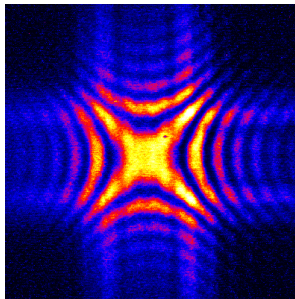
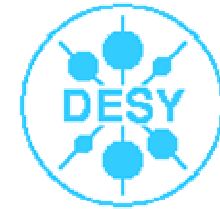


RWTH



Räumliche Kohärenz des Freie-Elektronen-Lasers an der TESLA-Test-Anlage

Rasmus Ischebeck

Räumliche Kohärenz des Freie-Elektronen-Lasers bei TTF

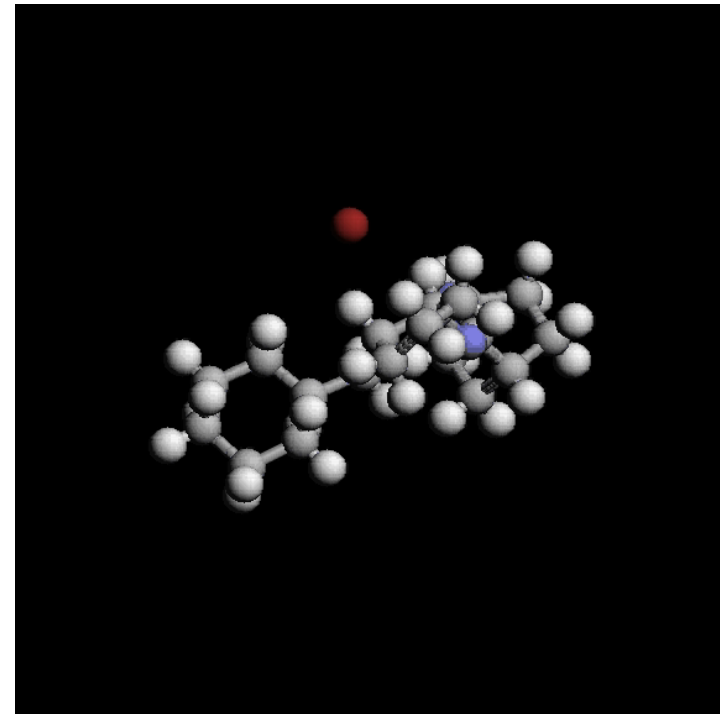
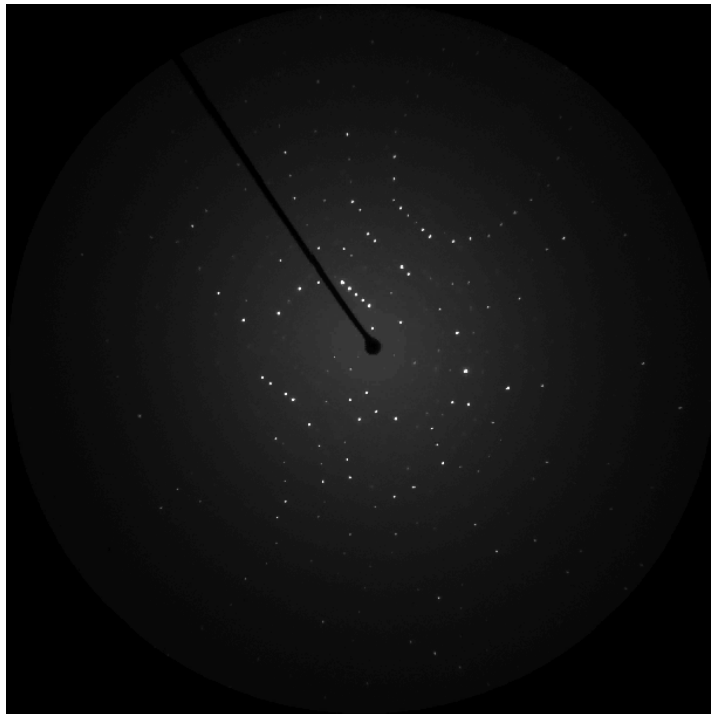
- Kohärenz
 - Bedeutung für Experimente
 - Definition
 - Kohärenz in Freie-Elektronen-Lasern
 - Messung mit Interferenz-Experimenten
- Messung der Kohärenz des TTF-FEL
 - Experimenteller Aufbau
 - Messung von Beugungsbildern
 - Analyse der Beugungsbilder
 - Simulationen
 - Resultate
 - Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

Räumliche Kohärenz des Freie-Elektronen-Lasers bei TTF

- Kohärenz
 - Bedeutung für Experimente
 - Definition
 - Kohärenz in Freie-Elektronen-Lasern
 - Messung mit Interferenz-Experimenten
- Messung der Kohärenz des TTF-FEL
 - Experimenteller Aufbau
 - Messung von Beugungsbildern
 - Analyse der Beugungsbilder
 - Simulationen
 - Resultate
 - Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

Bedeutung der Kohärenz am Beispiel der Kristallographie

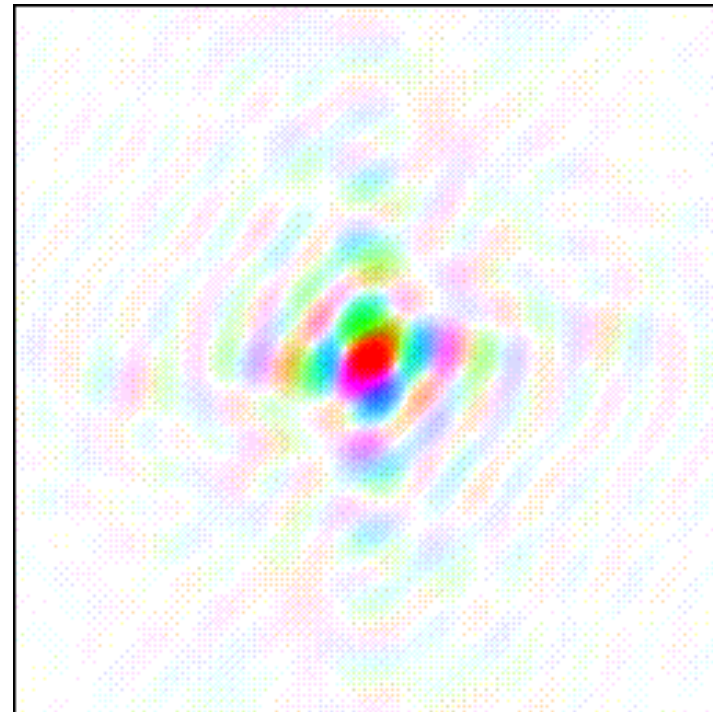
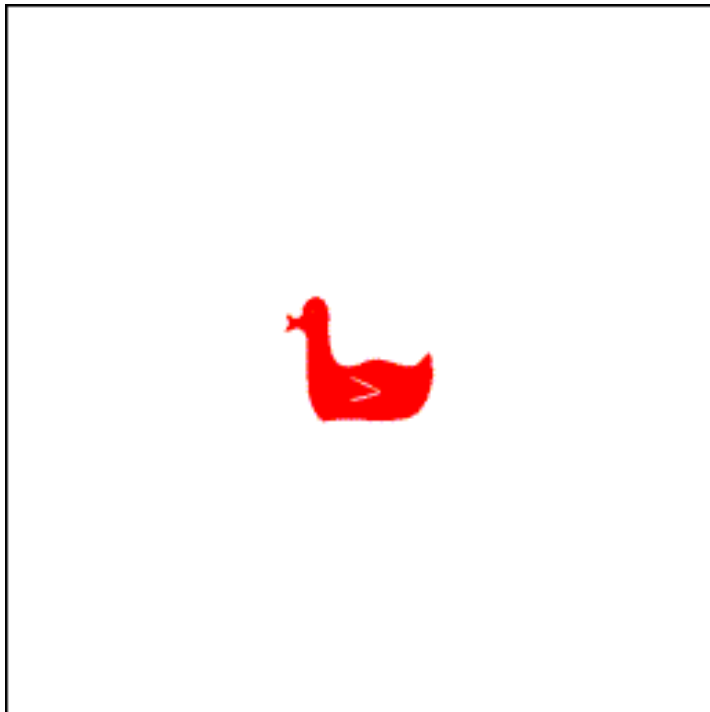
- Beugungsbild eines Kristalls \rightsquigarrow Molekülstruktur



- Problem: Phasen nicht bekannt!

Beugungsbild einer Ente

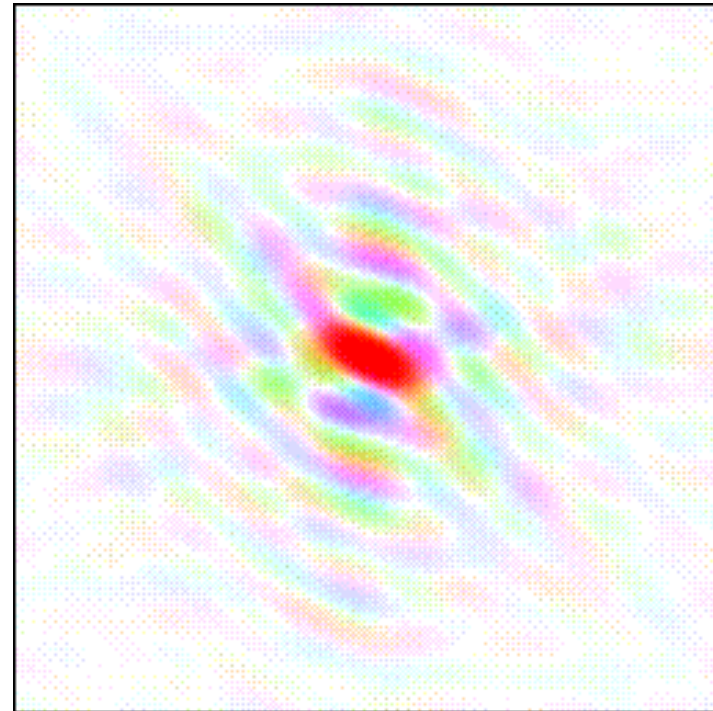
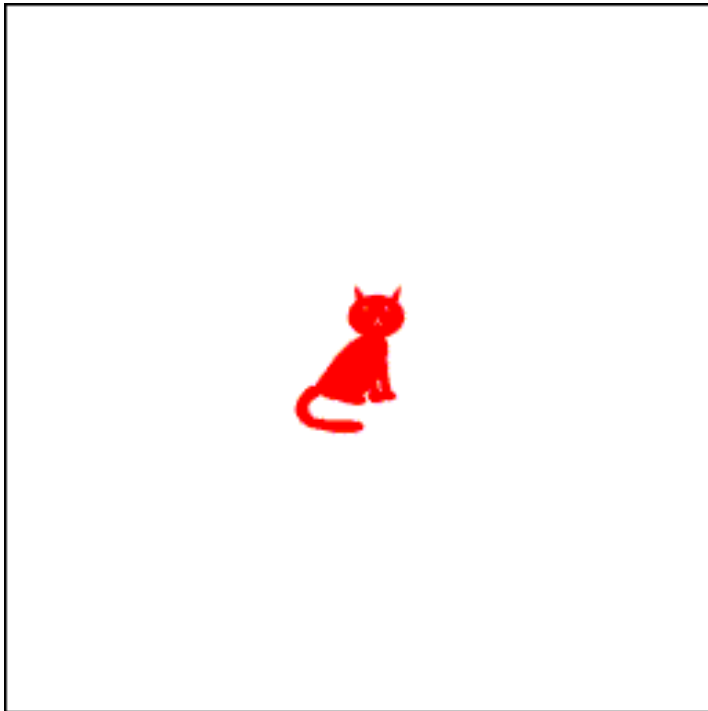
- Eine (zweidimensionale) Ente
- erzeugt dieses Beugungsbild (die Farbe stellt die Phase dar)



Bilder von Kevin Cowtan, Structural Biology Laboratory, University of York

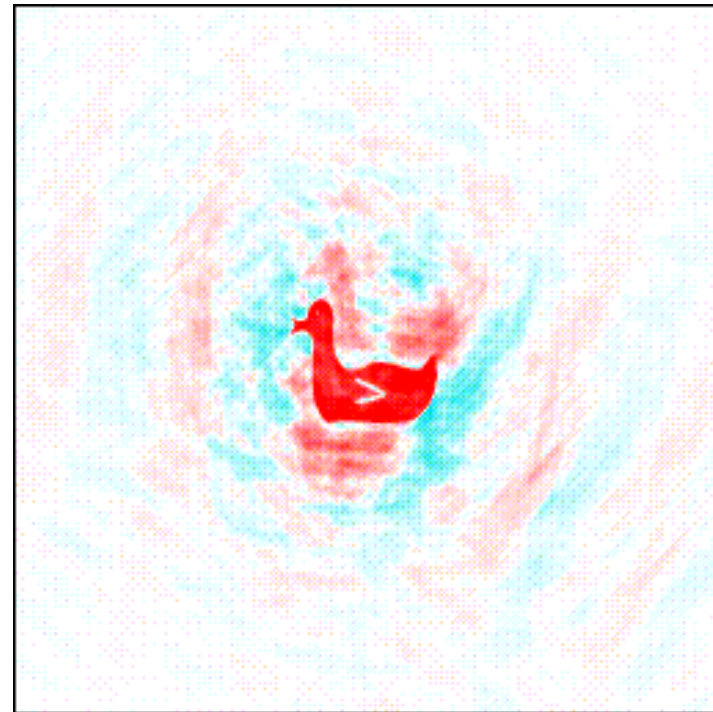
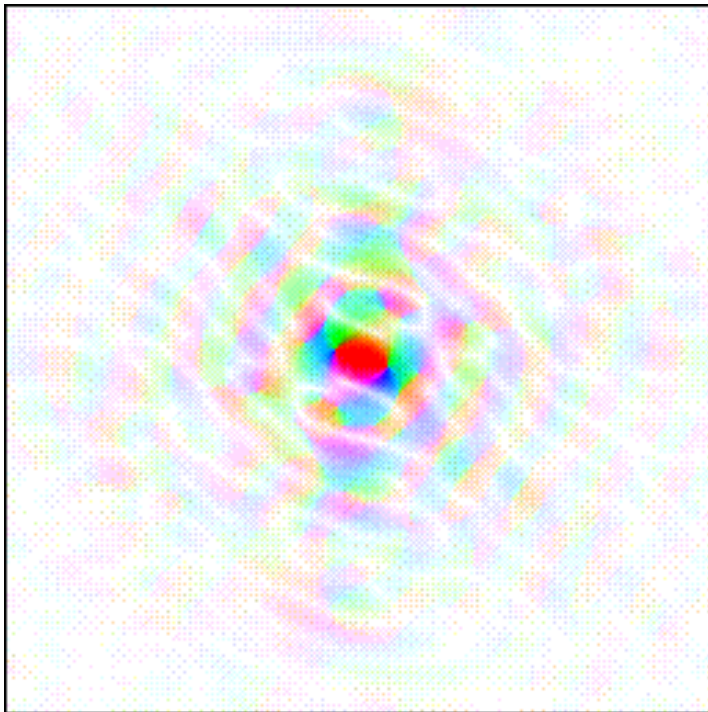
Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz des TTF-FEL

Beugungsbild einer Katze



Rekonstruktion

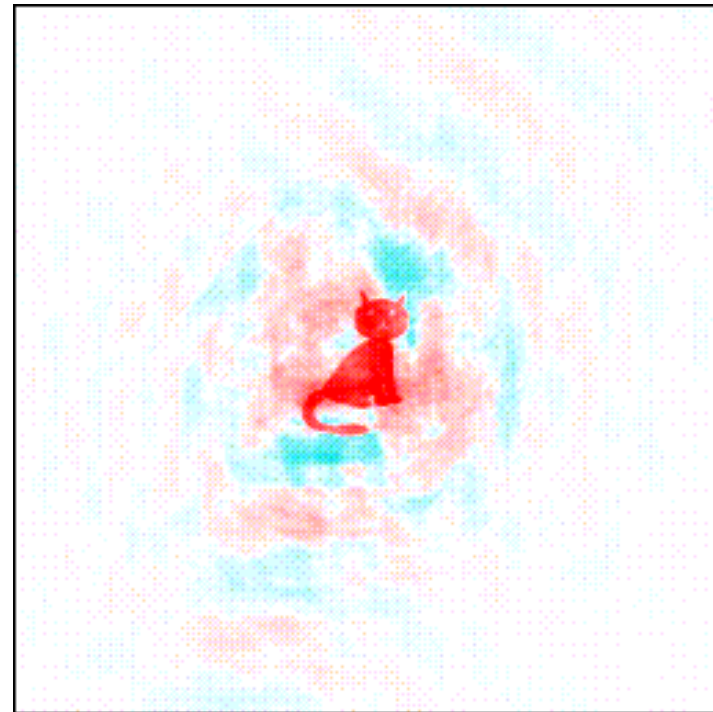
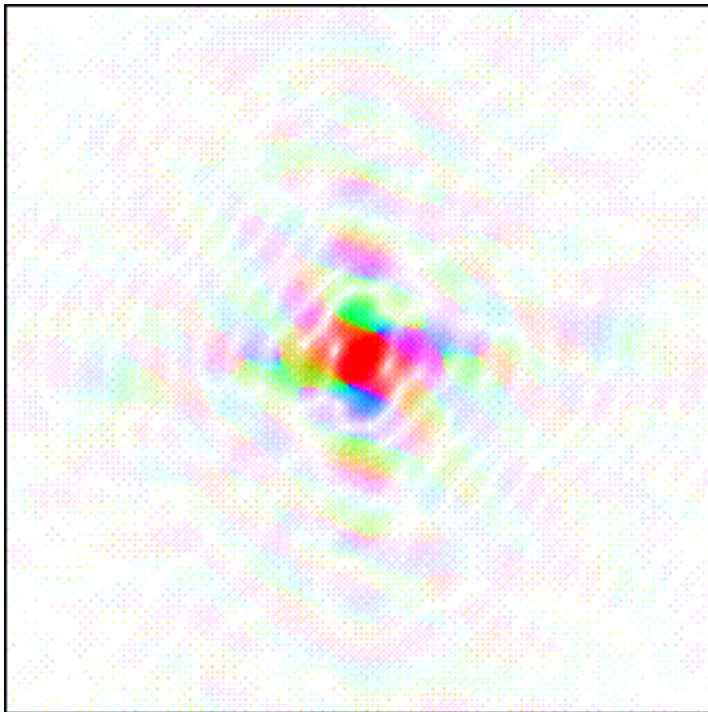
- Füge die Amplitude des Beugungsbildes der Katze
- und die Phase des Beugungsbildes der Ente zusammen



Das Ergebnis: eine Ente!

Rekonstruktion

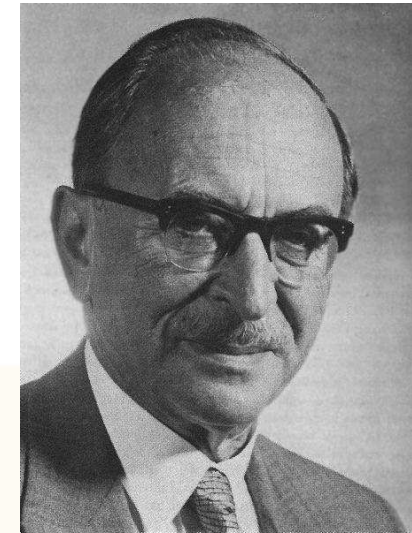
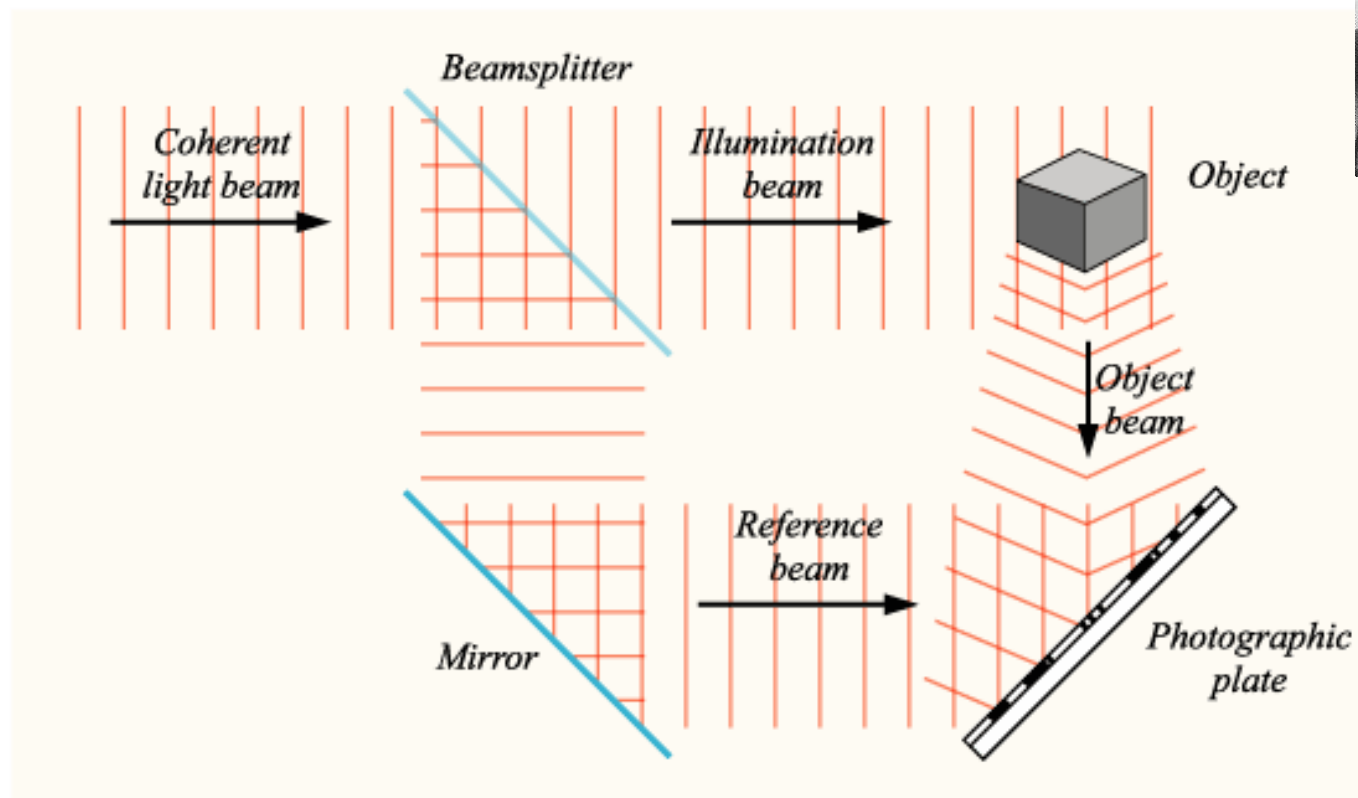
- Das Ganze geht natürlich auch umgekehrt:
- die Amplitude der Ente und die Phase der Katze



Dies ist das Phasen-Problem

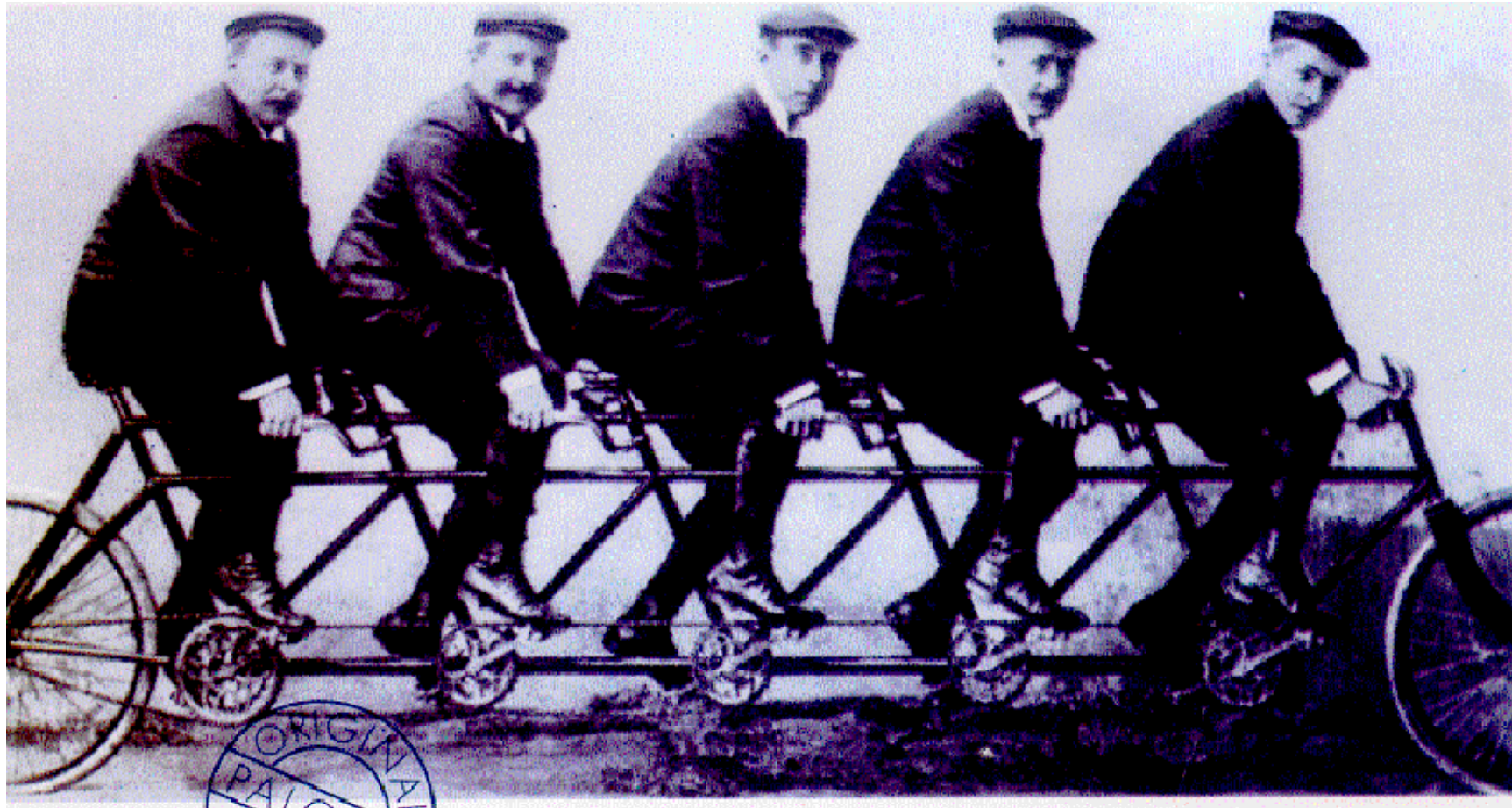
Mögliche Lösung: Holografie

- zeichne die Interferenz zwischen Objekt- und Referenz-Strahl auf



Dennis Gabor

Notwendige Voraussetzung: Kohärenz der Lichtquelle



Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz des TTF-FEL

Definition von Kohärenz-Eigenschaften

- Elektromagnetische Welle: Darstellung mithilfe langsam veränderlicher Amplitude (LVA)

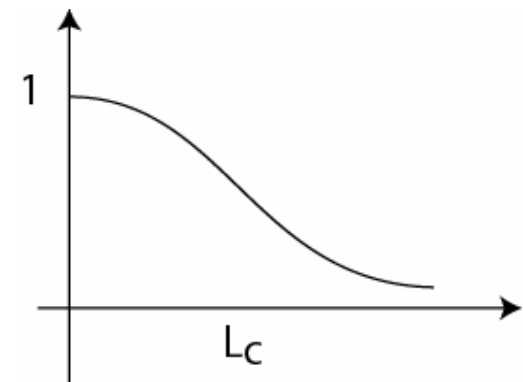
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} \left[\tilde{E}(\vec{r}, t) \exp \left(i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \right) \right] \vec{u}_x$$

- Korrelationsfunktion

$$\tilde{\Gamma}(\vec{r}, \vec{r}') = \left\langle \tilde{E}(\vec{r}, t) \cdot \tilde{E}^*(\vec{r}', t) \right\rangle_t$$

- Kohärenzgrad

$$\mathcal{C}(\vec{r}, \vec{r}') = |\tilde{\gamma}(\vec{r}, \vec{r}')|$$



Kohärenz in Freie-Elektronen-Lasern

- Zerlegung der Strahlung in transversale Moden

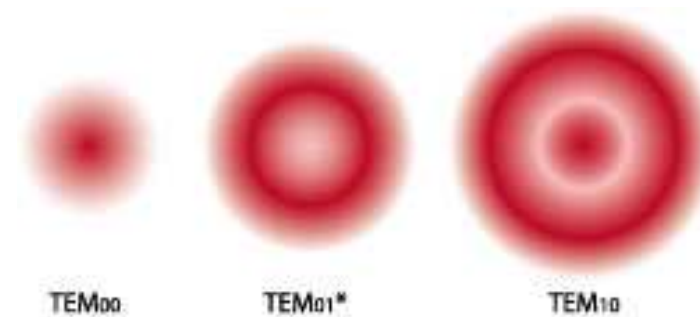
$$\tilde{E}(r, \vartheta, z) = \sum_{n,m} C_{nm}(z) \tilde{A}_{nm}(r, \vartheta)$$

- Entwicklung der Moden im Undulator

$$C_{nm}(z) = \exp\left(\frac{\Lambda_{nm}}{2} z\right)$$

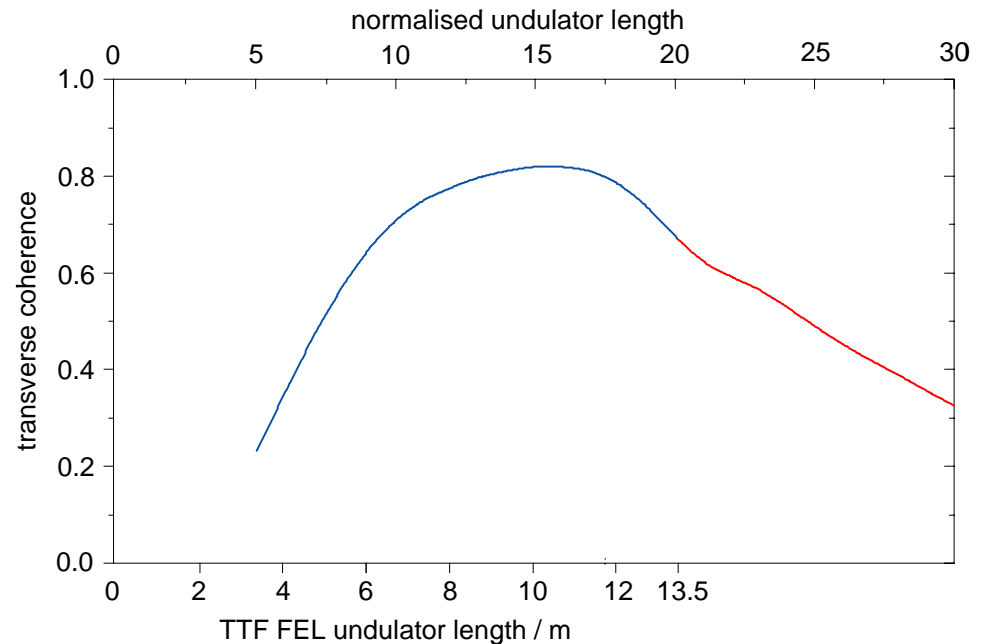
- TEM-Moden (transversales elektrisches und magnetisches Feld)

- z.B. Gauß-Laguerre-Moden:



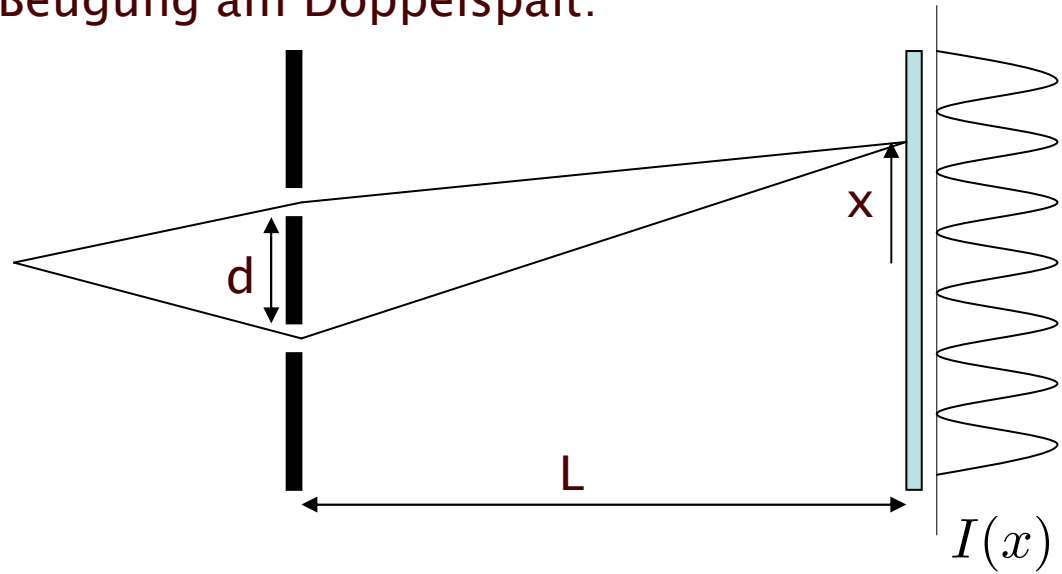
Entwicklung der Kohärenz

- Zentrale Mode TEM00 (gaußförmig) hat den besten Überlapp mit dem Elektronenstrahl
 - ↳ größtes Wachstum
 - ↳ Kohärenz nimmt zu
- Sättigung im hinteren Teil des Undulators
 - ↳ andere Moden gewinnen an Bedeutung
 - ↳ Kohärenz nimmt wieder ab



Kohärenzmessung durch Interferenz-Experimente

- Beugung am Doppelspalt:



- Sichtbarkeit der Interferenzstreifen:

$$\mathcal{V} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



Fraunhofer-Beugung am Doppelspalt

- Fernfeld-Bedingung

$$\frac{kR_{\max}^2}{2L} \ll 1$$

- Beugung am Doppelspalt

$$I(x) = I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{d}{L\lambda} x \right) \right]$$

- Berücksichtigt man die Breite w der Spalte, so ergibt sich eine zusätzliche Modulation

$$I(x) = I_0 \left(\frac{\sin(\pi wx/(\lambda L))}{\pi wx/(\lambda L)} \right)^2 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{d}{\lambda L} x \right) \right]$$



Joseph von Fraunhofer

Fraunhofer–Beugung mit teilweise kohärentem Licht

- Es sei \mathcal{C} die Kohärenz zwischen den beiden Spalten

$$I(x) = I_0 \left(\frac{\sin(\pi wx/(\lambda L))}{\pi wx/(\lambda L)} \right)^2 \left[1 + \mathcal{C} \cos \left(2\pi \frac{d}{\lambda L} x \right) \right]$$

- Es ergibt sich als Sichtbarkeit der Interferenzstreifen

$$\mathcal{V} = \mathcal{C}$$

Fresnel-Beugung am Doppelspalt

- Beugungsbild wird mit der Gesamt-Amplitude \mathcal{S} moduliert:

$$I(x) = \mathcal{S}(x) \left[1 + \mathcal{V}(x) \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda L} x \right) \right]$$



Augustin Jean Fresnel

- Diese ist die Summe der Intensitäten der Einzelspaltbilder

$$\mathcal{S}(x) = I_1(x) + I_2(x)$$

mit

$$I_{1,2}(x) = \left(\frac{\sin(\pi w(x \pm d/2)/(\lambda L))}{\pi w(x \pm d/2)/(\lambda L)} \right)^2$$

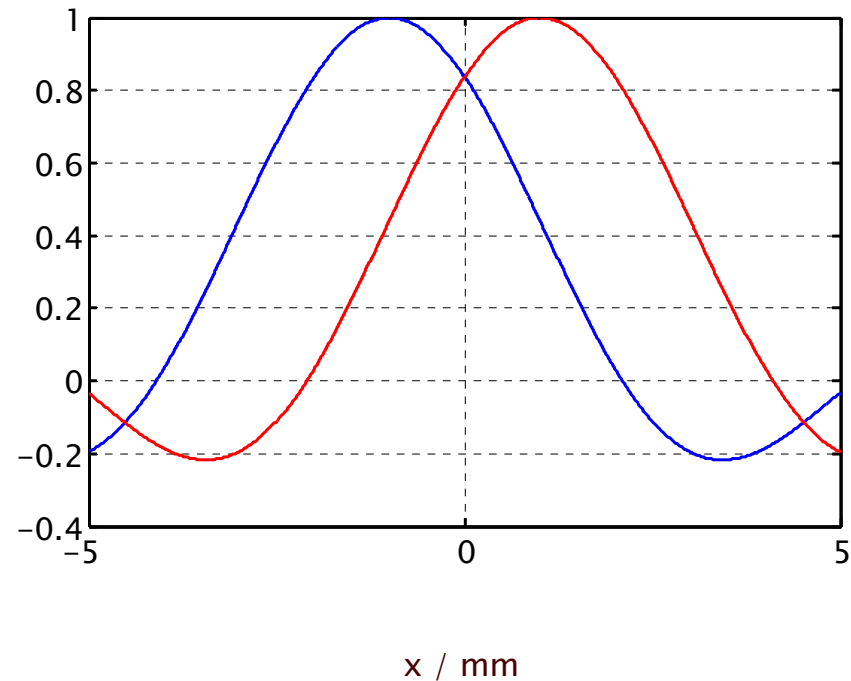
- Sichtbarkeit ist nun eine Funktion von x

Fresnel-Beugung am Doppelspalt (2)

- Die Sichtbarkeit hängt von der relativen Amplitude der Wellen von den beiden Spalten ab.
 - Elektrische Felder

$$\tilde{E}_1(x) = \frac{\sin\left(\frac{\pi w(x+d/2)}{\lambda L}\right)}{\frac{\pi w(x+d/2)}{\lambda L}}$$

$$\tilde{E}_2(x) = \frac{\sin\left(\frac{\pi w(x-d/2)}{\lambda L}\right)}{\frac{\pi w(x-d/2)}{\lambda L}}$$



Fresnel-Beugung am Doppelspalt (3)

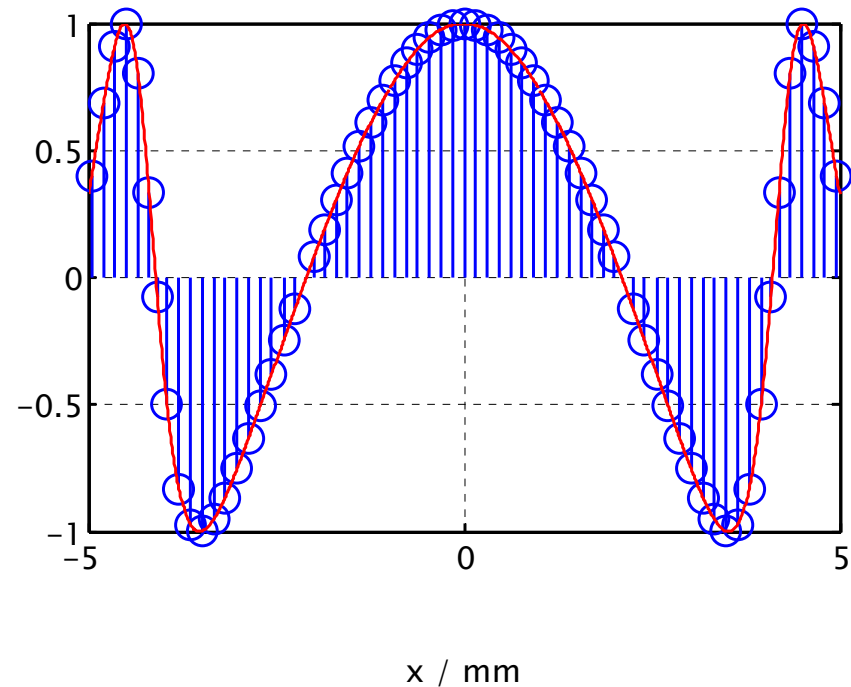
- Intensitäten

$$I_{\text{ex1}}(x) = (\tilde{E}_1(x) + \tilde{E}_2(x))^2$$

$$I_{\text{ex2}}(x) = (\tilde{E}_1(x) - \tilde{E}_2(x))^2$$

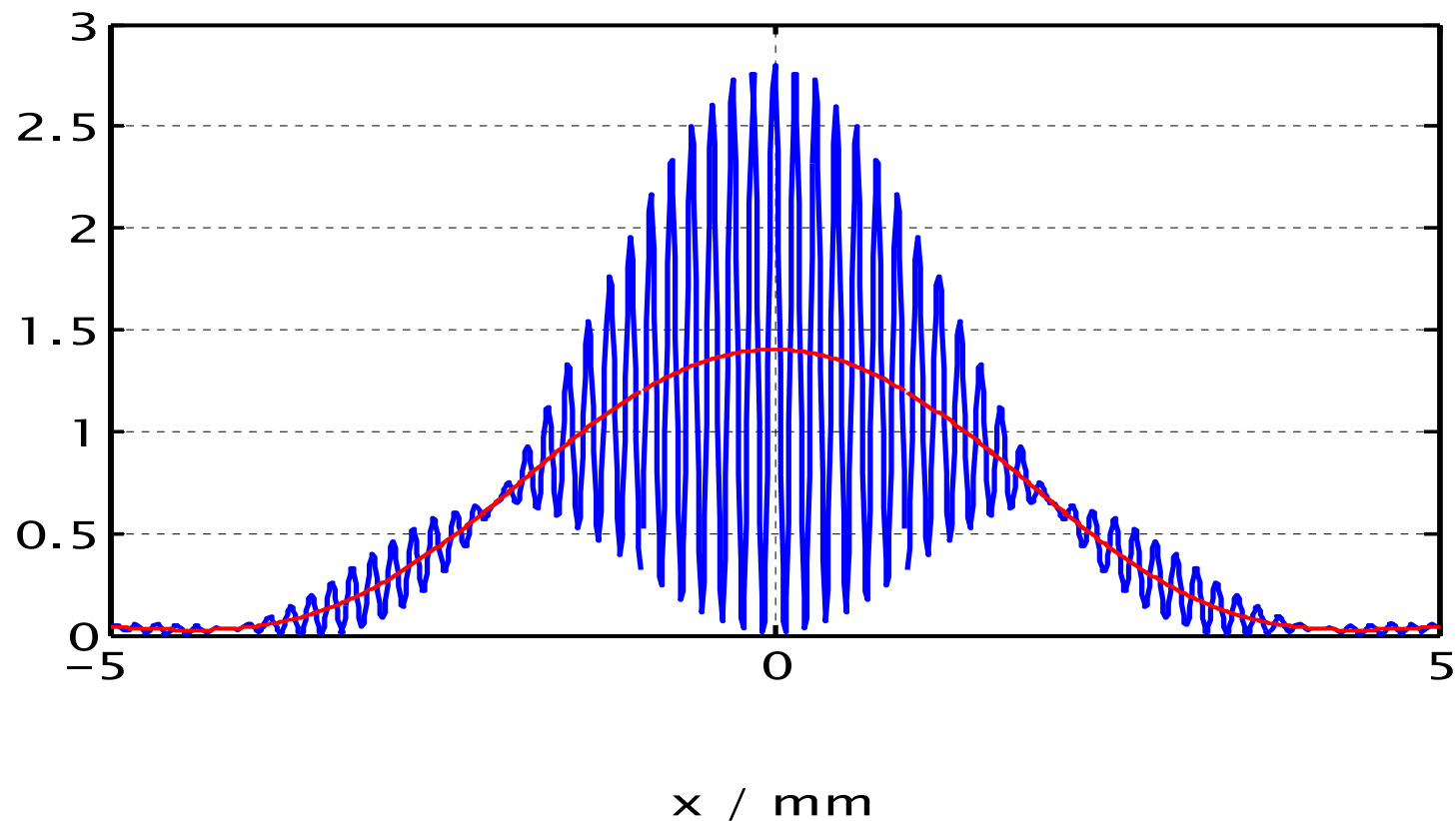
- Sichtbarkeit

$$\mathcal{V}(x) = \frac{I_{\text{ex1}}(x) - I_{\text{ex2}}(x)}{I_{\text{ex1}}(x) + I_{\text{ex2}}(x)}$$



Fresnel-Beugung am Doppelspalt (4)

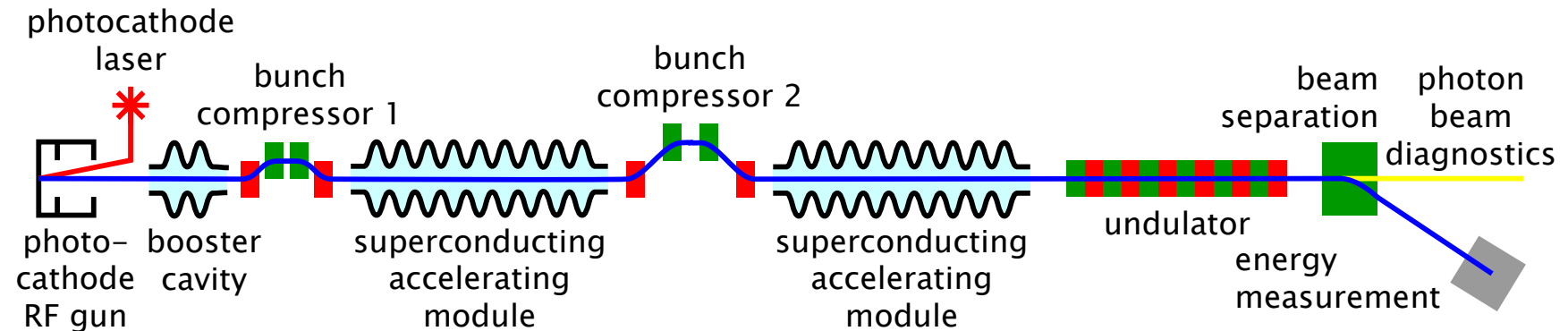
- Interferenzmuster $I(x) = \mathcal{S}(x) \left[1 + \mathcal{V}(x) \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda L} x \right) \right]$



Räumliche Kohärenz des Freie-Elektronen-Lasers bei TTF

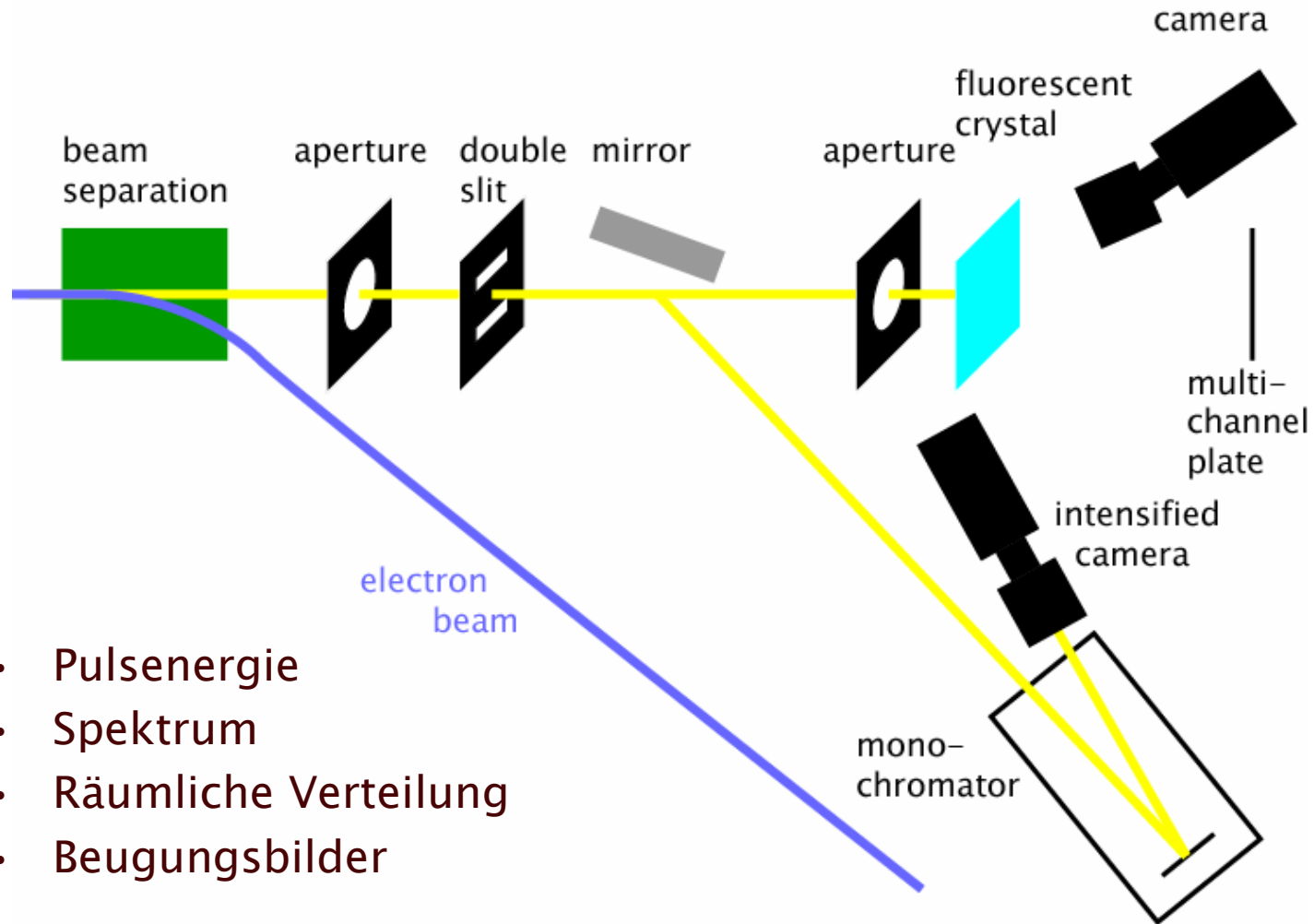
- Kohärenz
 - Bedeutung für Experimente
 - Definition
 - Kohärenz in Freie-Elektronen-Lasern
 - Messung mit Interferenz-Experimenten
- Messung der Kohärenz des TTF-FEL
 - Experimenteller Aufbau
 - Messung von Beugungsbildern
 - Analyse der Beugungsbilder
 - Simulationen
 - Resultate
 - Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

TESLA-Test-Anlage (Phase 1)



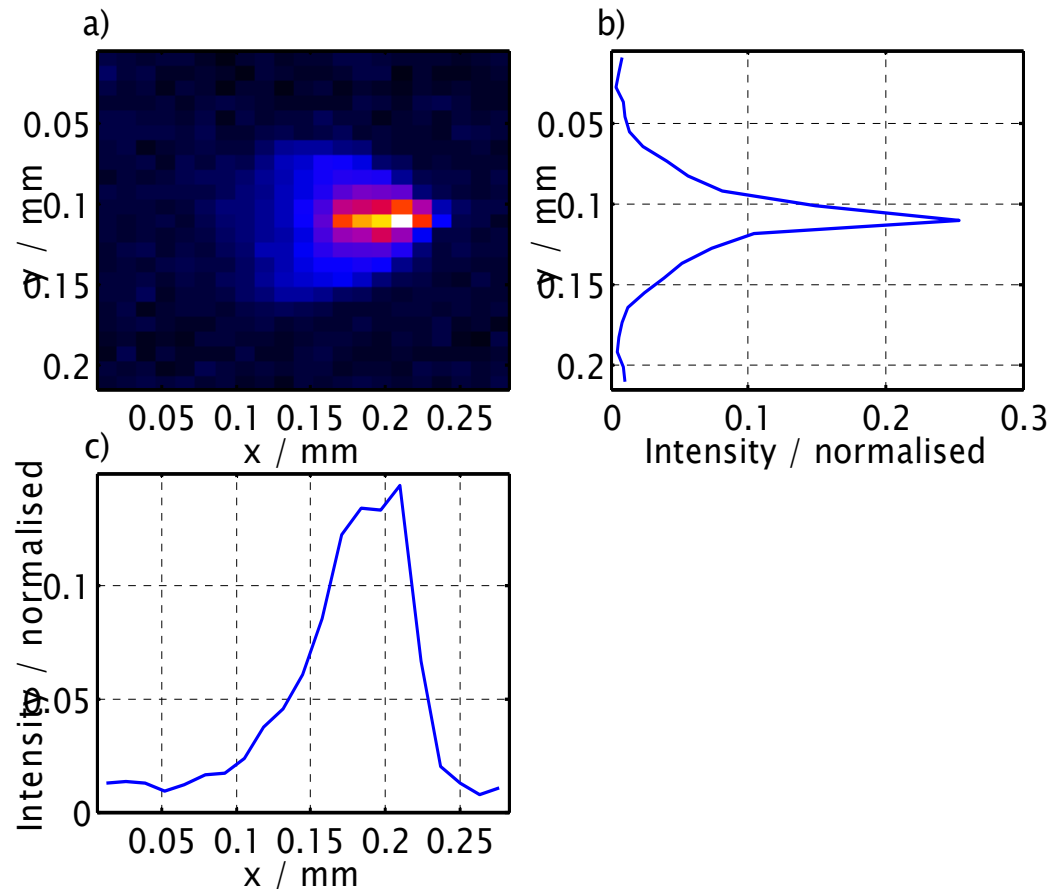
- Länge: 120m
- Elektronen-Energie: 260MeV
- Spitzenstrom: 1kA
- Wellenlänge des FEL: 100nm
- Spitzenleistung des FEL: 1GW
- Pulsenergie: 30...100μJ
- Brillanz des FEL: $4 \cdot 10^{28}$ Photonen / (s mm² mrad² 0.1% Bandbreite)

Photonen-Diagnose beim TTF-FEL



Messung der Abbildungsschärfe des Kamera-Objektivs

- Point Spread Function (PSF): Bild einer punktförmigen Lichtquelle
- Messung mit sehr kleiner Lichtquelle (hier 2µm)



- Das Bild eines beliebigen Objektes Ψ ist gegeben durch eine Faltung:

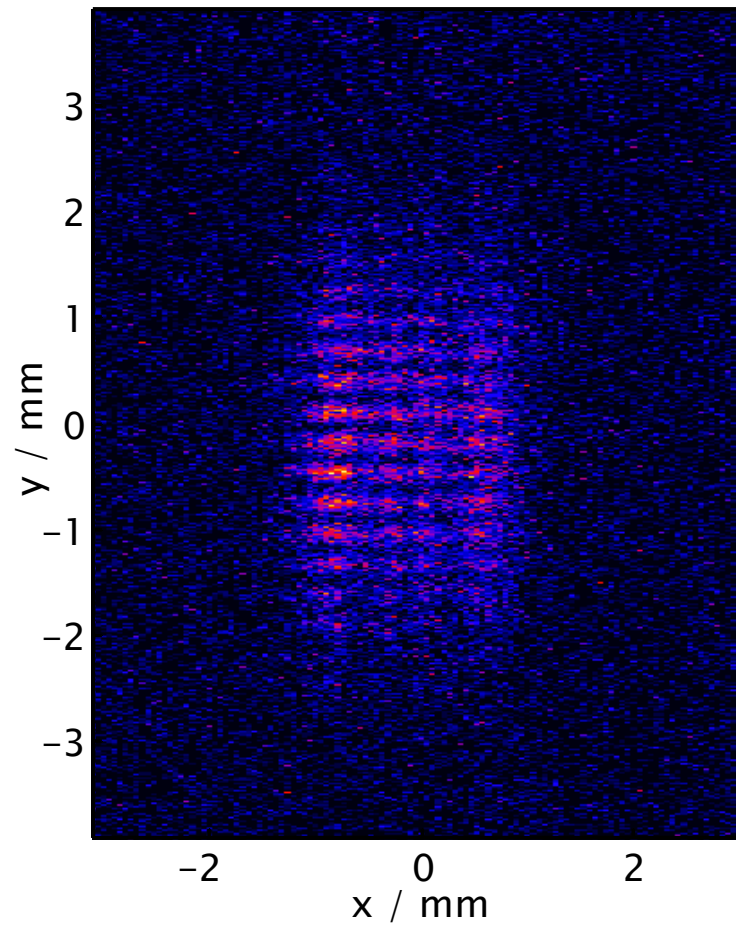
$$\Phi(x, y) = \int \Psi(u, v) PSF(x - u, y - v) du dv$$

Korrektur der Effekte des experimentellen Aufbaus

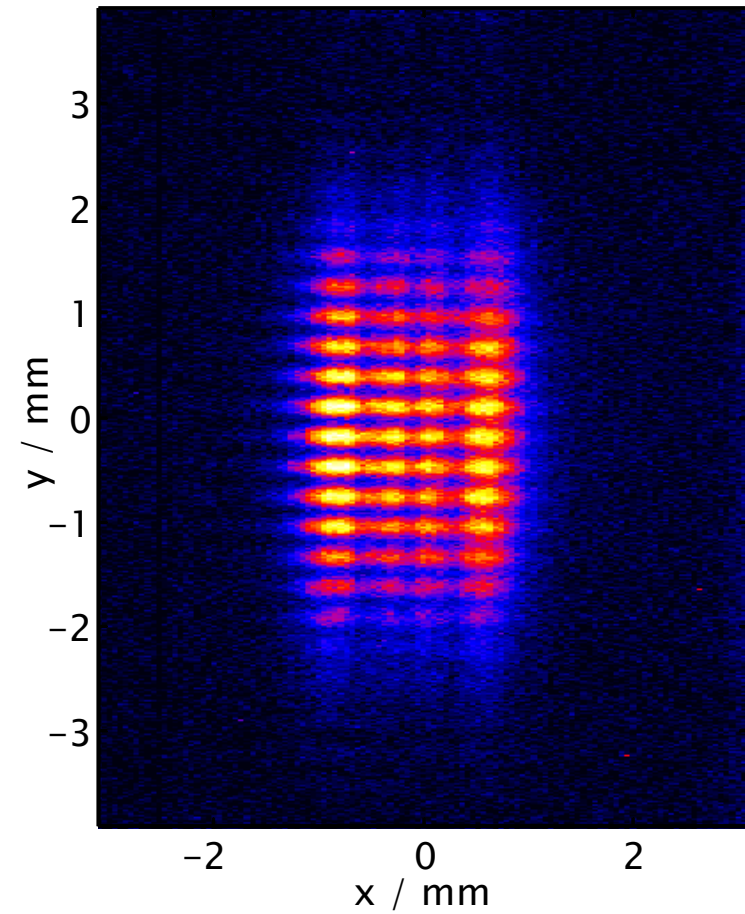
- Sättigung
 - Invertierung der gemessenen Sättigung
- Auflösung
 - Entfaltung der Auflösungsfunktion mit dem Lucy-Richardson-Algorithmus
- Rauschen
 - Reduktion mit einem Tiefpass-Filter

Beugungsbilder

- Einzelbild

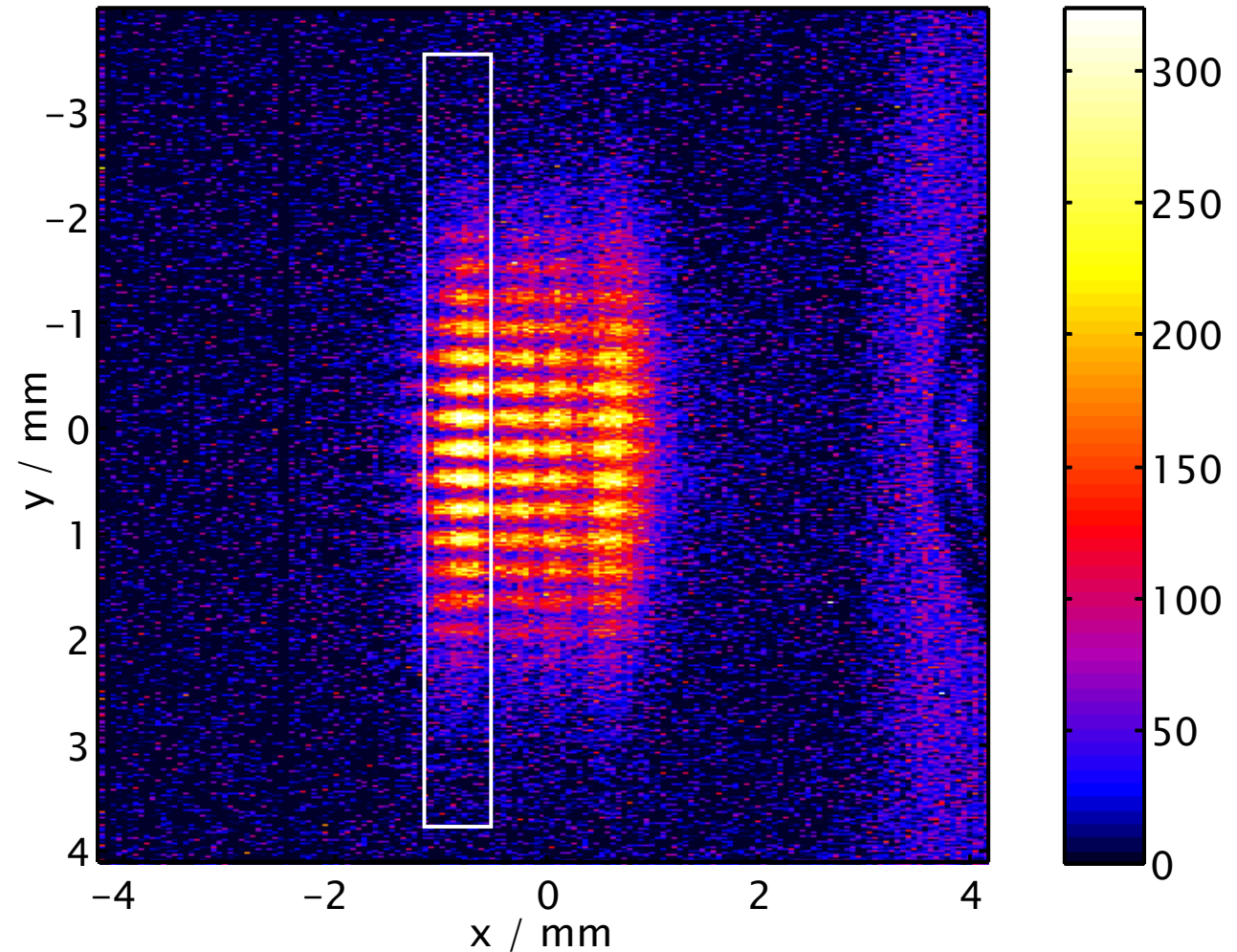


- Durchschnitt von 100 Bildern



Korrigiertes Beugungsbild

- Pixel-Offsets
- Sättigung
- Auflösungsvermögen

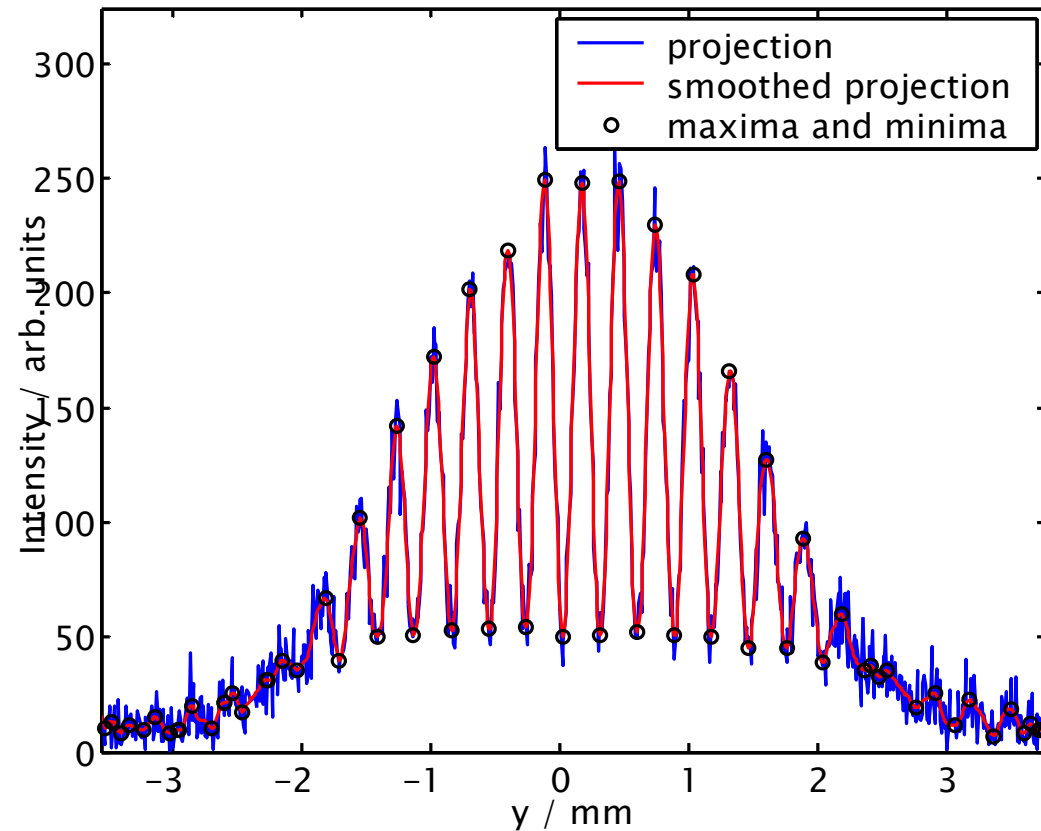


Analyse

- Ziel: bestimme die Kohärenzfunktion
- Im Fernfeld, mit perfekter Apparatur:
 - Kohärenz ist gleich der Sichtbarkeit der Interferenzstreifen
- Hier:
 - Nahfeld
 - Ergebnis durch Apparatur beeinflusst
- Simulationen zum Vergleich

Methode 1: Bestimmung der zentralen Sichtbarkeit

- Projiziere den ausgewählten Bereich des Beugungsbildes
- Glättung der Projektion mit einem Tiefpass-Filter
- Finden der Maxima und Minima

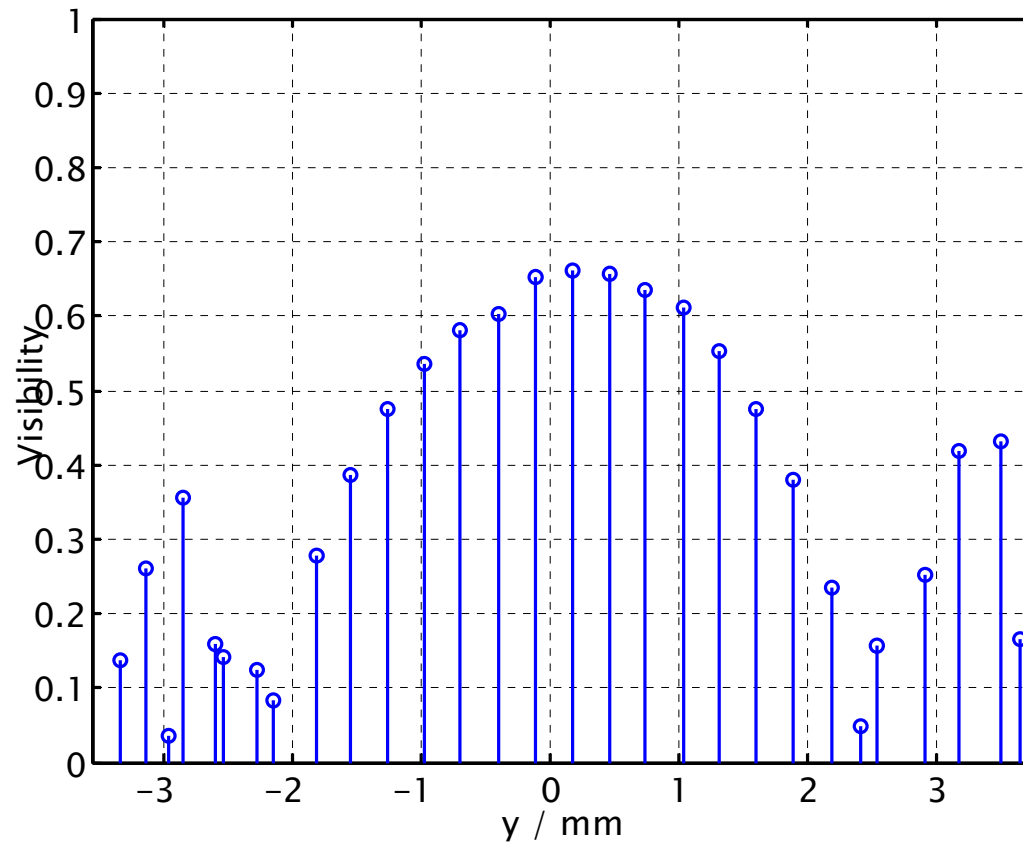


Methode 1: Bestimmung der zentralen Sichtbarkeit

- Berechnung der Sichtbarkeit

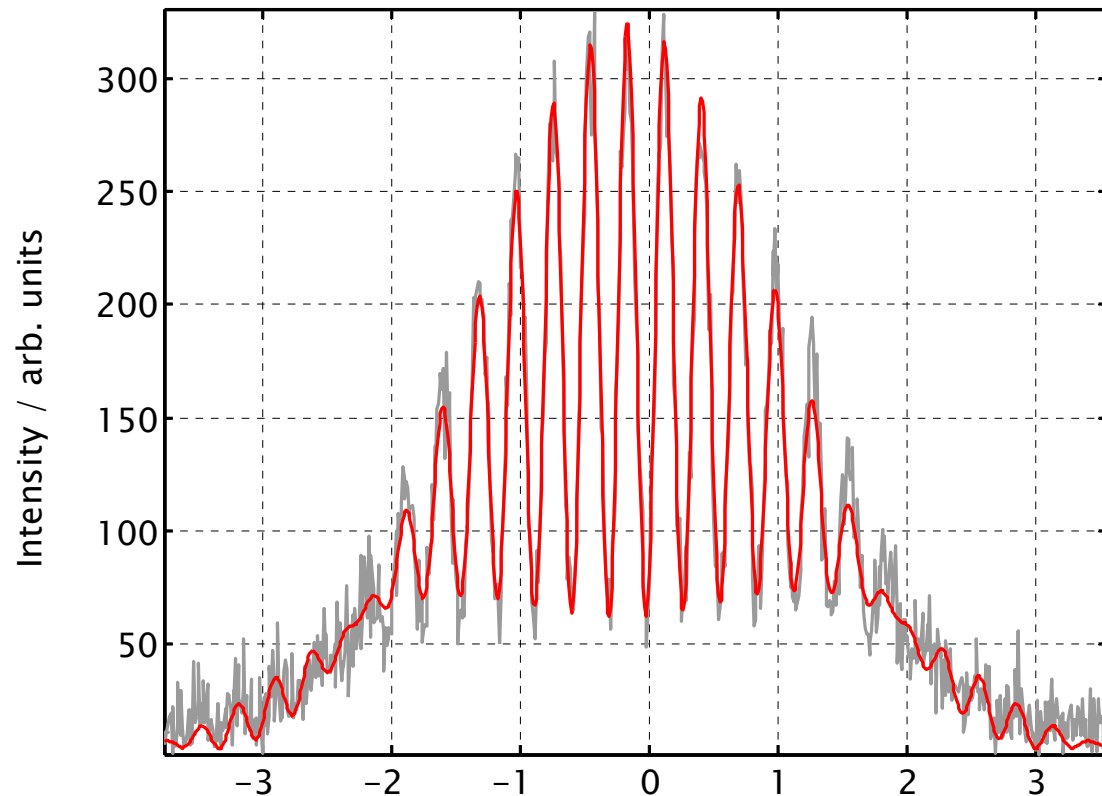
$$\mathcal{V} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

aus den Maxima und Minima der Kurve



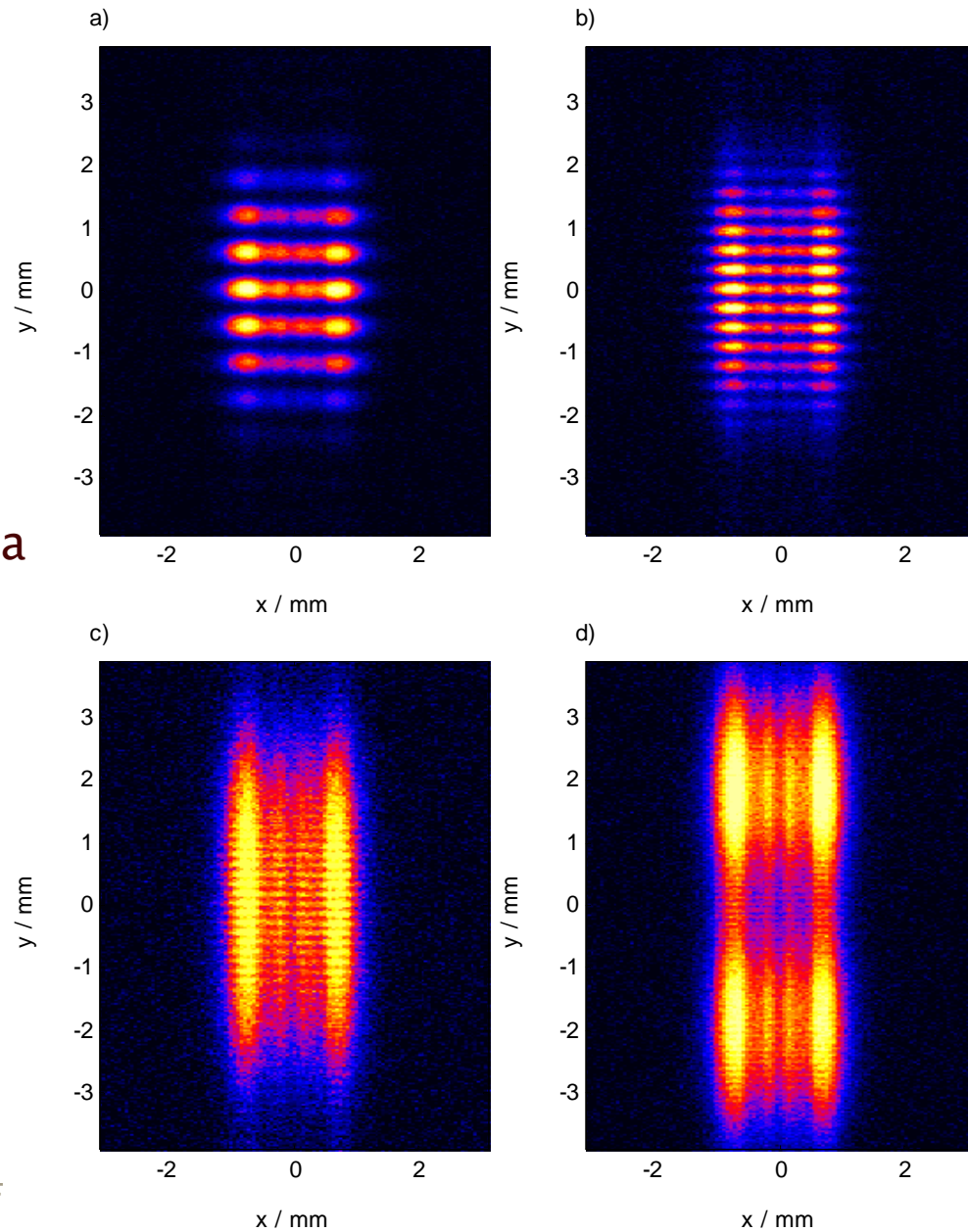
Methode 2: Fit an die Intensitätsverteilung

- Passe 7 Parameter an:
 - Kohärenzgrad
 - Mitte
 - Intensität vor dem linken Spalt
 - Intensität vor dem rechten Spalt
 - Richtung des Wellenvektors vor dem linken Spalt
 - Richtung des Wellenvektors vor dem rechten Spalt
 - Wellenlänge



Simulationen

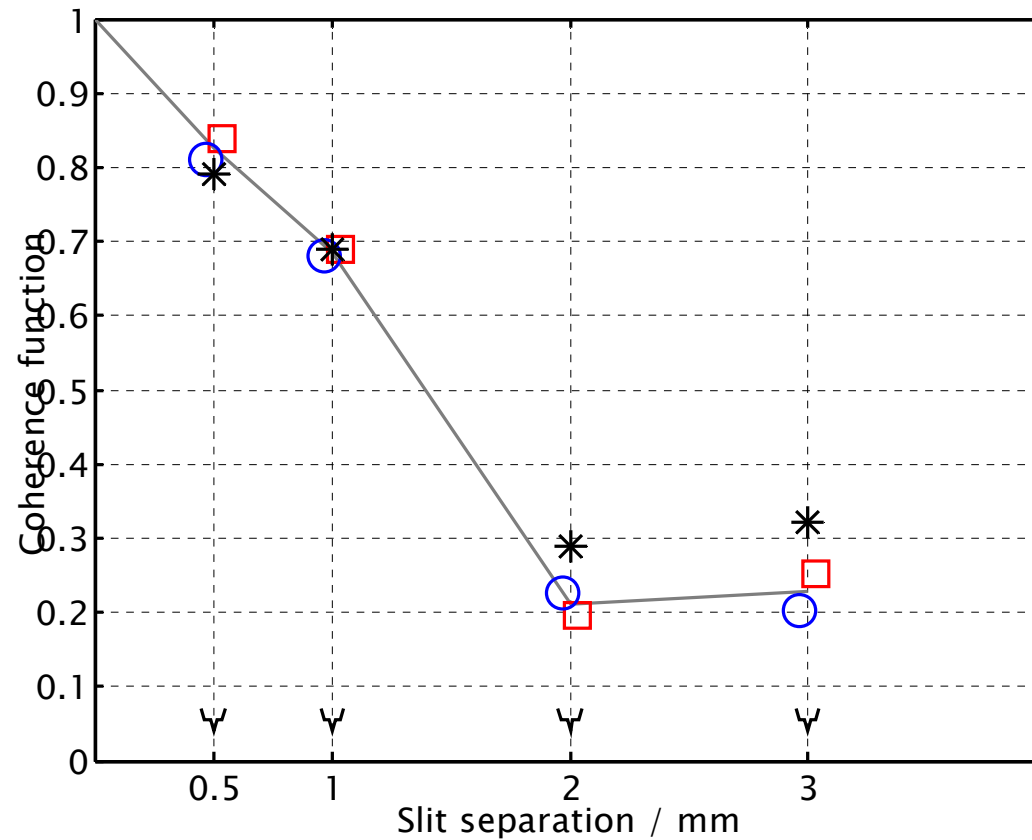
- Simulationen beinhalten
 - Bildung des FEL-Strahls im Undulator
 - Nahfeld-Beugung
 - Fluoreszenz-Kristall
 - Abbildung durch Kamera
 - CCD-Detektor



Ergebnisse

Kohärenz als Funktion des Abstandes

- Simulationen

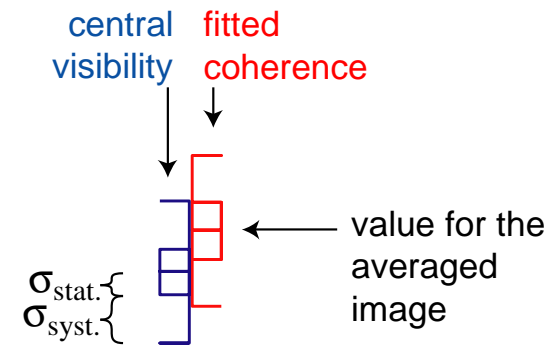
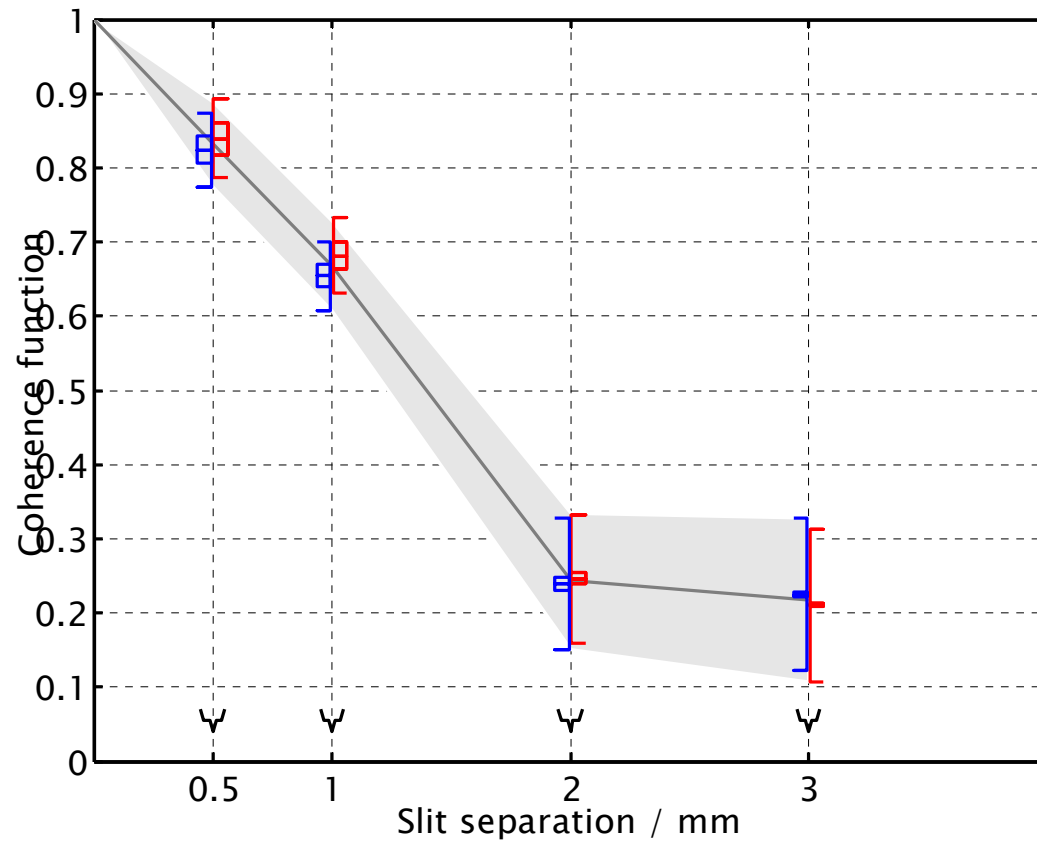


- Analysemethode 1
Sichtbarkeit
- Analysemethode 2
Fit
- * erwarteter Wert:
Korrelationsfunktion

Ergebnisse

Kohärenz als Funktion des Abstandes

- Messungen



Kohärenz als Funktion des Abstandes von der Strahlachse

- Wie erwartet, nimmt der Kohärenzgrad mit zunehmendem Abstand von der Strahlachse ab, da das elektrische Feld nicht mehr so stark korreliert ist
- Kohärenzgrad
 - Definiert als den Intensitäts-gewichteten Mittelwert der Kohärenz:

$$\mathcal{D} = \frac{\int_0^R \mathcal{C}(x, y) I(x, y) dx dy}{\int_0^R I(x, y) dx dy}$$

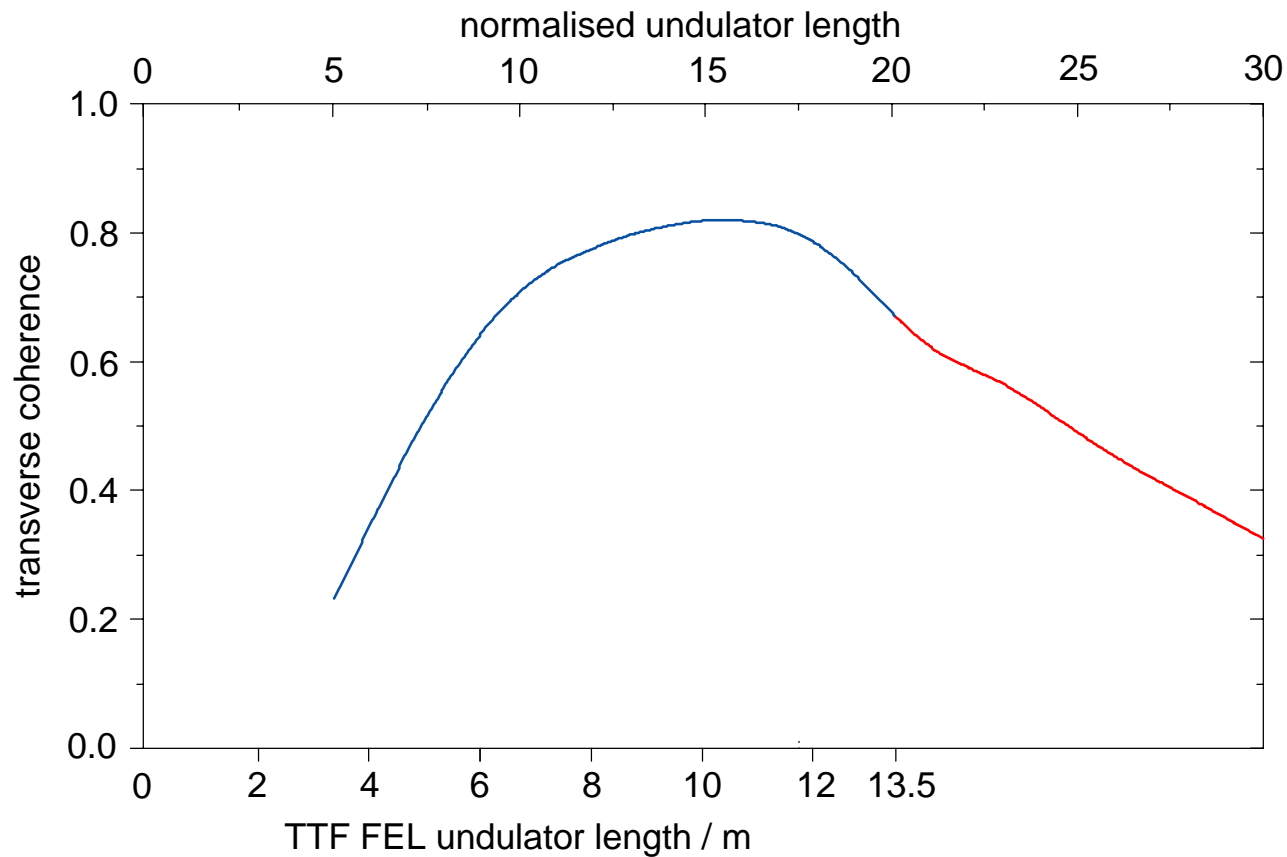
- Diese Messung: $\mathcal{D} = 0.64 \pm 0.06$ für $R=3\text{mm}$

Räumliche Kohärenz des Freie-Elektronen-Lasers bei TTF

- Kohärenz
 - Bedeutung für Experimente
 - Definition
 - Kohärenz in Freie-Elektronen-Lasern
 - Messung mit Interferenz-Experimenten
- Messung der Kohärenz des TTF-FEL
 - Experimenteller Aufbau
 - Messung von Beugungsbildern
 - Analyse der Beugungsbilder
 - Simulationen
 - Resultate
 - Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

- Zur Erinnerung: theoretische Vorhersage

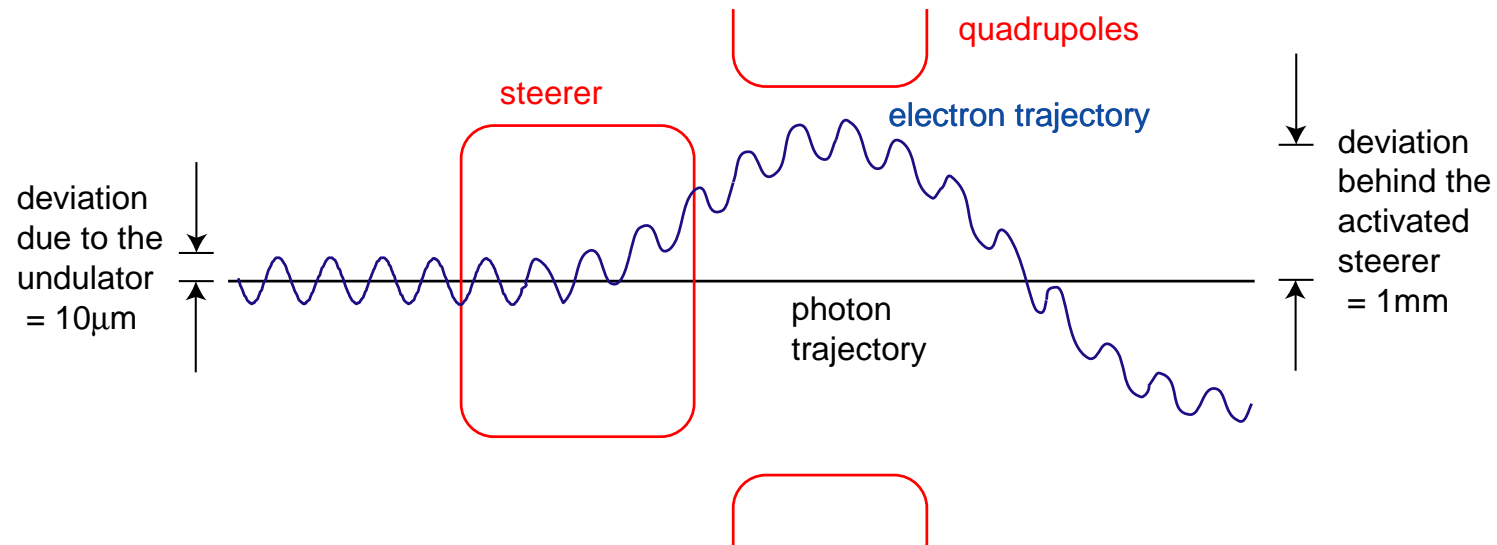


Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

- Der Undulator für den TTF FEL



Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators



- Undulator kann virtuell verkürzt werden, indem der Strahl von der Ideallinie entfernt wird
- Messungen im letzten Drittel des Undulators möglich

Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

Beugungsbilder

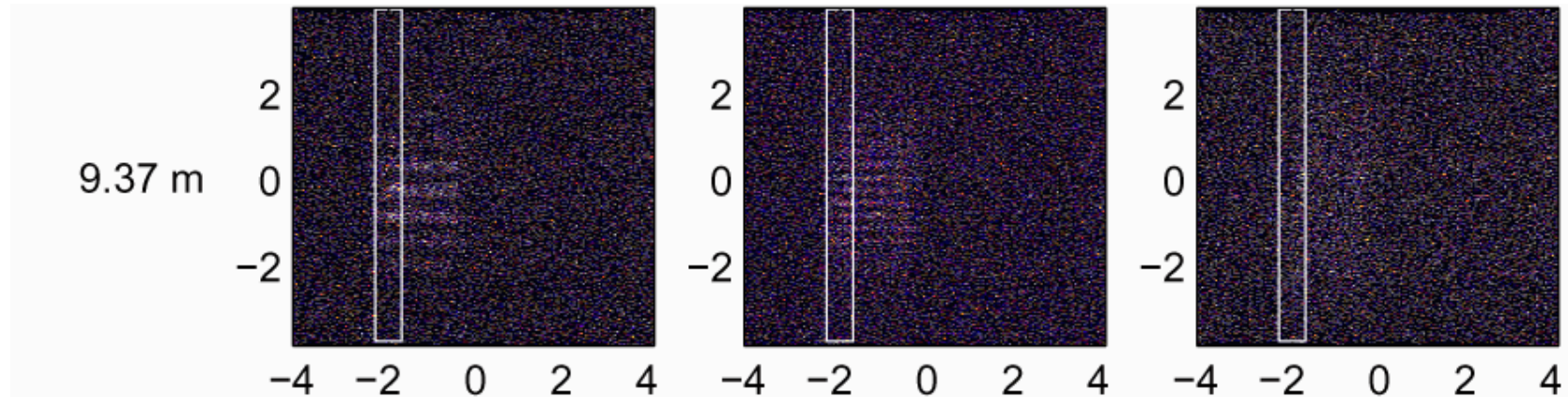
Undulator-
Länge

0.5mm

Spaltabstand

1mm

2mm



Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

Gefilterte Projektion

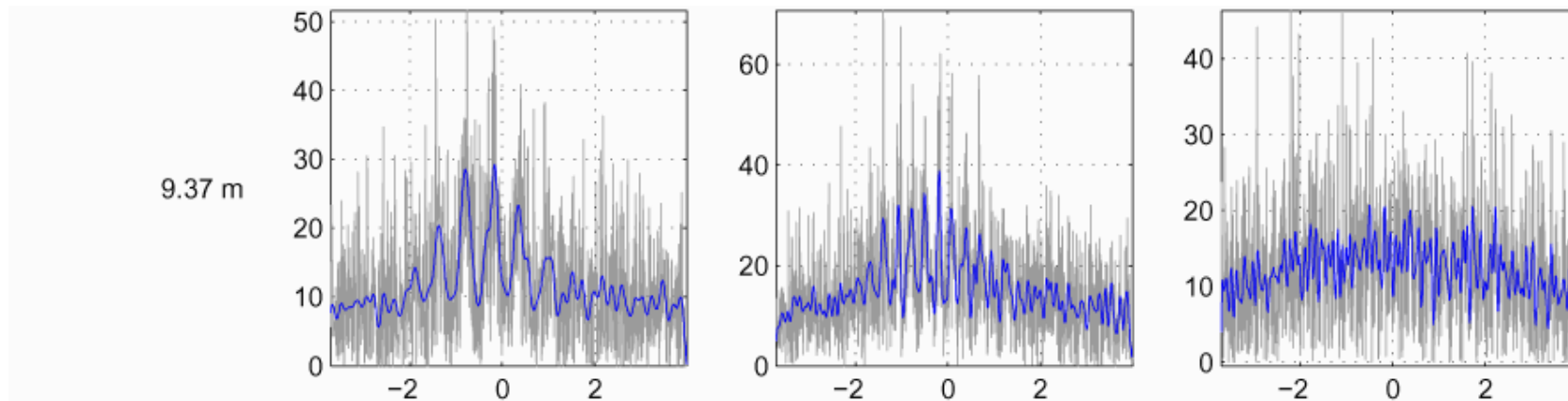
Undulator-
Länge

0.5mm

Spaltabstand

1mm

2mm



Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

Sichtbarkeit der Interferenzstreifen

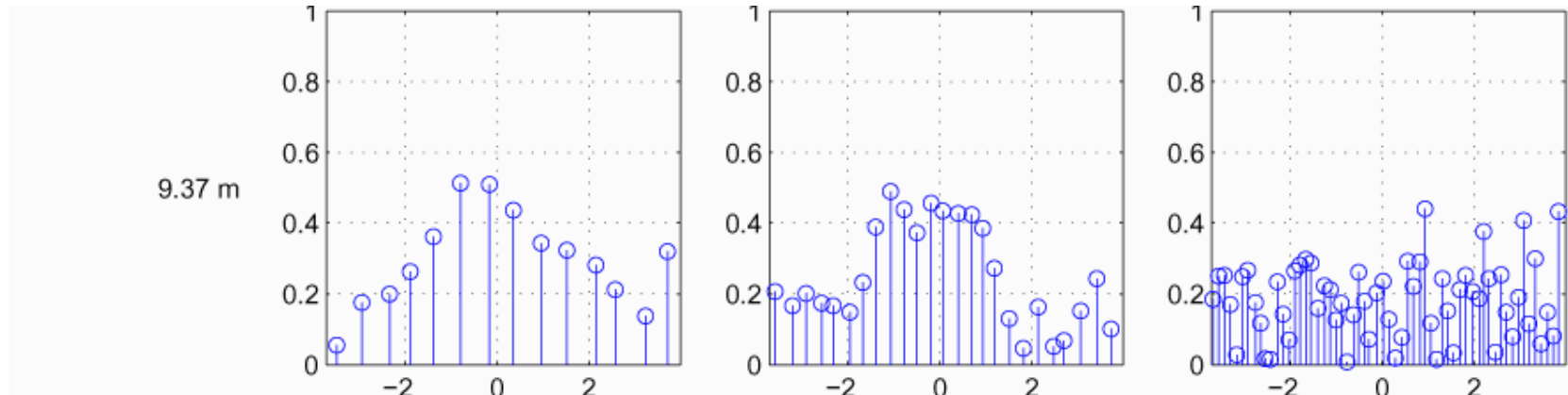
Undulator-
Länge

0.5mm

Spaltabstand

1mm

2mm



Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

Fit an die Intensität

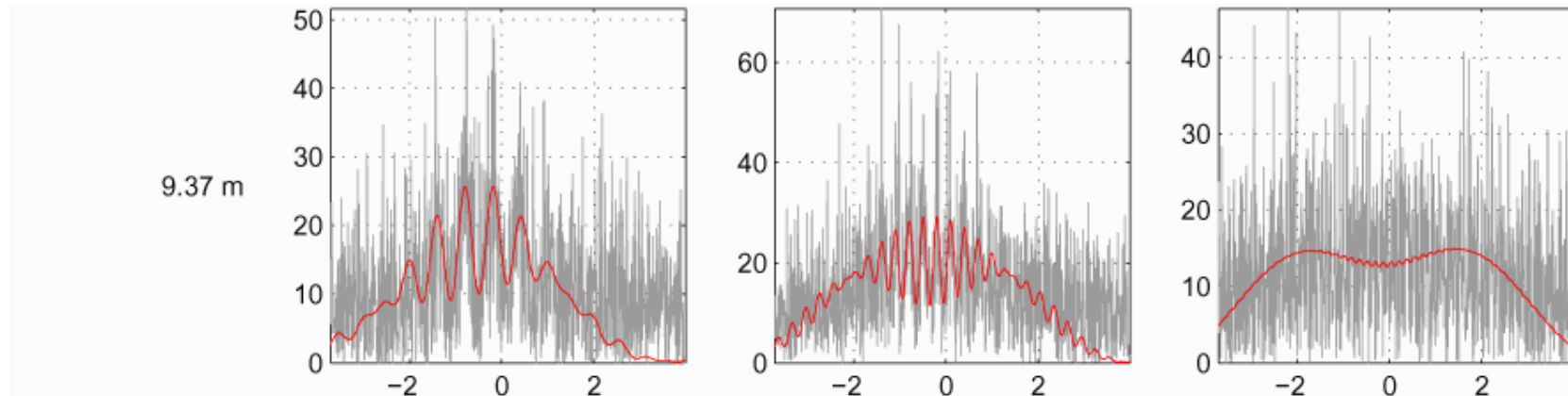
Undulator-
Länge

0.5mm

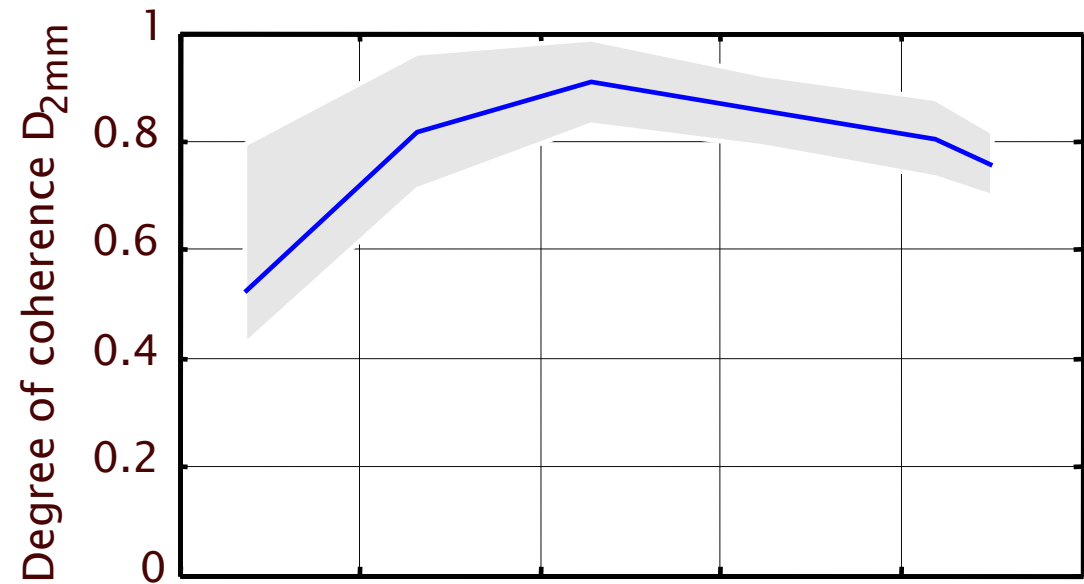
Spaltabstand

1mm

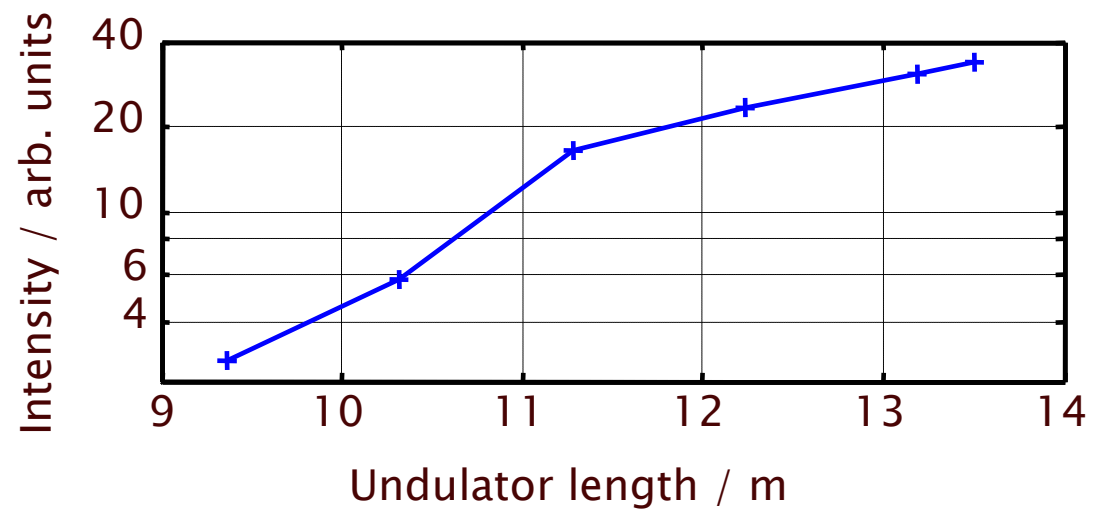
2mm



Kohärenzgrad



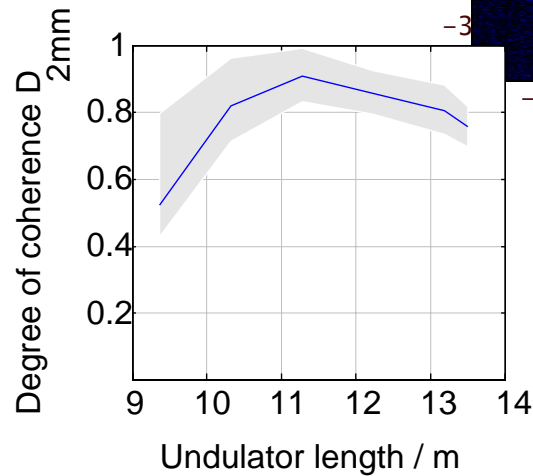
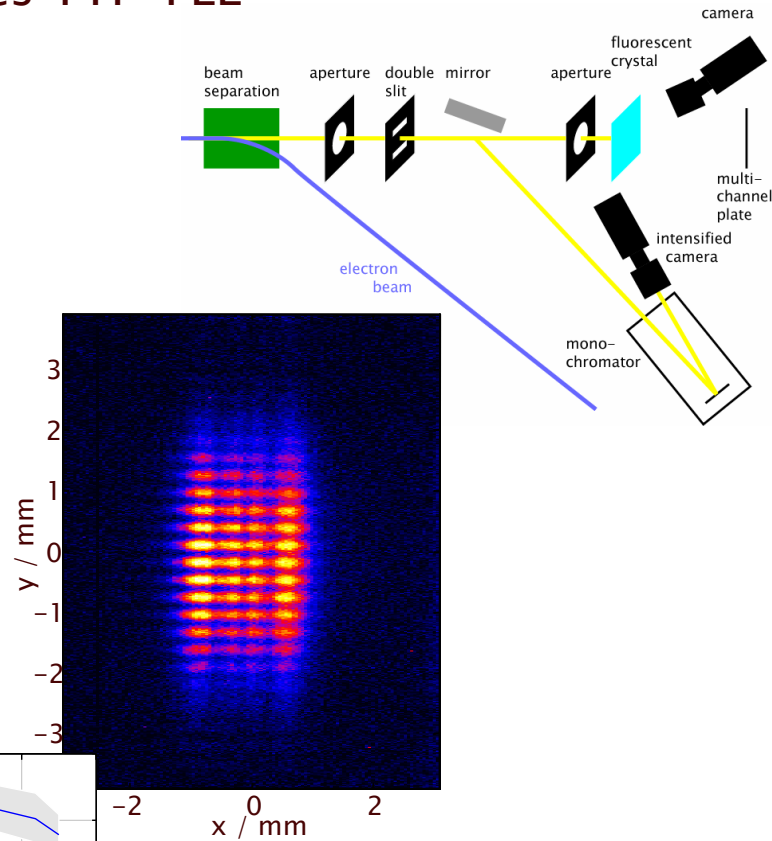
Dazu im Vergleich die Intensität des FEL



Messung der räumlichen Kohärenz des TTF-FEL

Zusammenfassung

- Experimenteller Aufbau im Ultrahochvakuum des Beschleunigers
- Messung von Beugungsbildern
- Korrektur der apparativen Effekte
- Entwicklung im Undulator



Vielen Dank an das TTF Team!

V. Ayvazyan, N. Baboi, I. Bohnet, R. Brinkmann, M. Castellano, P. Castro, L. Catani, S. Choroba, A. Cianchi, M. Dohlus, H.T. Edwards, B. Faatz, A.A. Fateev, J. Feldhaus, K. Flöttmann, A. Gamp, T. Garvey, H. Genz, Ch. Gerth, V. Gretchko, B. Grigoryan, U. Hahn, C. Hessler, K. Honkavaara, M. Hüning, R. Ischebeck, M. Jablonka, T. Kamps, M. Körfer, M. Krassilnikov, J. Krzywinski, P. Kulinski, C. Lackas, M. Liepe, A. Liero, T. Limberg, H. Loos, M. Luong, C. Magne, J. Menzel, P. Michelato, M. Minty, U.-C. Müller, D. Nölle, A. Novokhatski, C. Pagani, F. Peters, J. Petrowicz, J. Pflüger, P. Piot, L. Plucinski, K. Rehlich, I. Reyzl, A. Richter, J. Rossbach, E. Saldin, W. Sandner, H. Schlarb, G. Schmidt, P. Schmüser, J.R. Schneider, E. Schneidmiller, H.-J. Schreiber, S. Schreiber, D. Sertore, S. Setzer, S. Simrock, R. Sobierajski, B. Sonntag, B. Steffen, B. Steeg, F. Stephan, N. Sturm, K.P. Sytchev, K. Tiedtke, M. Tonutti, R. Treusch, D. Trines, D. Türke, V. Verzilov, R. Wanzenberg, T. Weiland, H. Weise, M. Wendt, T. Wilhein, I. Will, A. Winter, K. Wittenburg, S. Wolff, M. Yurkov, K. Zapfe