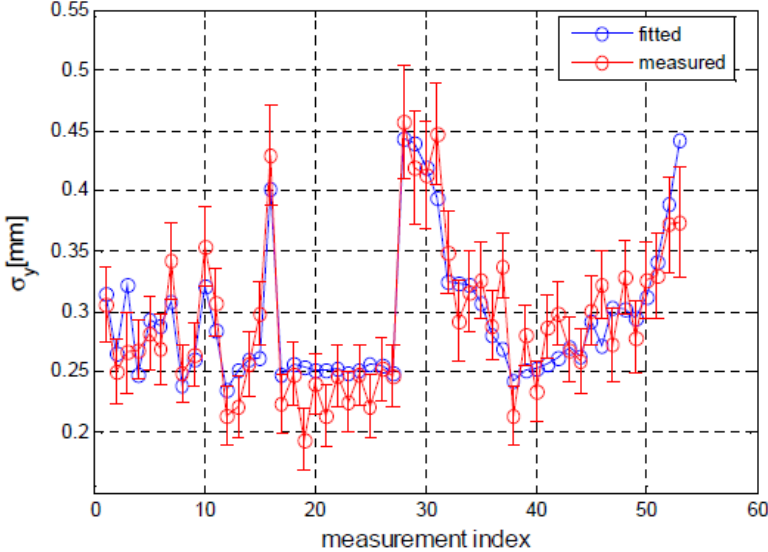


Beispiel Multiquad-Scan

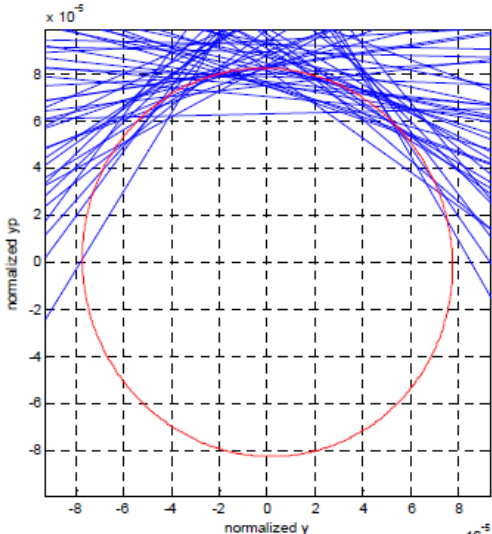
$\epsilon_x = 2.07065e-006, \beta_x = 32.5437, \alpha_x = 0.703845$
 $\epsilon_0 = 2e-006, \beta_0 = 34.04, \alpha_0 = 0.7893$



$\epsilon_y = 1.87784e-006, \beta_y = 31.6294, \alpha_y = 0.773866$
 $\epsilon_0 = 2e-006, \beta_0 = 33.689, \alpha_0 = 0.80168$

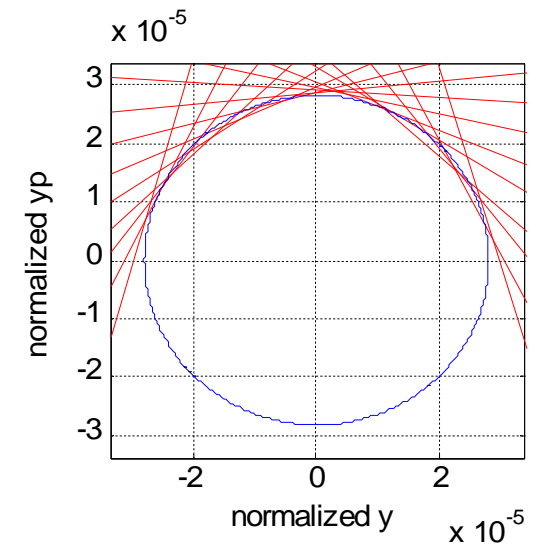
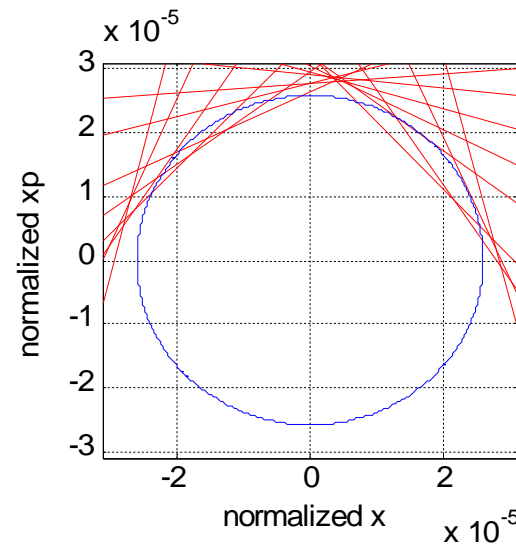
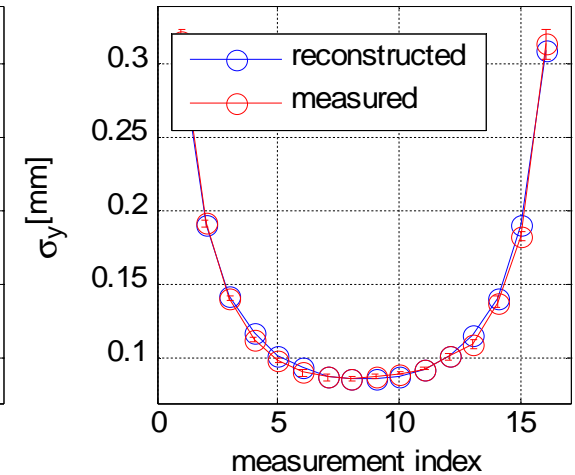
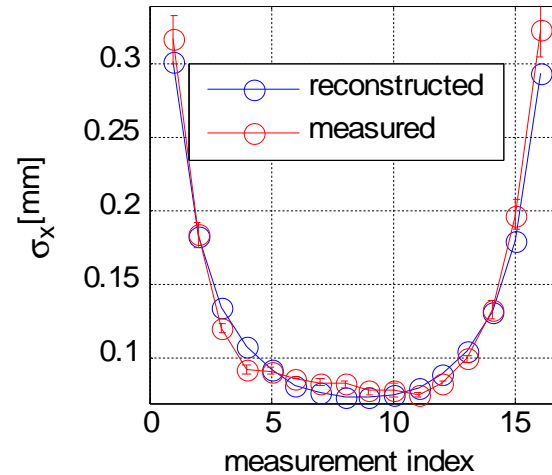


Beam size error = 10%
 Small errors in reconstructing
 emittance and optics

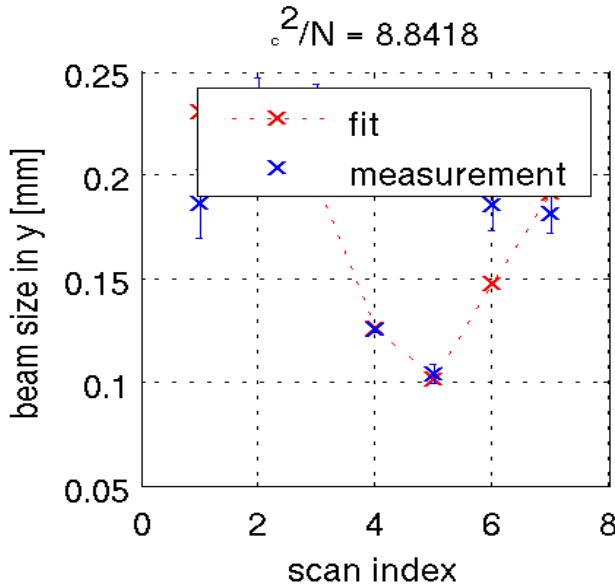
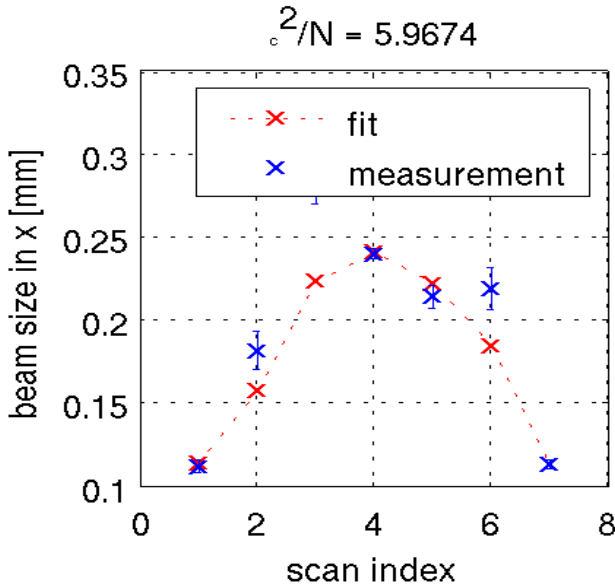
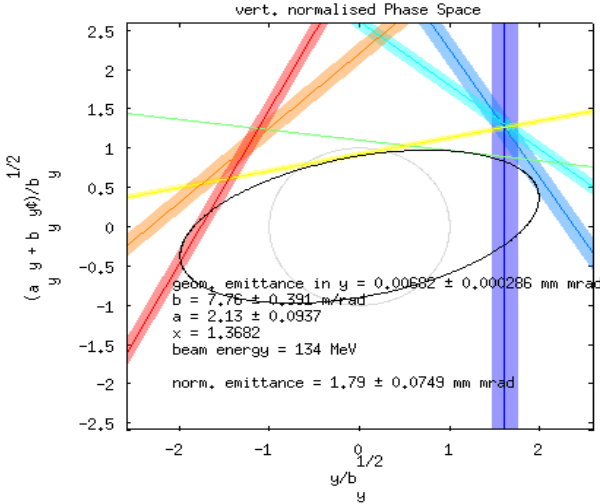
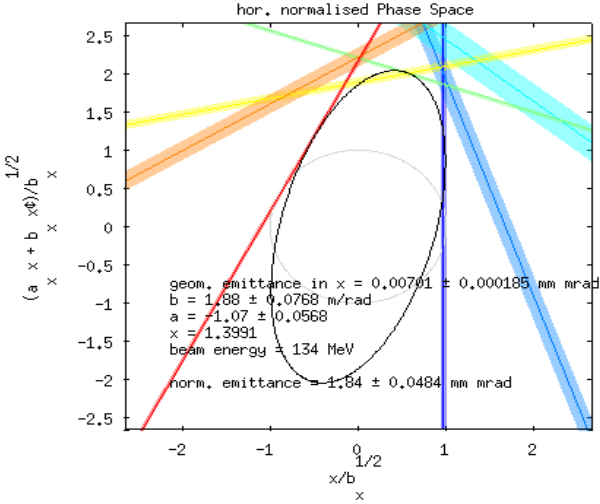


Beispiel Prat-Scan

- Gleichzeitige Fokussierung in x und y
- Operateur sieht auf einen Blick, ob die Strahloptik gut abgestimmt ist

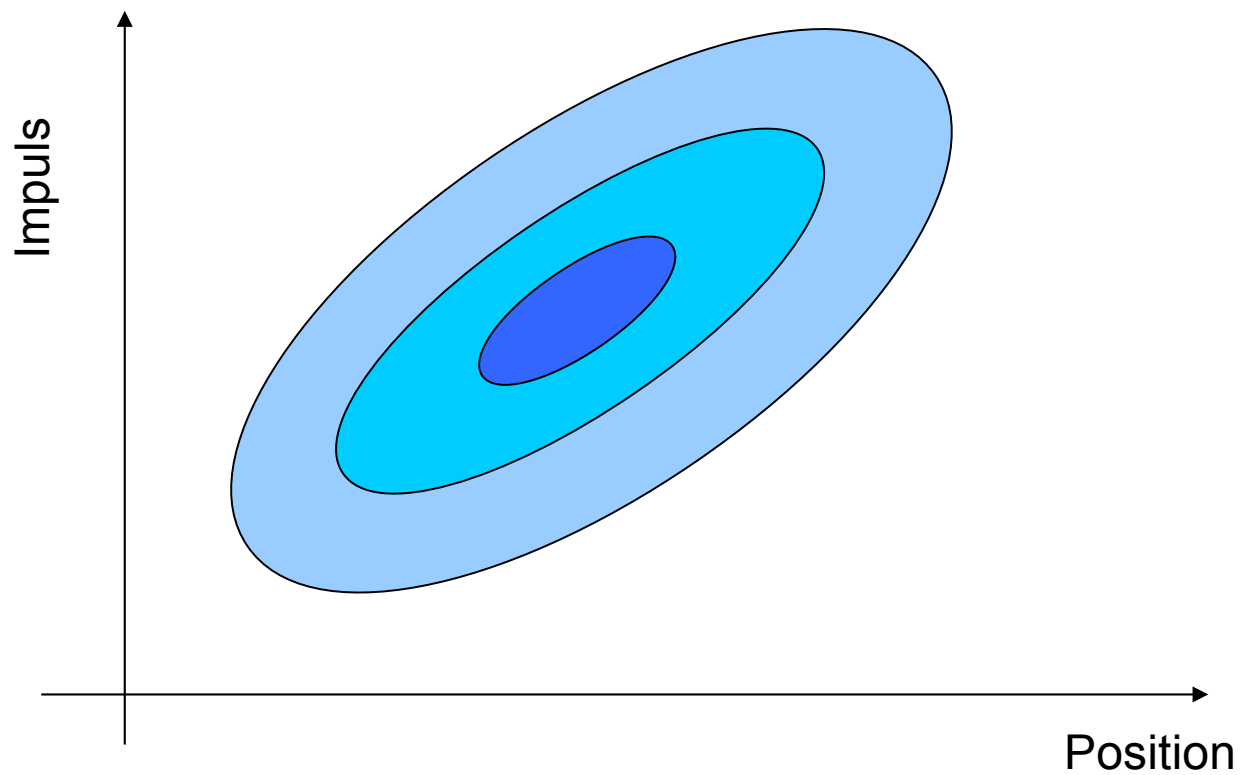


Beispiel FODO-Scan



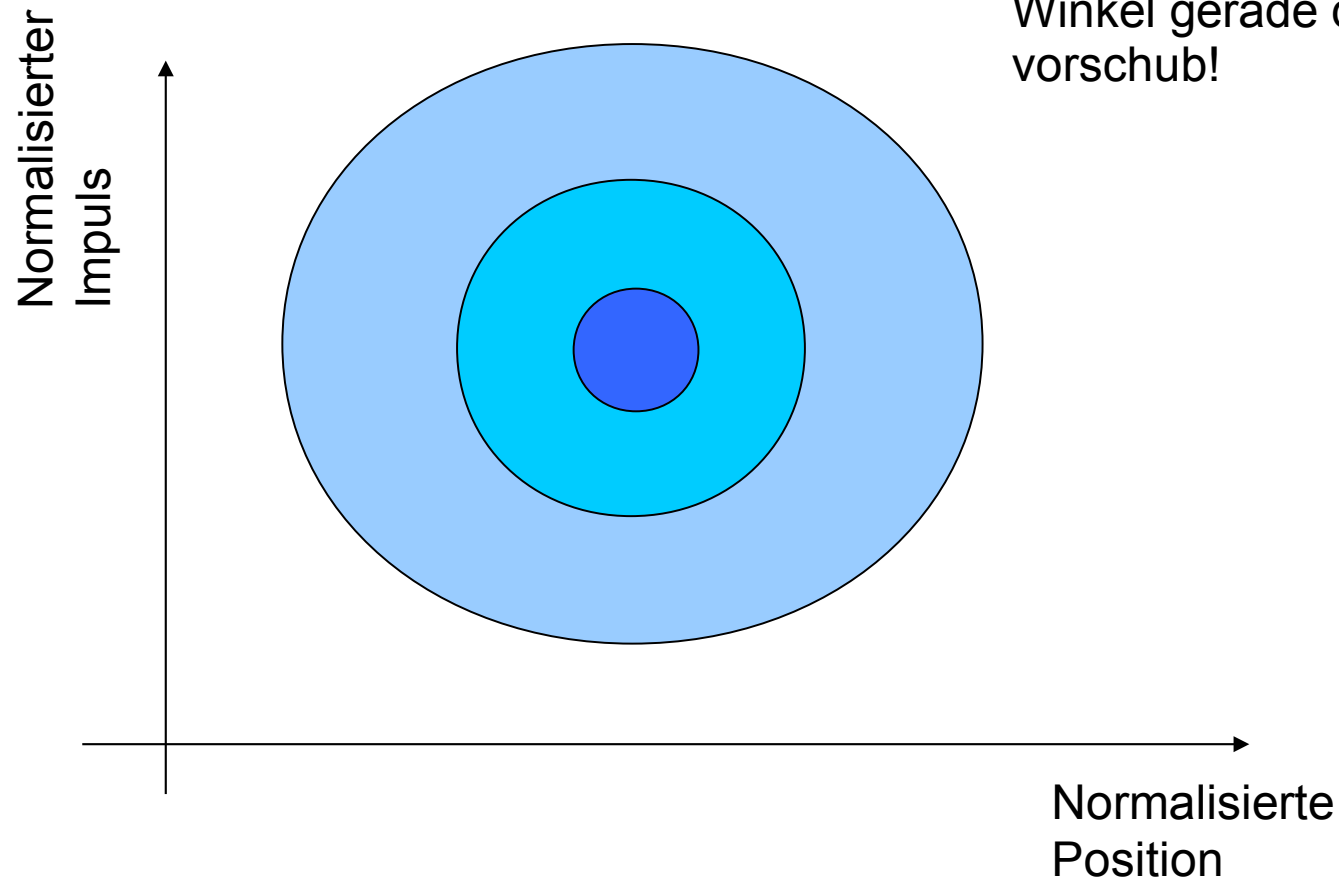
Prinzip optischer Messung

(was bedeuten die Kreise mit den vielen Tangenten?)



Courtesy B. Beutner

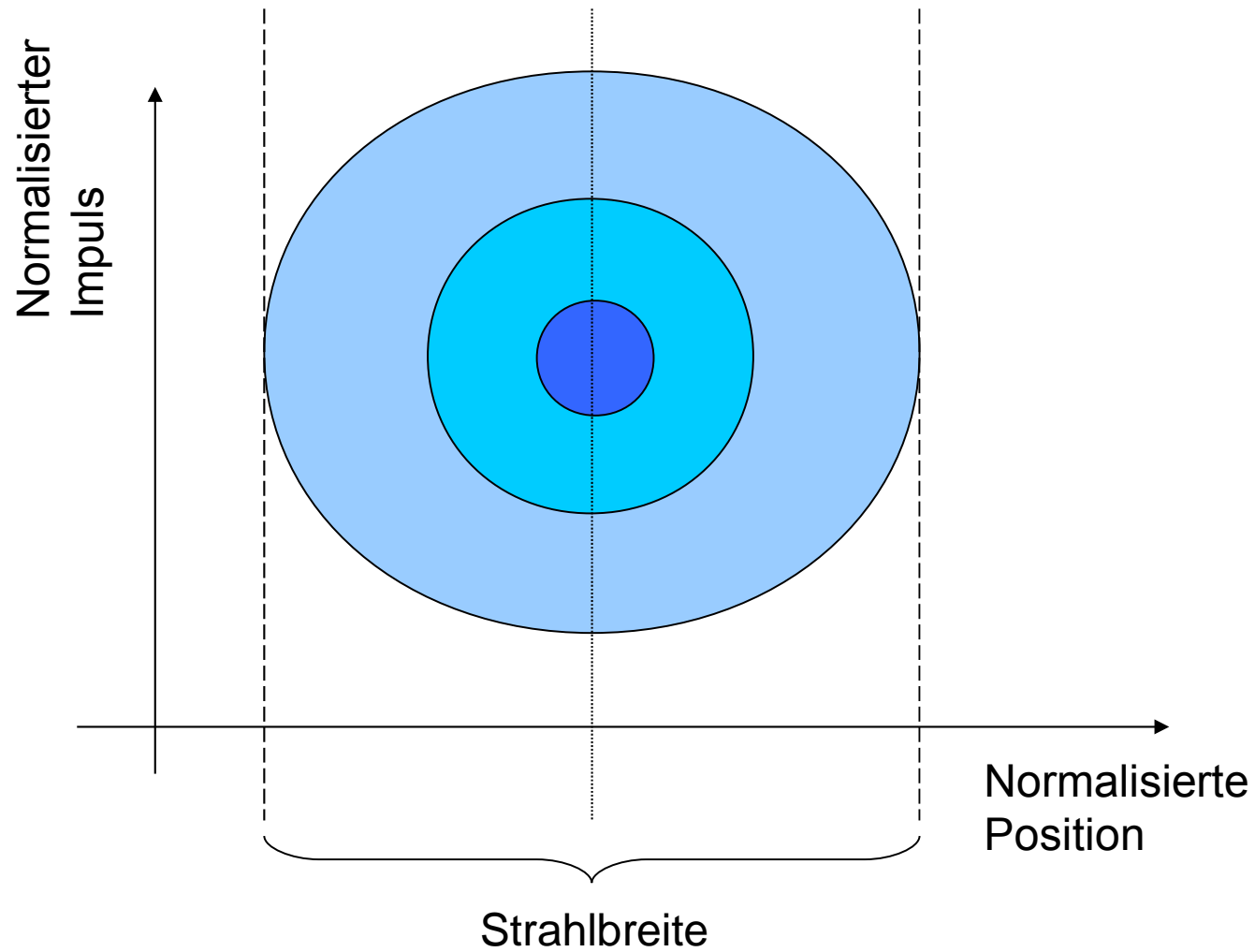
Prinzip optischer Messung



Nach Normalisierung des Phasenraums entspricht eine Rotation um einen Winkel gerade dem Phasenverschiebung!

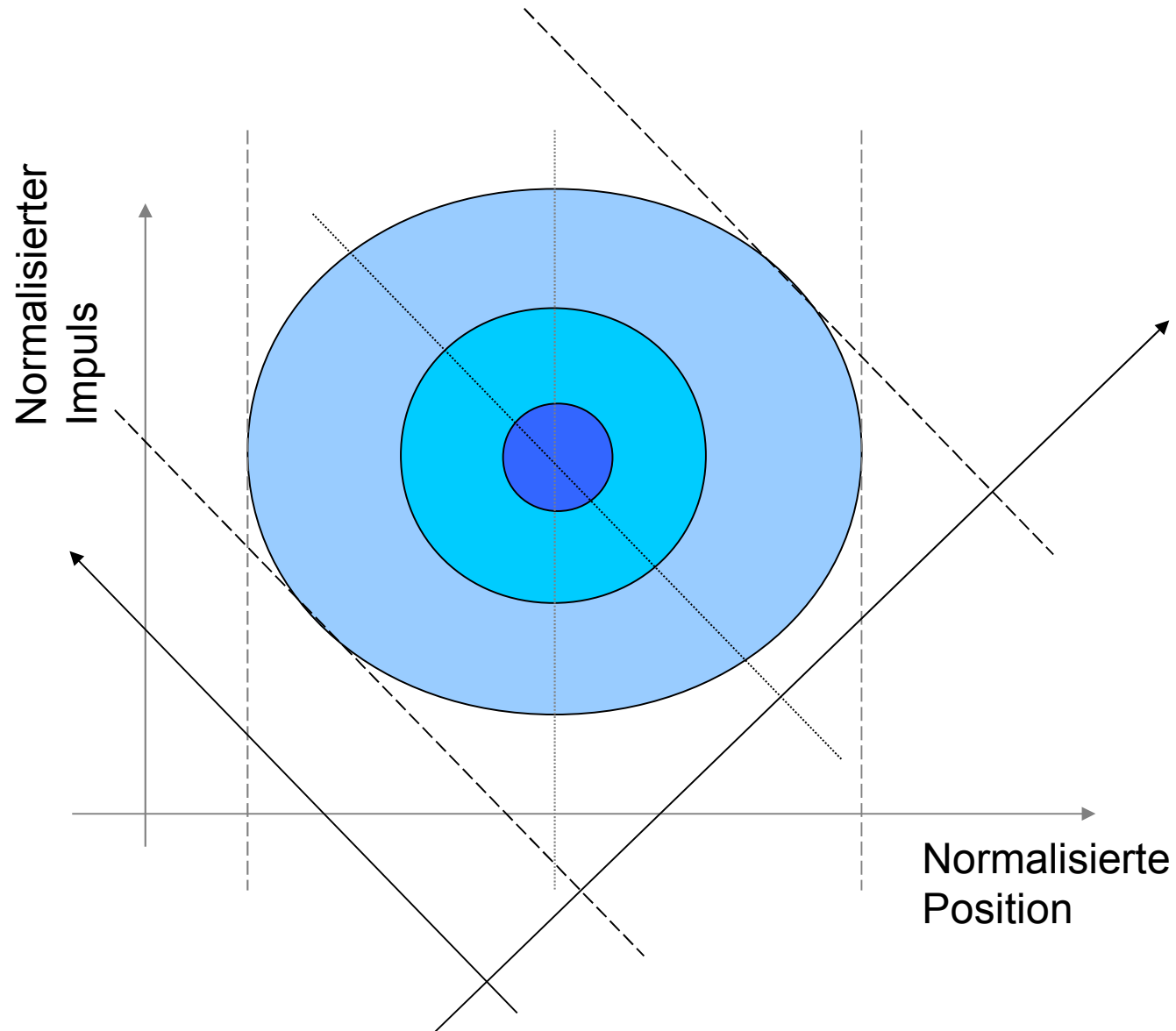
Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung



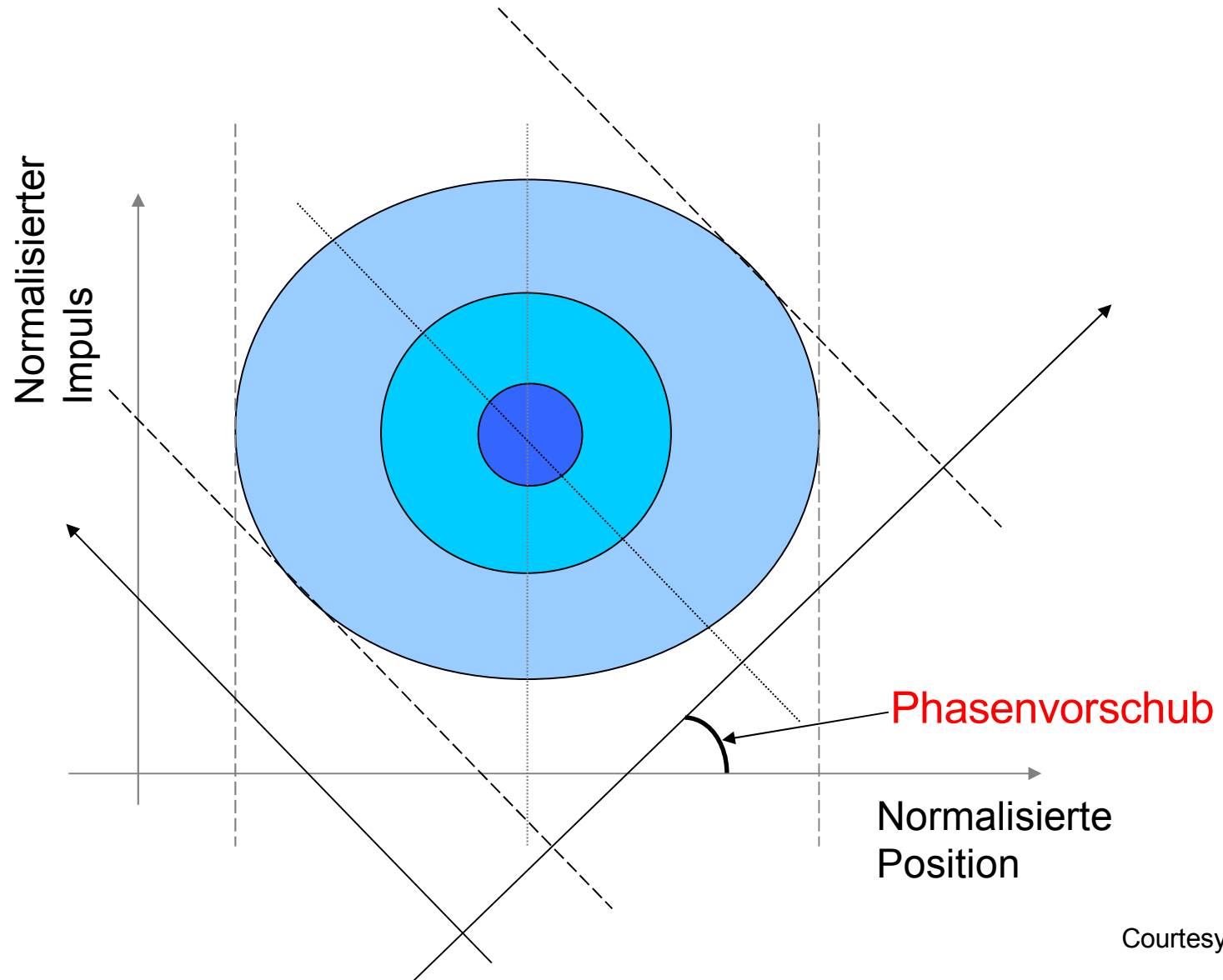
Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung



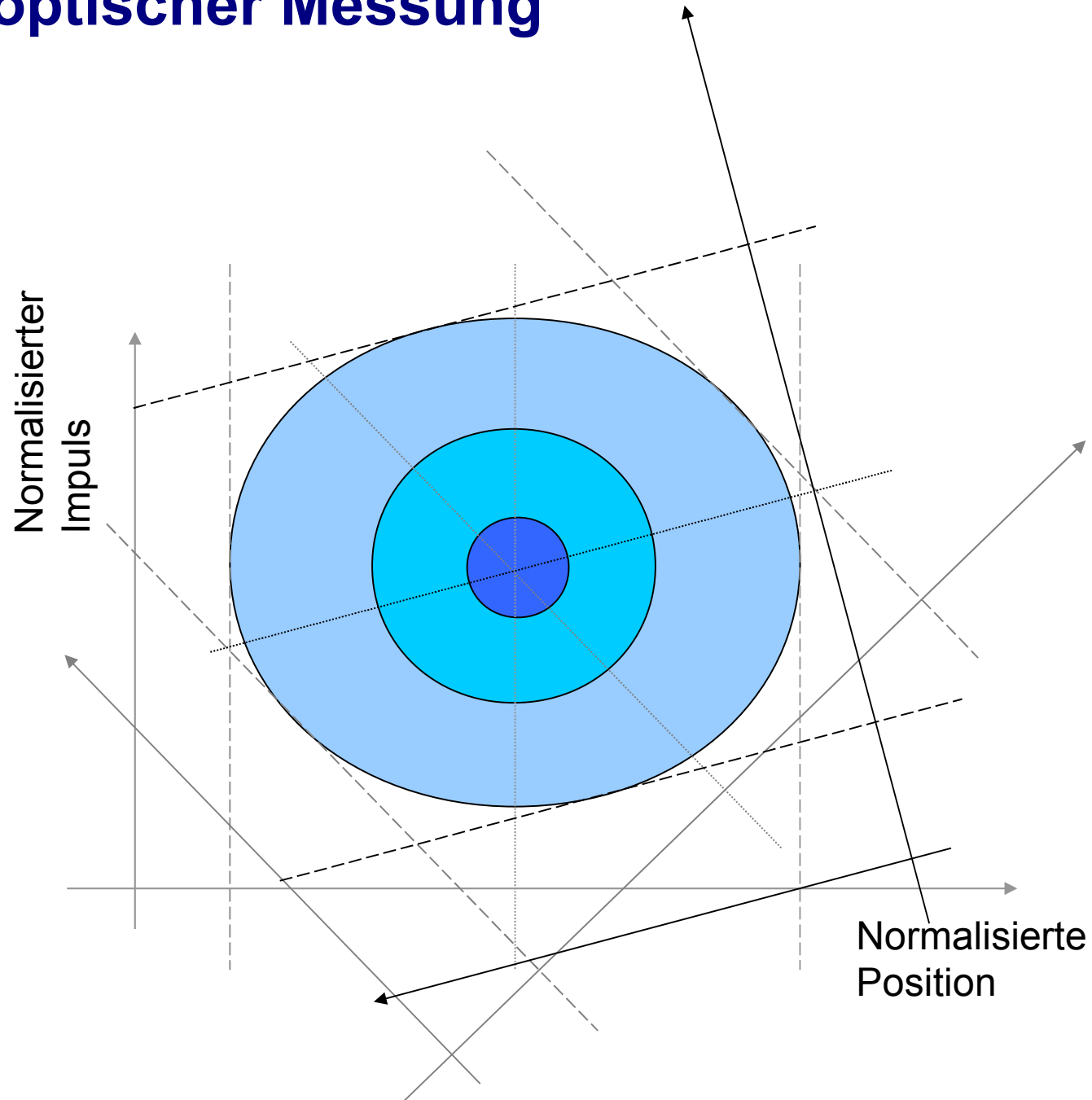
Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung



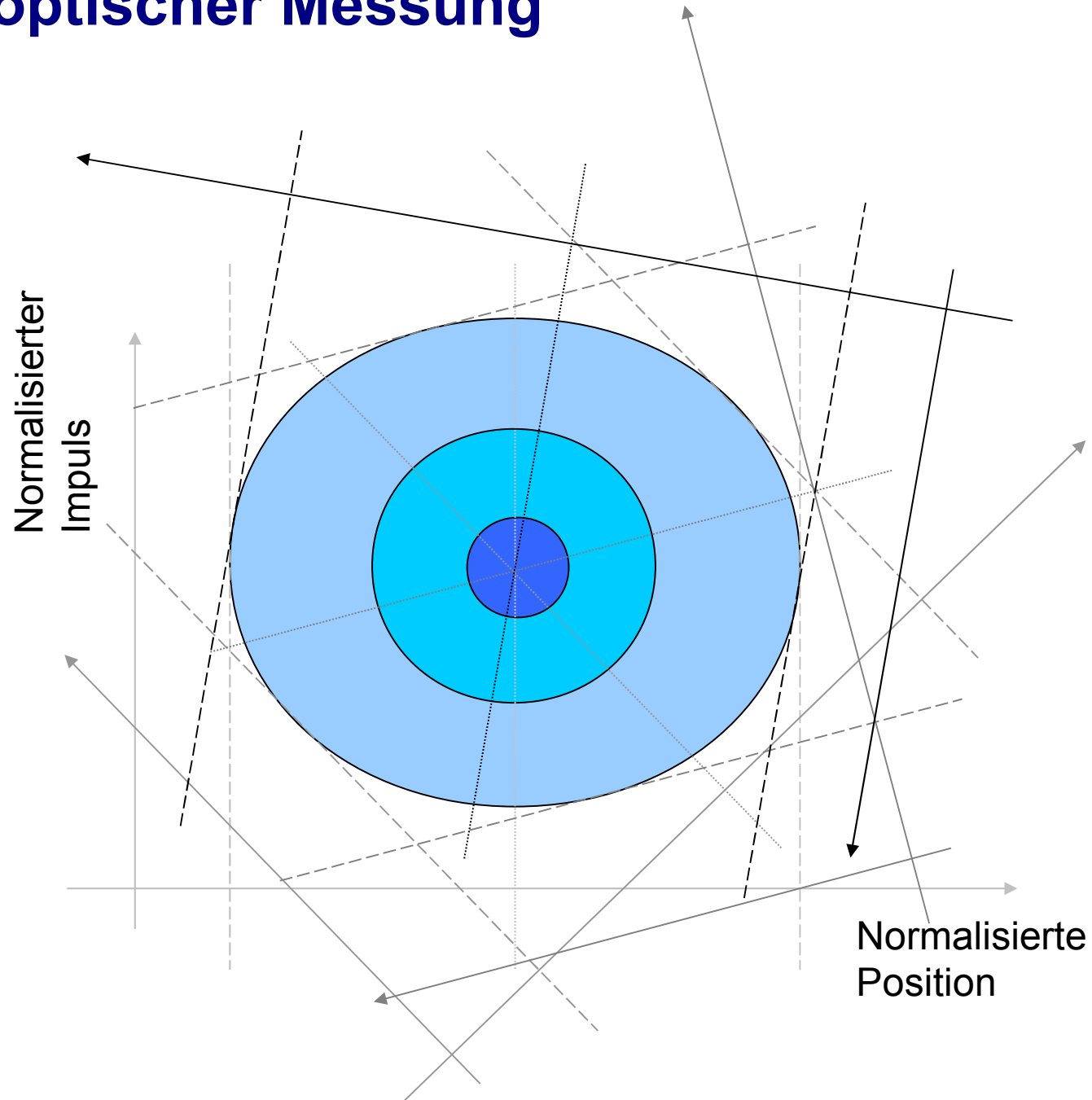
Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung



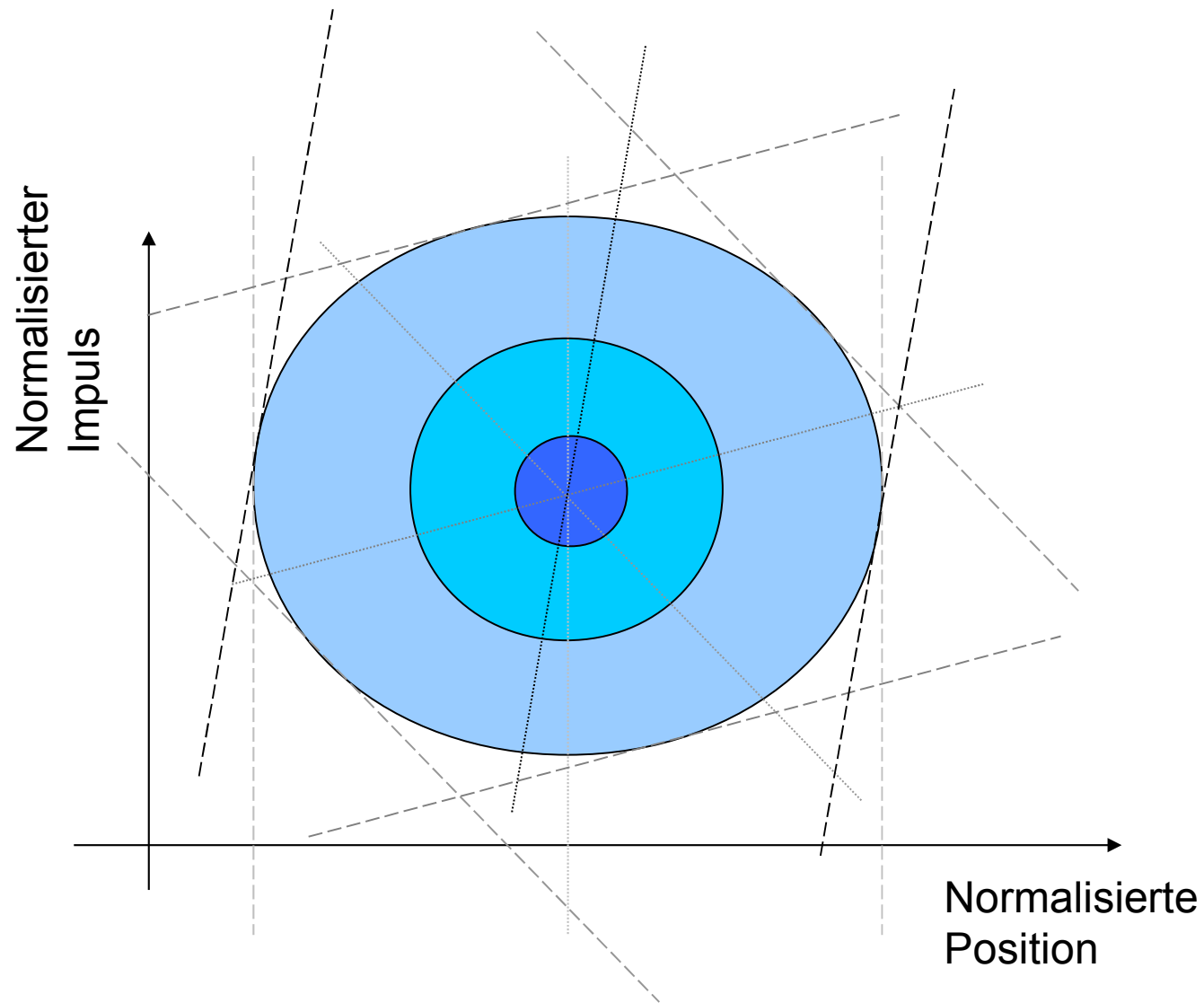
Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung



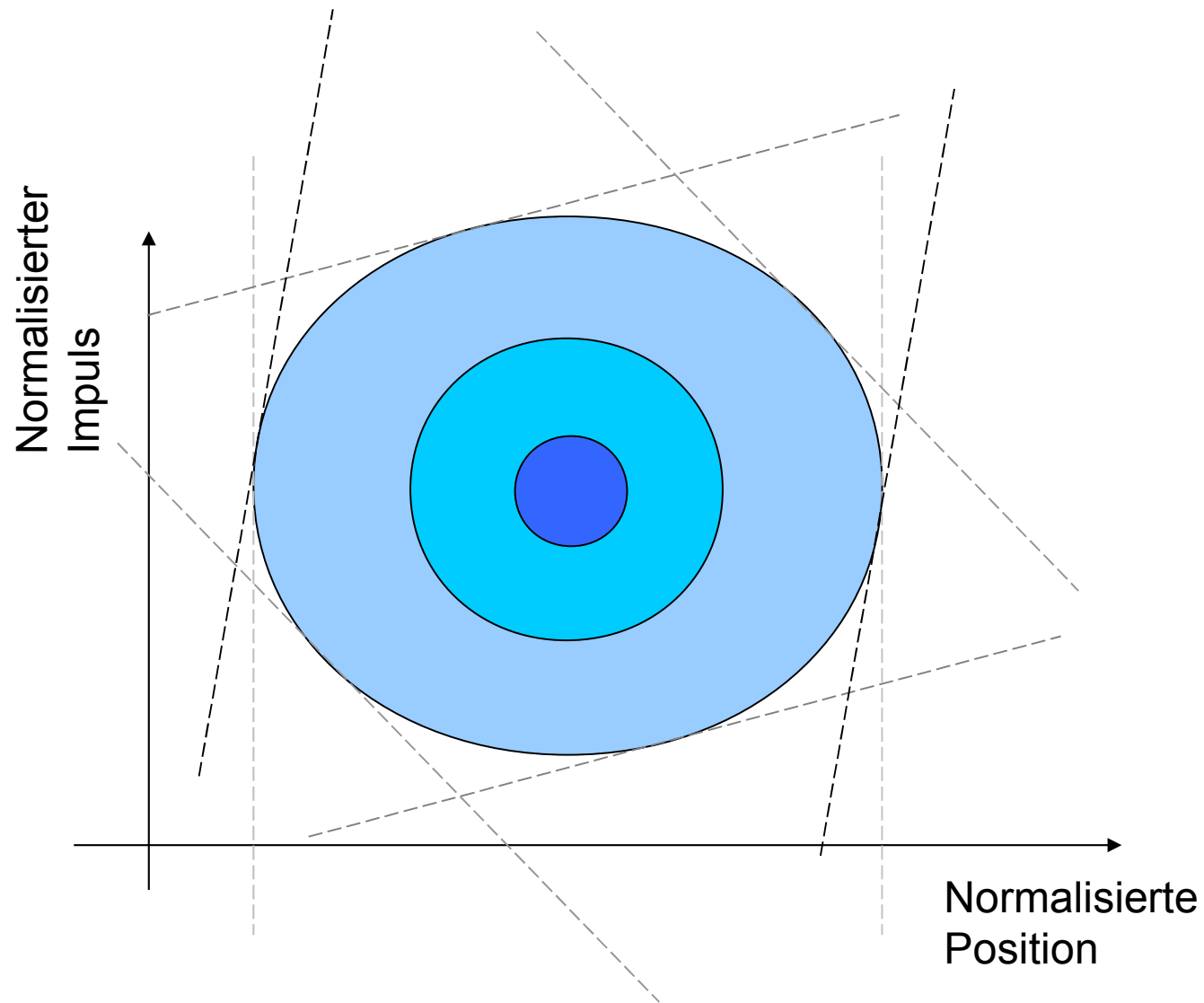
Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung



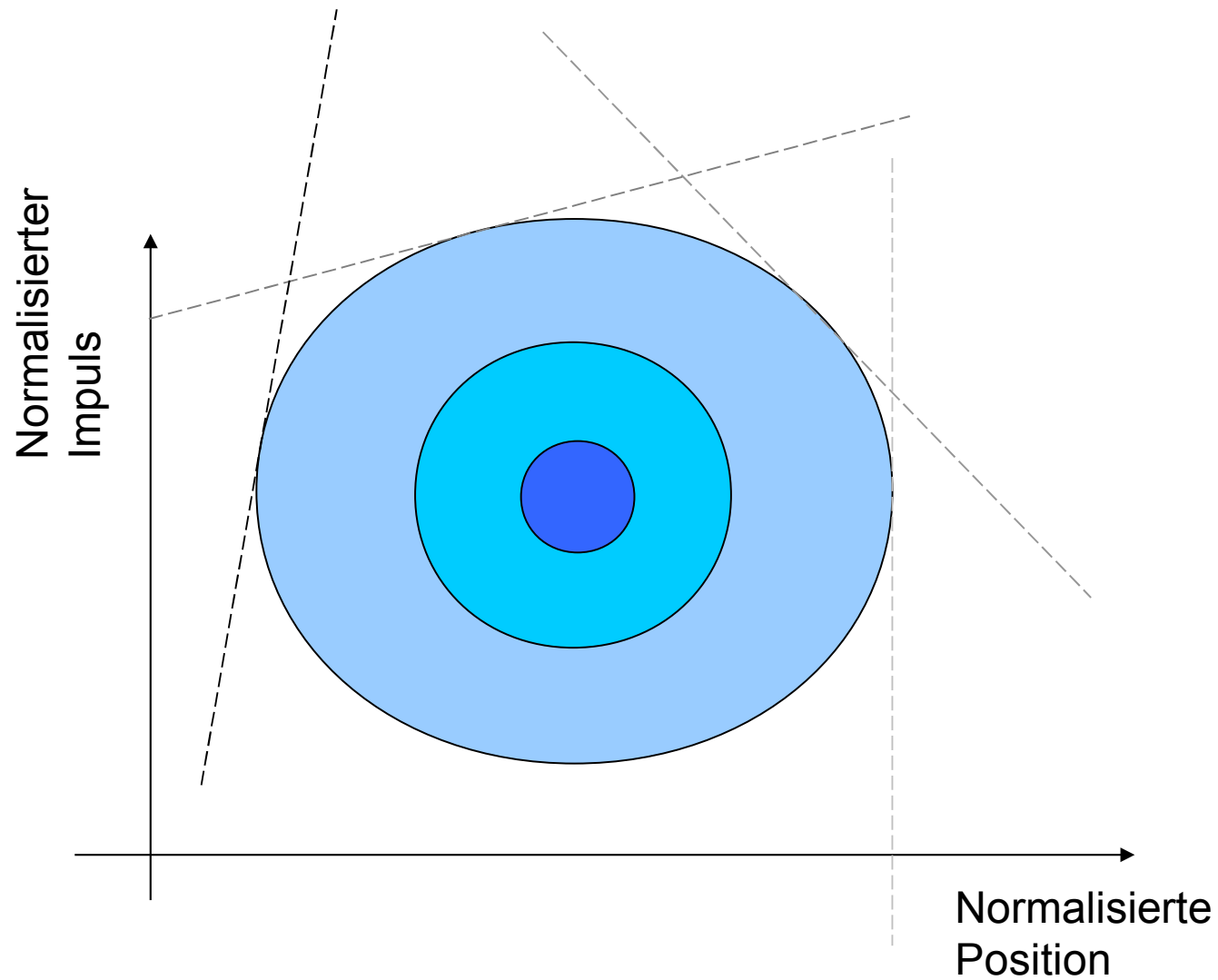
Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung



Courtesy B. Beutner

Prinzip optischer Messung

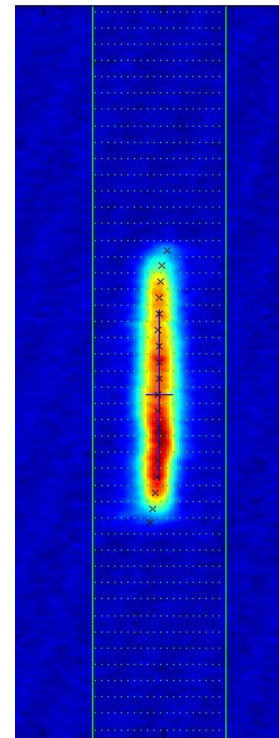
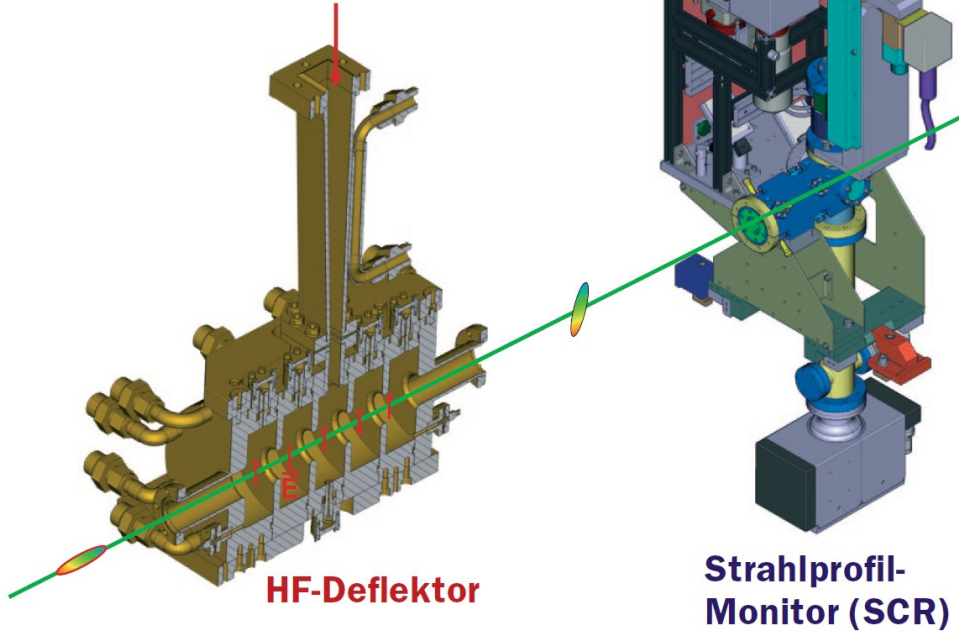


Courtesy B. Beutner

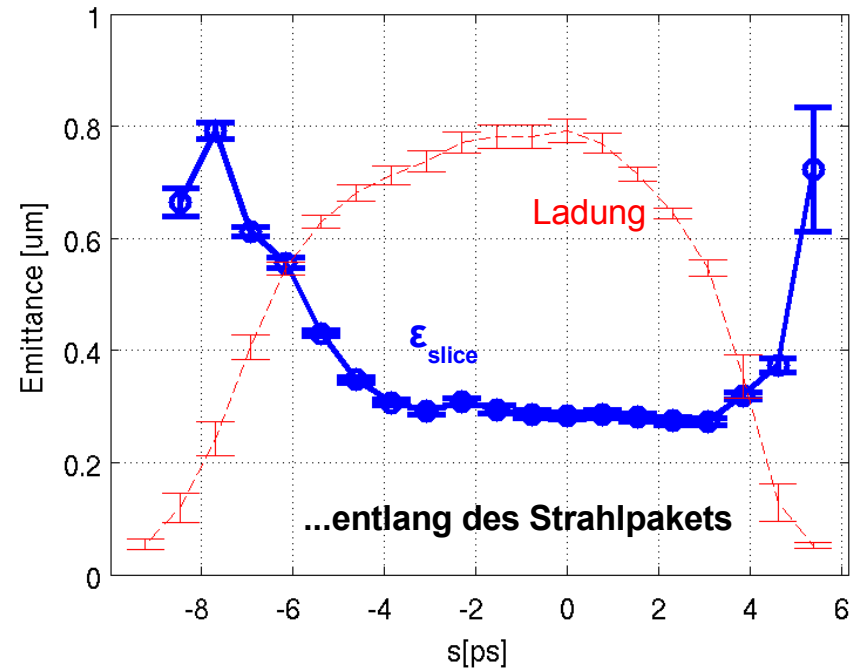
Slice-Emittanz

streak...

Mikrowellen
(4.5 μ s, 5 MW)



...slice...



...and
analyze

Messungen morgen

- **Gun setup:**
 - Betriebsphase (Schottky-Scan)
 - Energie (Spektrometer)
- **Orbit steering (one-to-one)**
- **Endenergie**
- **Emittanz (Quadrupol-Scan)**
- **Bunch-Länge, Slice-Emittanz***

* falls Zeit erlaubt