

# Räumliche Kohärenz eines Freie-Elektronen-Lasers im Vakuum-Ultraviolett

Rasmus Ischebeck

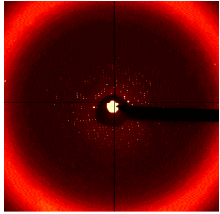
18. November 2003



Universität Hamburg

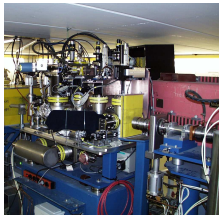


# Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers



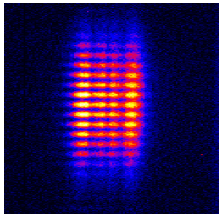
## Einführung

- Bedeutung der Kohärenz
- Definition und Messungen



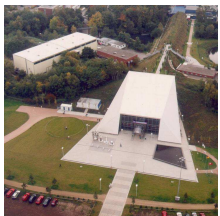
## Messung der Kohärenz am TTF-FEL

- Herausforderungen für die Messungen
- Experimenteller Aufbau



## Resultate

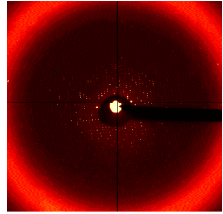
- Kohärenz als Funktion des Spaltabstandes
- Entwicklung im Undulator



## Ausblick

- Phase 2 des TTF-FEL

# Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers



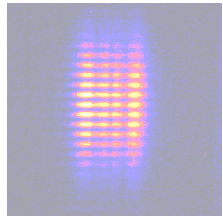
## Einführung

- Bedeutung der Kohärenz
- Definition und Messungen



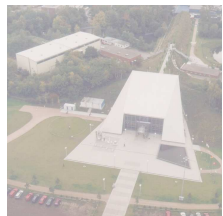
## Messung der Kohärenz am TTF-FEL

- Herausforderungen für die Messungen
- Experimenteller Aufbau



## Resultate

- Kohärenz als Funktion des Spaltabstandes
- Entwicklung im Undulator

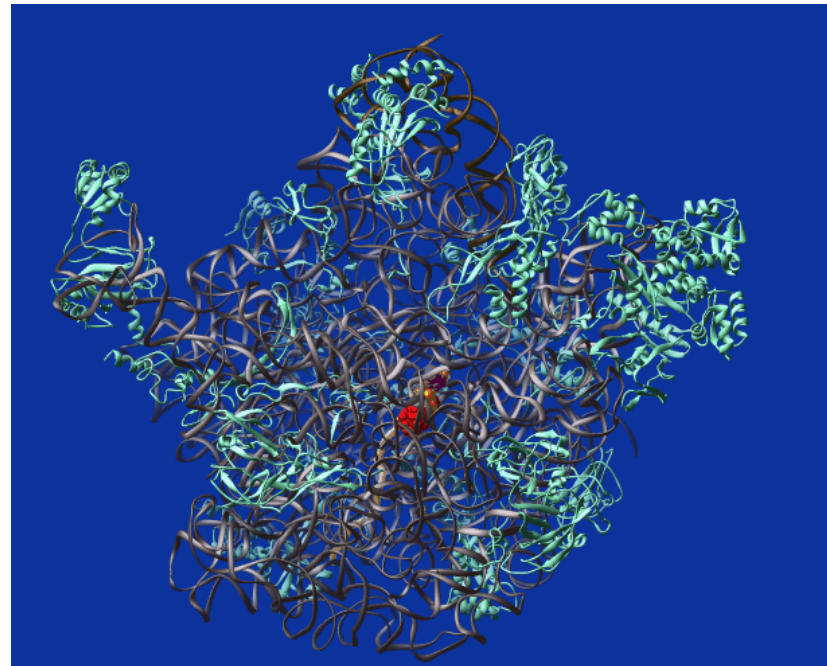
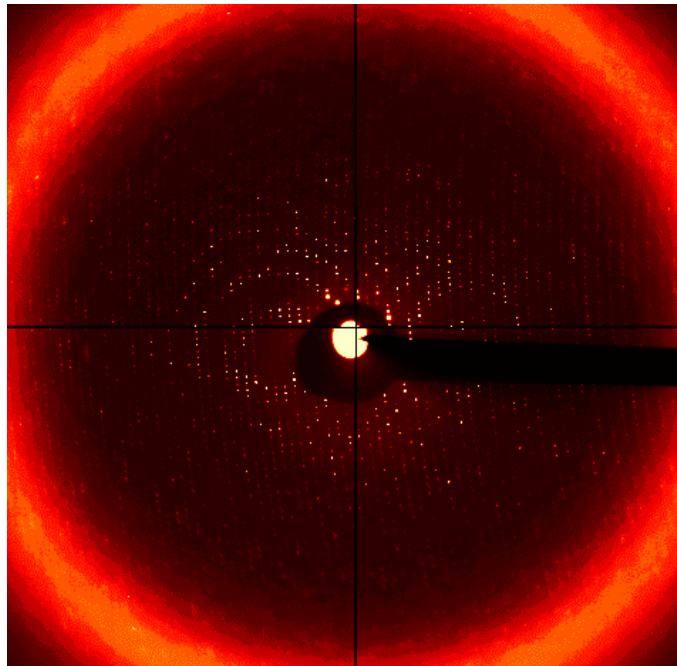


## Ausblick

- Phase 2 des TTF-FEL

# Bedeutung der Kohärenz für die Kristallographie

- Beugungsbild eines Kristalls  $\rightsquigarrow$  Molekülstruktur  
hier: Ribosom



Aufnahmen: Jörg Harms, Arbeitsgruppe für Ribosomenstruktur, Max-Planck-Gesellschaft

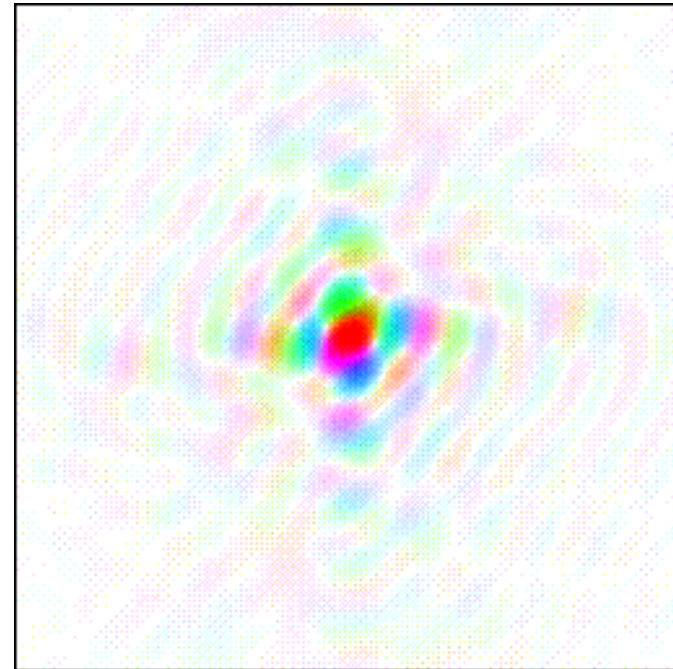
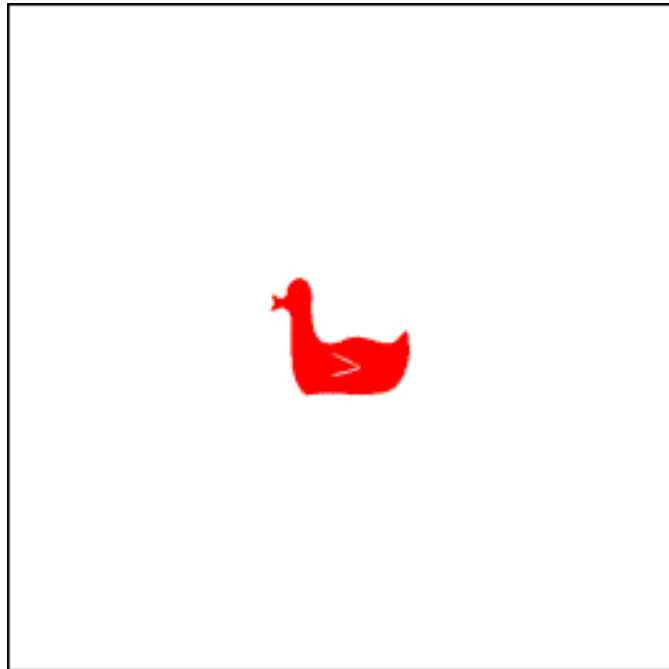
- Problem: Phase des Beugungsbildes ist nicht bekannt!

Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers

Bedeutung der Kohärenz

# Beugungsbild einer Ente

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



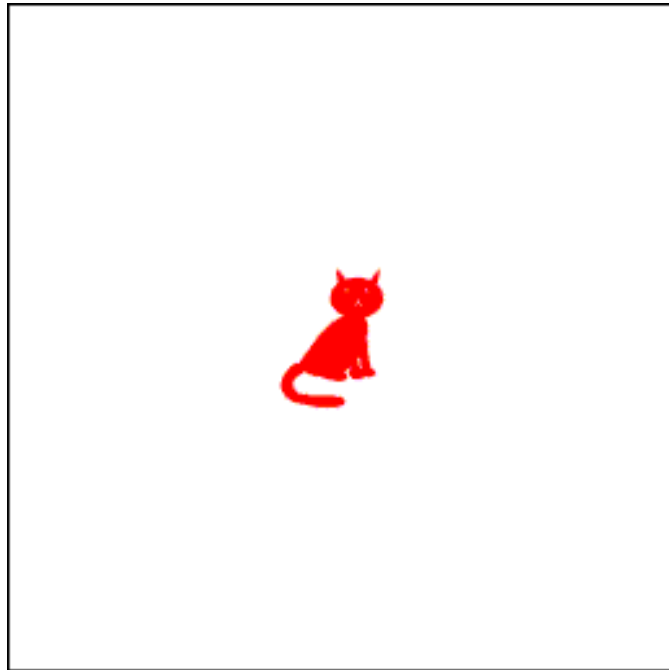
Bilder von Kevin Cowtan, Structural Biology Laboratory, University of York

Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers

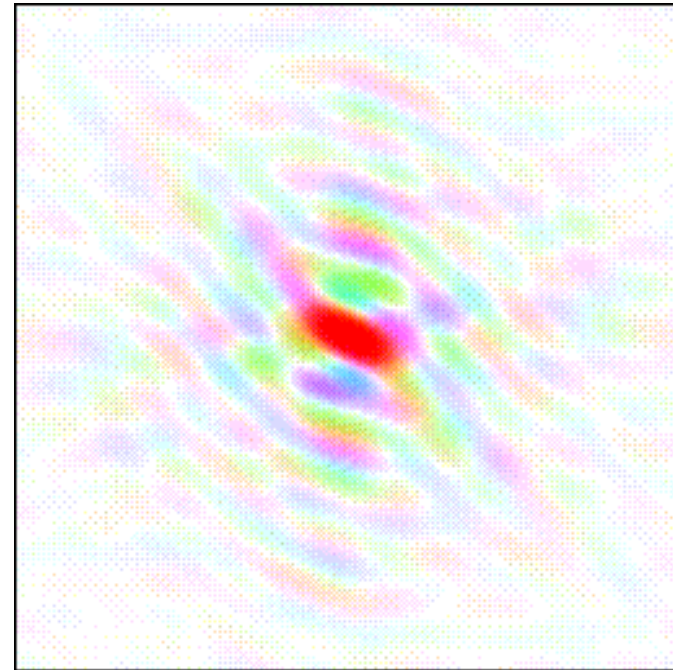
Bedeutung der Kohärenz

# Beugungsbild einer Katze

- Eine Katze



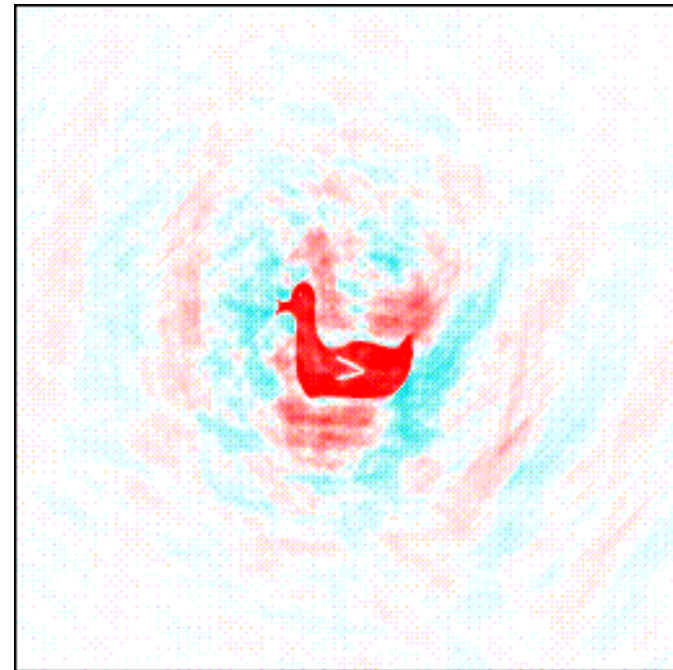
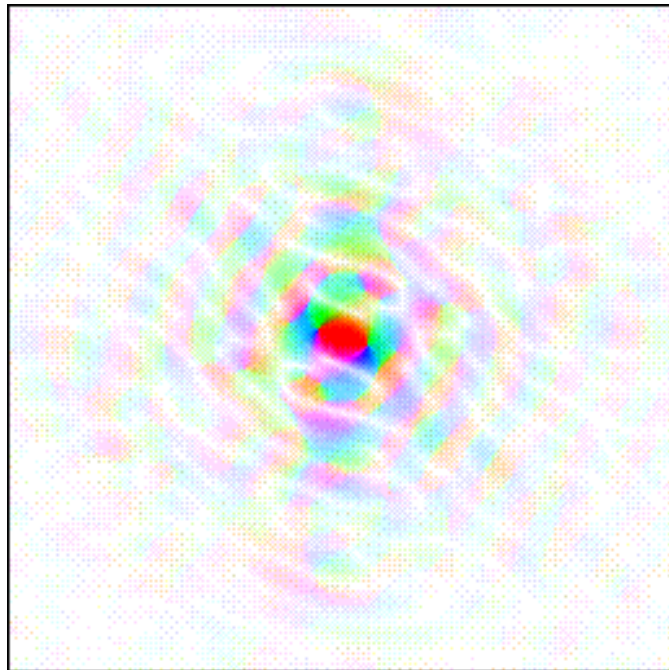
- und ihr Beugungsbild



Bedeutung der Kohärenz

# Rekonstruktion

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

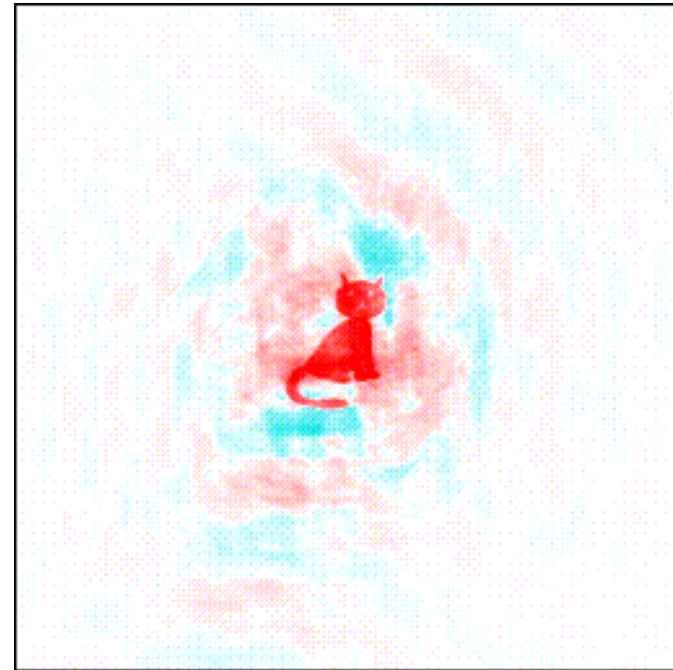
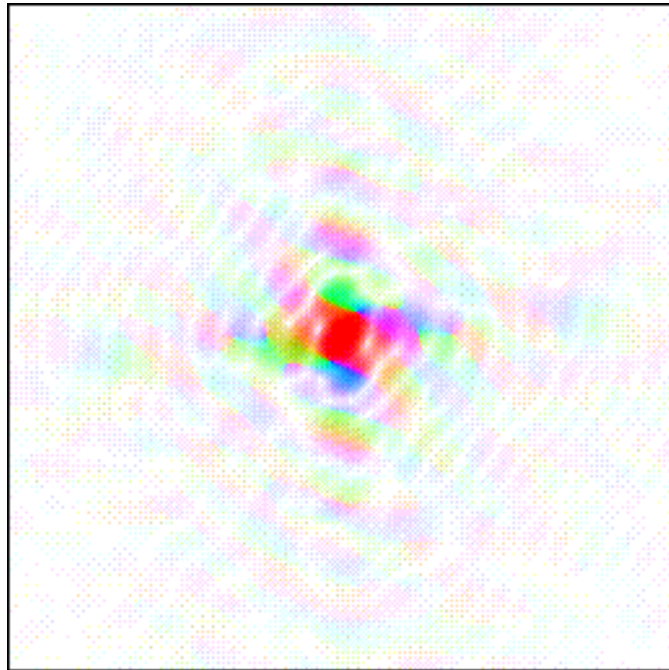


Das Ergebnis: eine Ente!

Bedeutung der Kohärenz

# Rekonstruktion

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

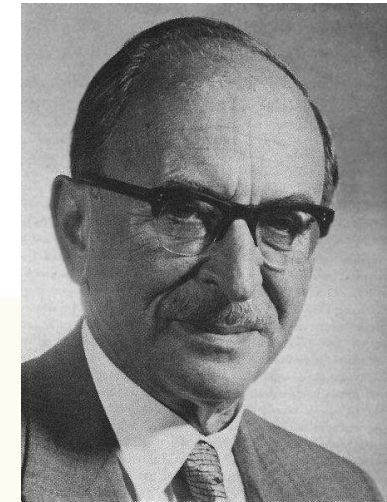
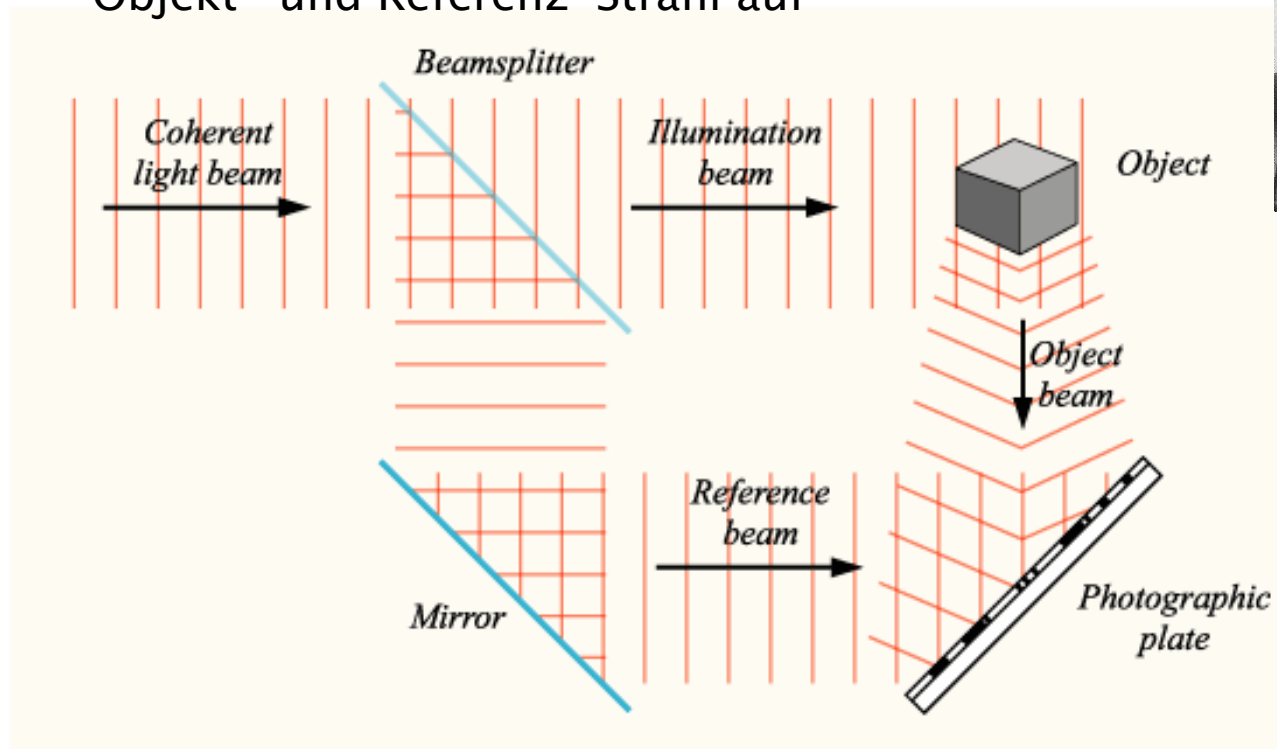


Dies ist das **Phasen-Problem**

Phasen-Problem

# Mögliche Lösung: Holografie

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



Dennis Gabor

- Notwendige Voraussetzung: Kohärenz der einfallenden Welle

# Definition von Kohärenz-Eigenschaften

- Elektromagnetische Welle: Darstellung einer Welle in  $z$ -Richtung mit Hilfe langsam veränderlicher Amplitude (LVA)

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

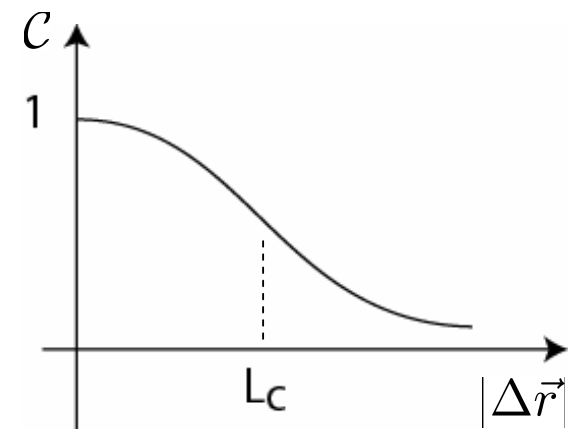
- Korrelationsfunktion

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

$$\tilde{\gamma}(\vec{r} - \vec{r}') = \frac{\tilde{\Gamma}(\vec{r}, \vec{r}')}{\tilde{\Gamma}(\vec{r}, \vec{r})}$$

- Kohärenzgrad oder Kohärenzfunktion

$$C(\Delta\vec{r}) = |\tilde{\gamma}(\vec{r} - \vec{r}')|$$



# Veranschaulichung von Kohärenz



Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers

# Kohärenz in Freie-Elektronen-Lasern

- Zerlegung der Strahlung in transversale Moden

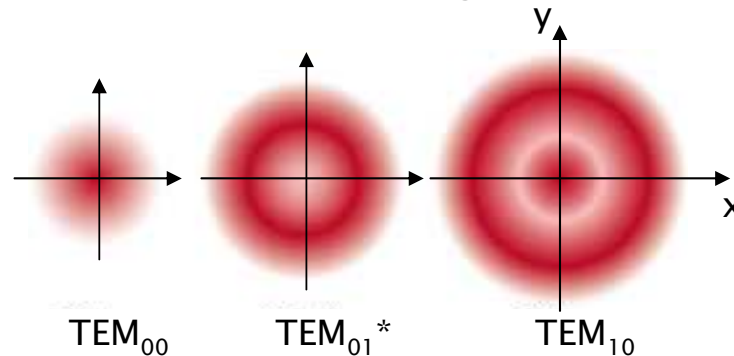
$$\tilde{E}(r, \vartheta, z) = \sum_{n,m} C_{nm}(z) \tilde{A}_{nm}(r, \vartheta)$$

- Entwicklung der Moden im Undulator

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

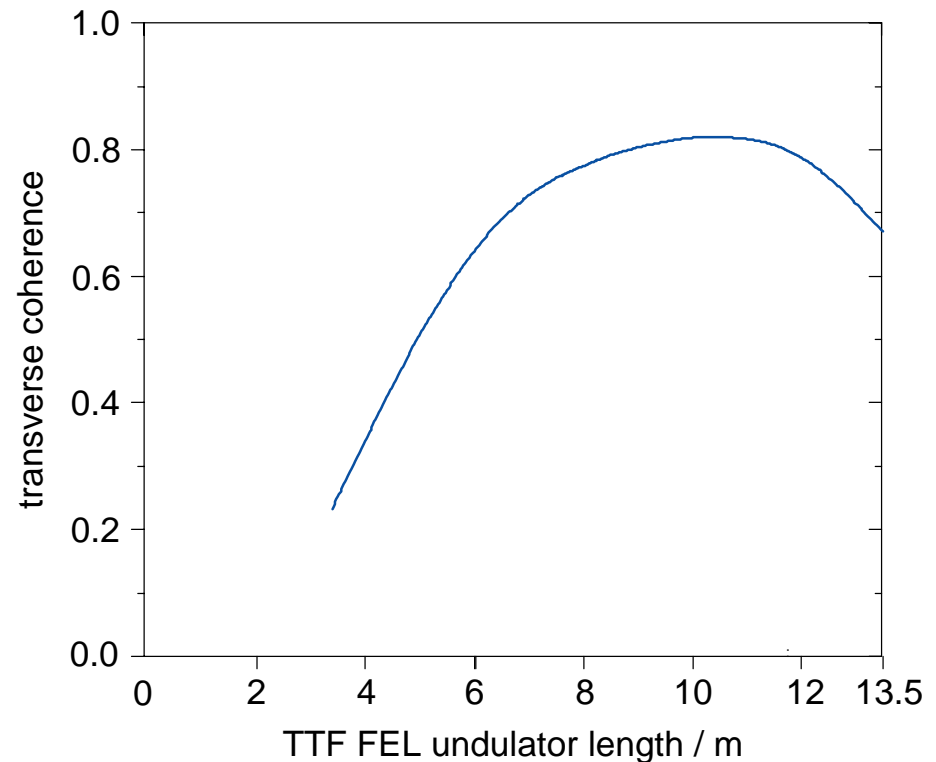
- TEM-Moden (transversales elektrisches und magnetisches Feld)

- Querschnitte der ersten 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

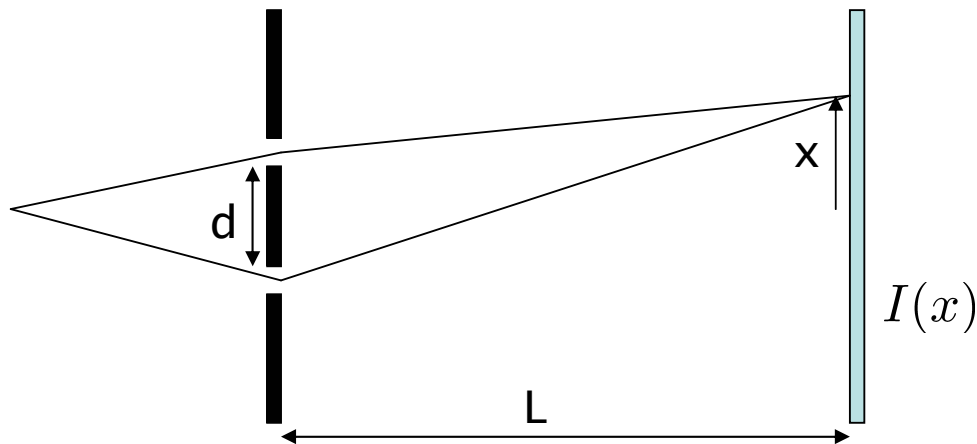


Simulationen von Saldin, Schneidmiller, Yurkov

Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers

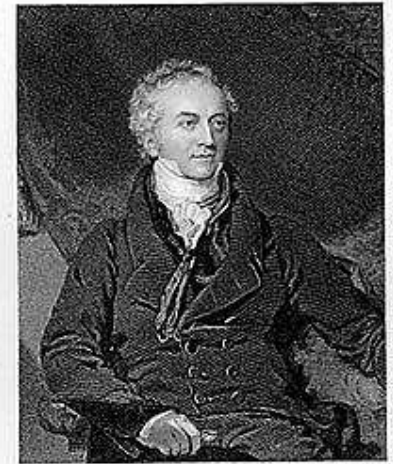
# Kohärenzmessung durch Interferenz-Experimente

- Beugung am Doppelspalt:



- Sichtbarkeit der Interferenzstreifen:

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



THOMAS YOUNG, F.R.S., F.R.A.S., F.R.C.S.  
Thomas Young M.D.  
1773-1829

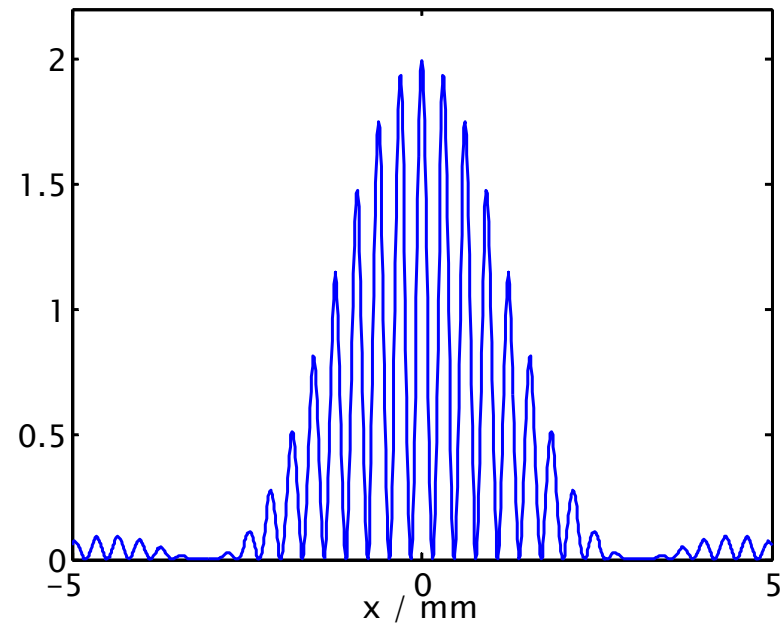
# Fraunhofer-Beugung am Doppelspalt

- Fernfeld-Bedingung

$$L \gg \frac{\pi d^2}{\lambda}$$

- Beugung am Doppelspalt  
mit Abstand  $d$   
und Breite  $w$

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



# 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

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

# 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

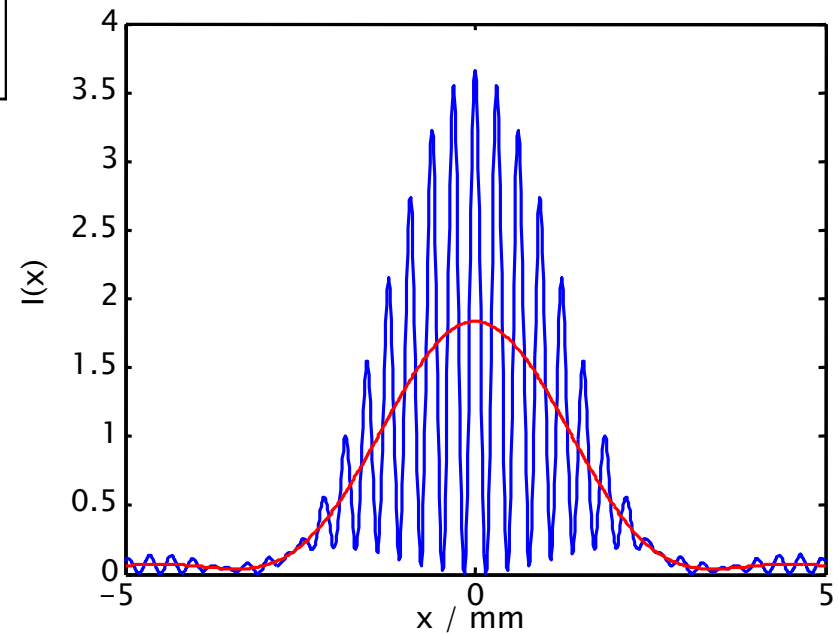
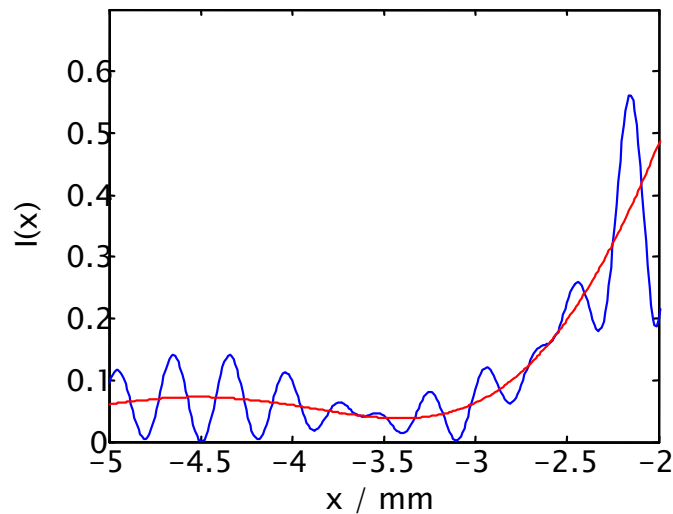
$$I_{1,2}(x) = \left( \frac{\sin(\pi w(x \pm d/2)/(\lambda L))}{\pi w(x \pm d/2)/(\lambda L)} \right)^2$$

- Sichtbarkeit  $\mathcal{V}(x)$  ist nun eine Funktion von  $x$

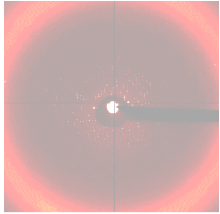
# Fresnel-Beugung am Doppelspalt

- Interferenzmuster

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

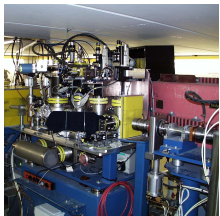


# Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers



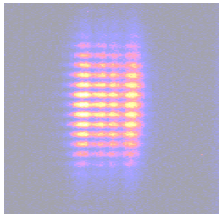
## Einführung

- Bedeutung der Kohärenz
- Definition und Messungen



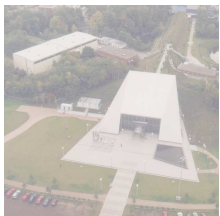
## Messung der Kohärenz am TTF-FEL

- Experimenteller Aufbau
- Analyse von Beugungsbildern



## Resultate

- Kohärenz als Funktion des Spaltabstandes
- Entwicklung im Undulator

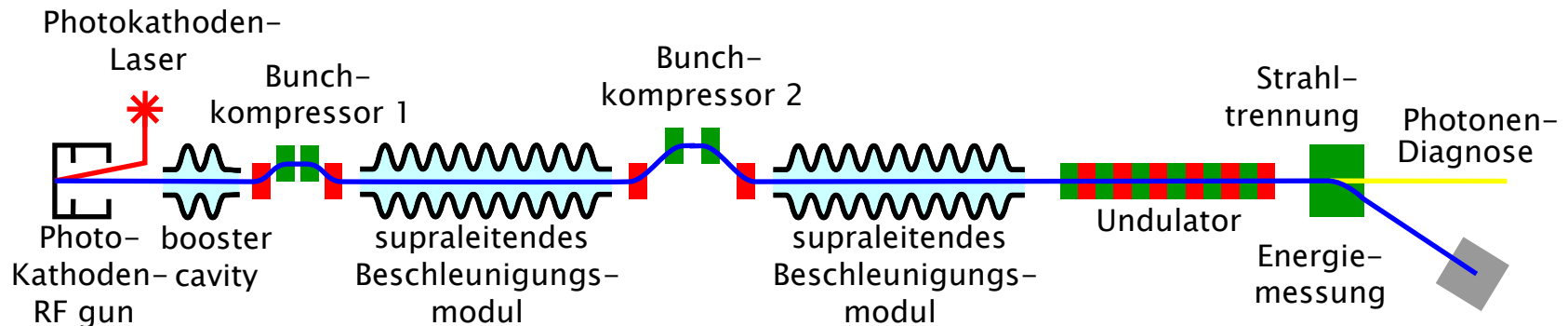


## Ausblick

- Phase 2 des TTF-FEL

## Experimenteller Aufbau

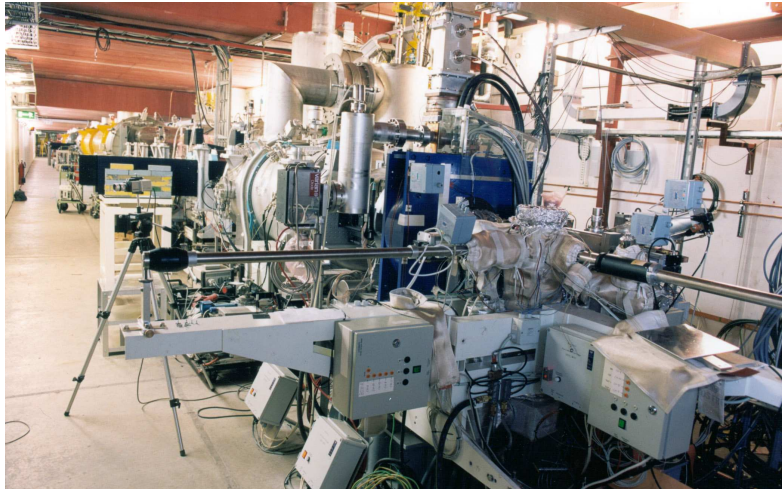
# TESLA-Test-Anlage und VUV-FEL



- Länge: 120m
- Elektronen-Energie: 260MeV
- Spitzenstrom: 1kA
- Wellenlänge des FEL: 100nm
- Spitzenleistung des FEL: 1GW
- Pulsenergie: 30...100 $\mu$ J
- Brillanz des FEL:  $4 \cdot 10^{28}$  Photonen / (s mm<sup>2</sup> mrad<sup>2</sup> 0.1% Bandbreite)

Experimenteller Aufbau

# TESLA-Test-Anlage und VUV-FEL



Injektor



supraleitendes  
Beschleuniger-Modul



Undulator

Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers

Experimenteller Aufbau

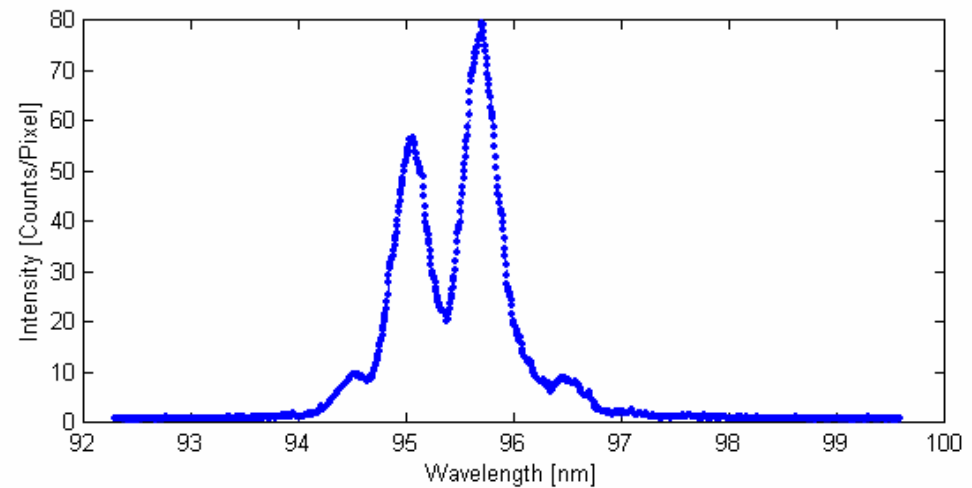
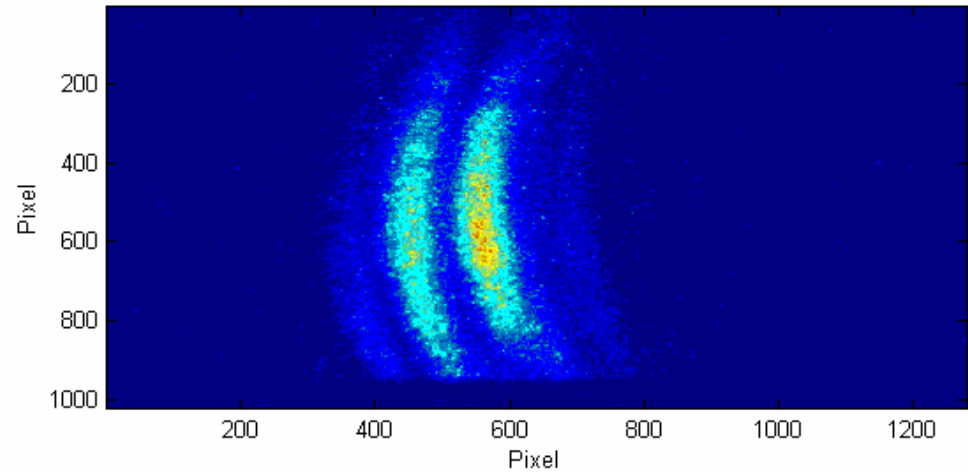
# Der TTF Freie-Elektronen-Laser

Unterschiede zu gewöhnlichen Lasern:

- große Fluktuationen in der Intensität und Wellenlänge durch
  - stochastischen Ursprung der Strahlung
  - Instabilitäten im Elektronen-Strahl
- kein optischer Resonator
  - Strahlung ist nicht auf die zentrale Mode beschränkt
  - transversale Kohärenz nur innerhalb der Moden
- Strahlung wird in einem einzigen Durchlauf von einem ultra-relativistischen Teilchenpaket erzeugt
  - Begrenzte longitudinale Kohärenz

## Experimenteller Aufbau Spektra

- Messung durch Kamera hinter Gitter-Spektrometer
- Intensität als Funktion der Wellenlänge



Experimenteller Aufbau

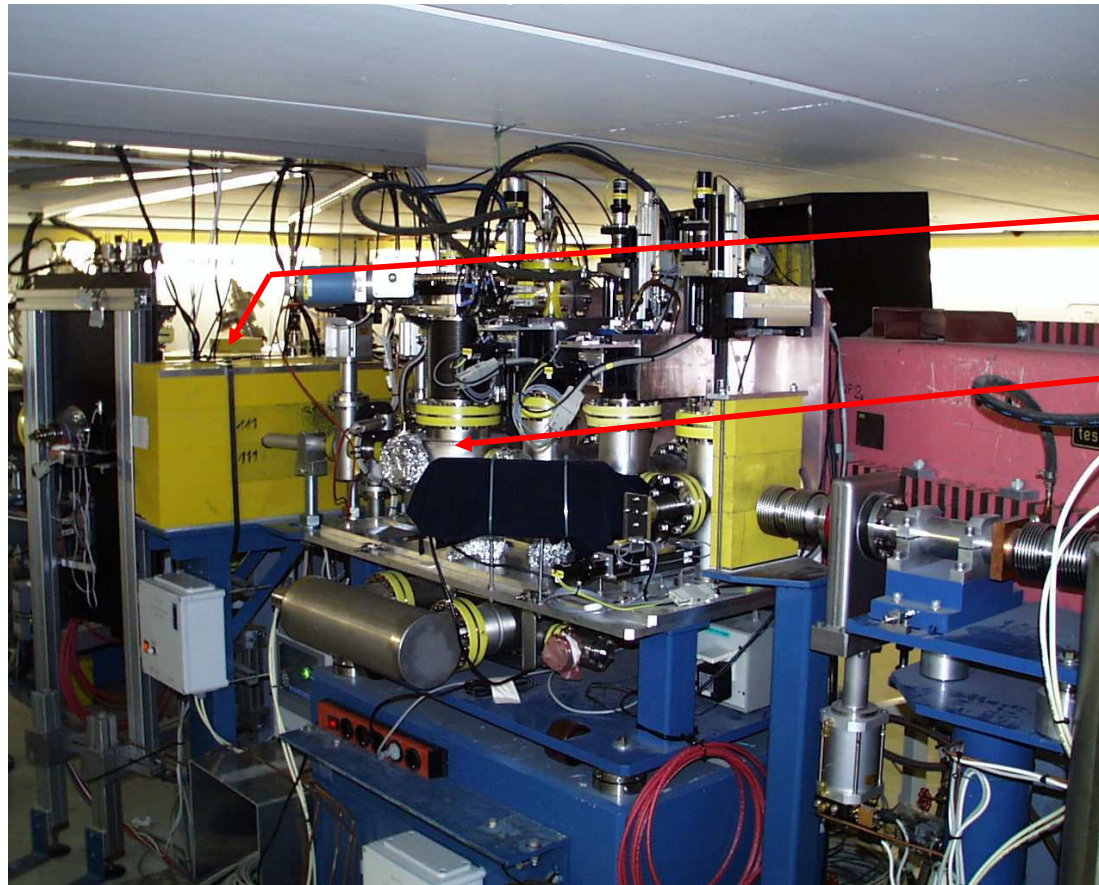
# Der TTF Freie-Elektronen-Laser

Bei der Durchführung von Experimenten muss bedacht werden:

- Wellenlänge 100nm: Vakuum-Ultraviolett
  - wird von jeglichem Material absorbiert
  - der Strahl kann nicht aus der Vakuumkammer geholt werden
  - der komplette Aufbau ist im staubfreien Ultrahoch-Vakuum des Beschleunigers
- Hohe Intensität des FEL:
  - 10...100  $\mu\text{J}$  in 100fs, also 1GW auf 10mm<sup>2</sup>
  - Verwendung eines zweistufigen Detektors:
    - Wandlung in sichtbares Licht mit einem Ce:YAG-Kristall
    - Abbildung auf einen CCD-Chip
    - Wie gut ist die Auflösung dieses Detektors?
  - Kühlung der Blenden und Fluoreszenz-Kristalle

Experimenteller Aufbau

# Photonen-Diagnose beim TTF-FEL



Kristall und  
Kamera

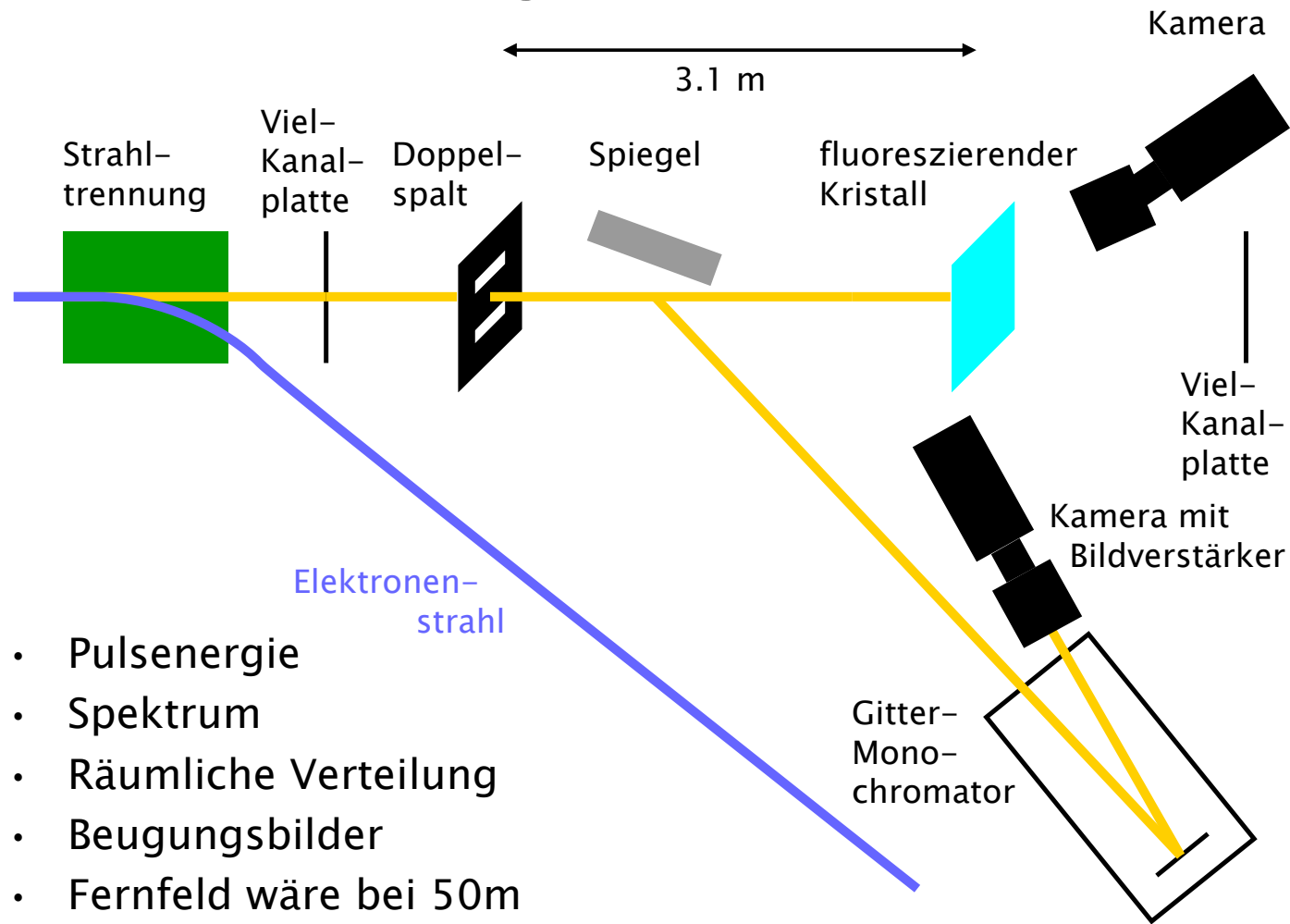
Doppelspalt

Photonen

Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers

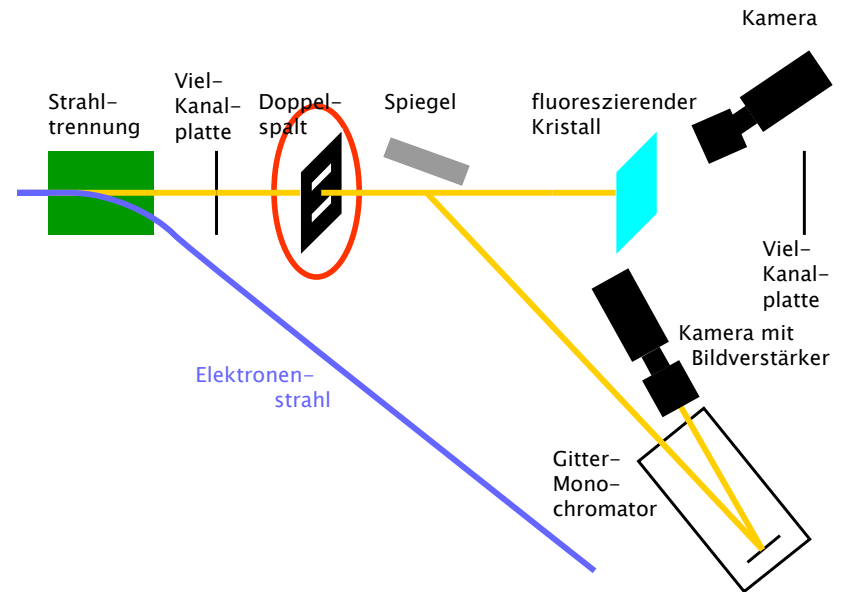
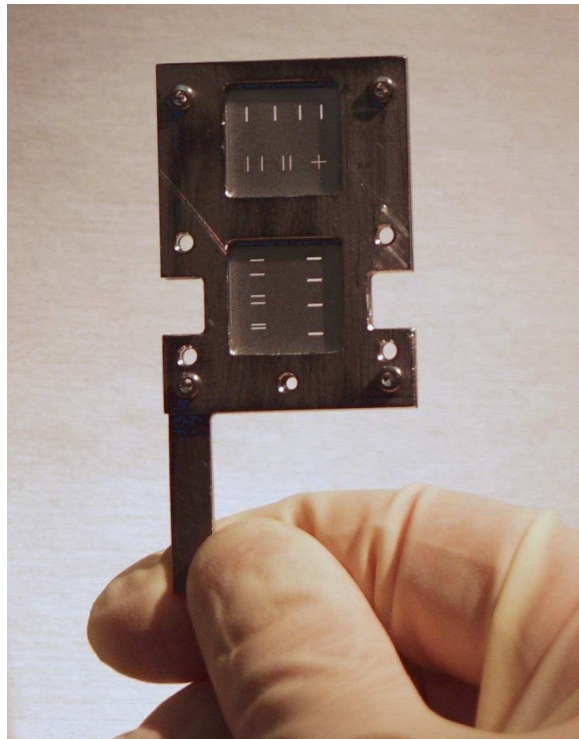
## Experimenteller Aufbau

# Photonen-Diagnose beim TTF-FEL



# Experimenteller Aufbau Doppelspalte

- Durch Laser in Edelstahlfolie geschnitten



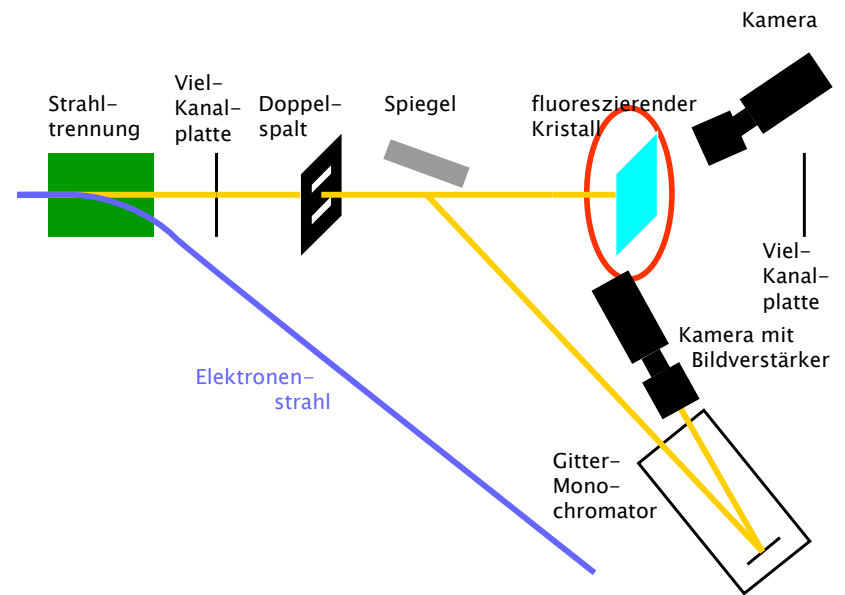
- Spaltabstände: 0.5, 1, 2 und 3mm
- Spaltbreite: 100 $\mu$ m
- Spallänge: 2mm
- Werden durch zwei Schrittmotoren positioniert

# Experimenteller Aufbau Fluoreszenzkristall



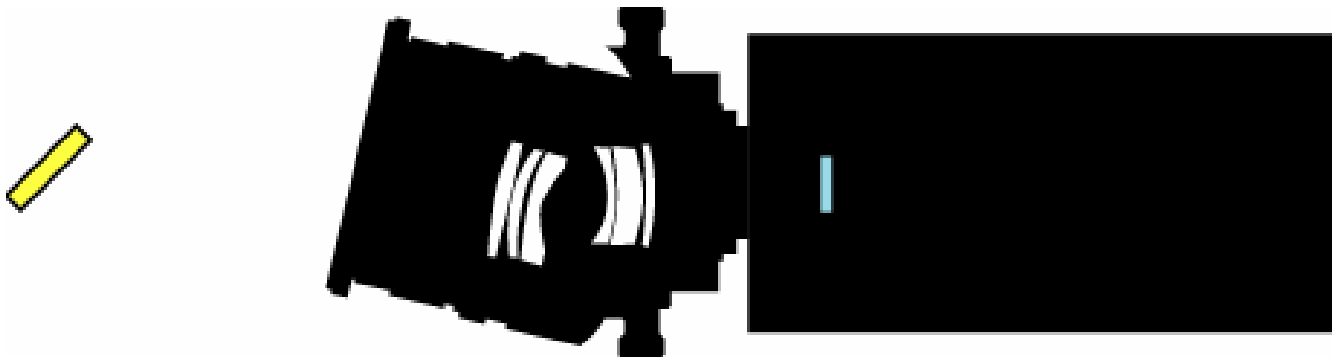
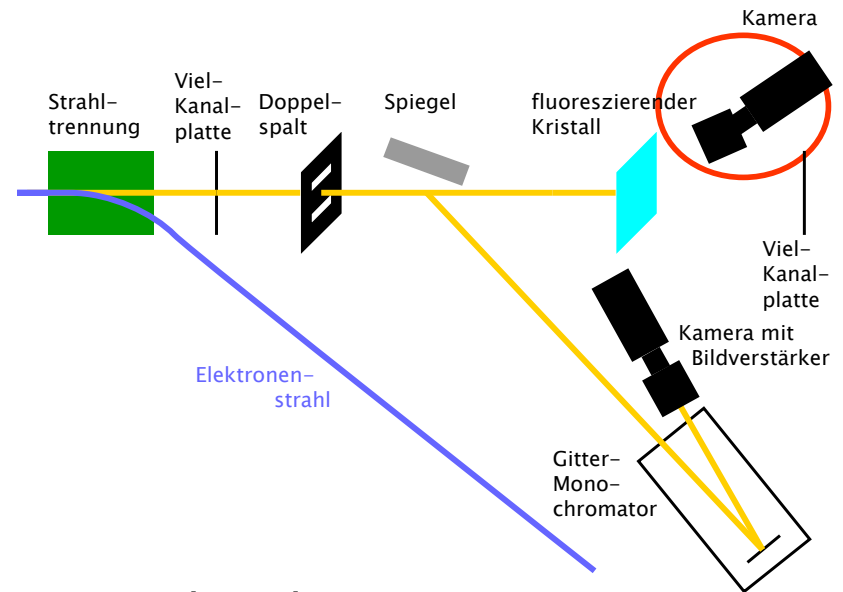
Ce:YAG-Kristall

auf einer wassergekühlten  
Halterung

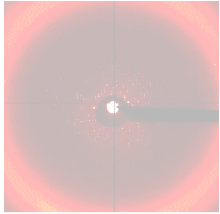


# Experimenteller Aufbau Kamera

- Der Platz hinter dem Kristall ist durch einen anderen Detektor besetzt
- Kamera schaut unter einem Winkel von  $45^\circ$  auf den Kristall
- Geneigtes Objektiv für gute Fokussierung über den schräg stehenden Kristall



# Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers



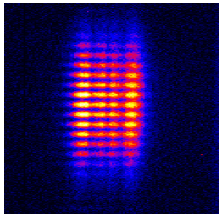
## Einführung

- Bedeutung der Kohärenz
- Definition und Messungen



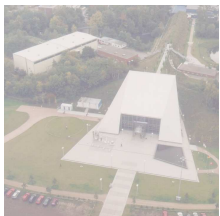
## Messung der Kohärenz am TTF-FEL

- Herausforderungen für die Messungen
- Experimenteller Aufbau



## Resultate

- Kohärenz als Funktion des Spaltabstandes
- Entwicklung im Undulator

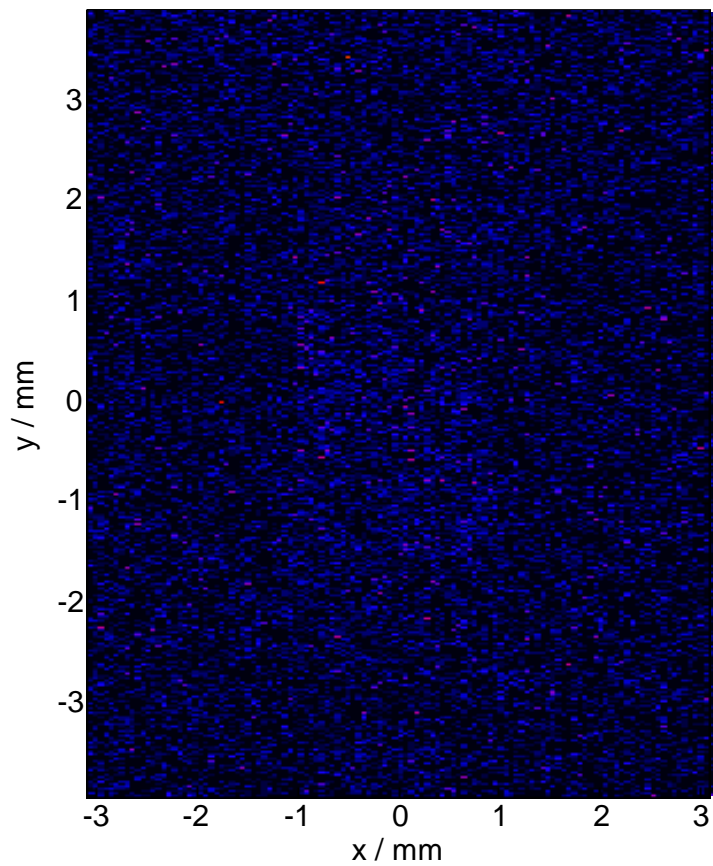


## Ausblick

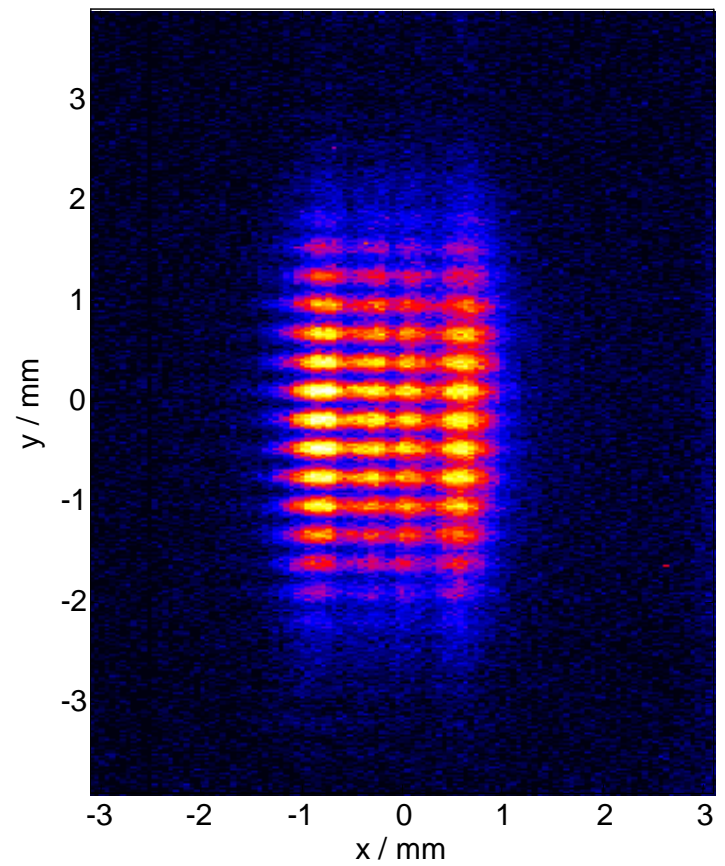
- Phase 2 des TTF-FEL

# Beugungsbilder

- Einzelbilder

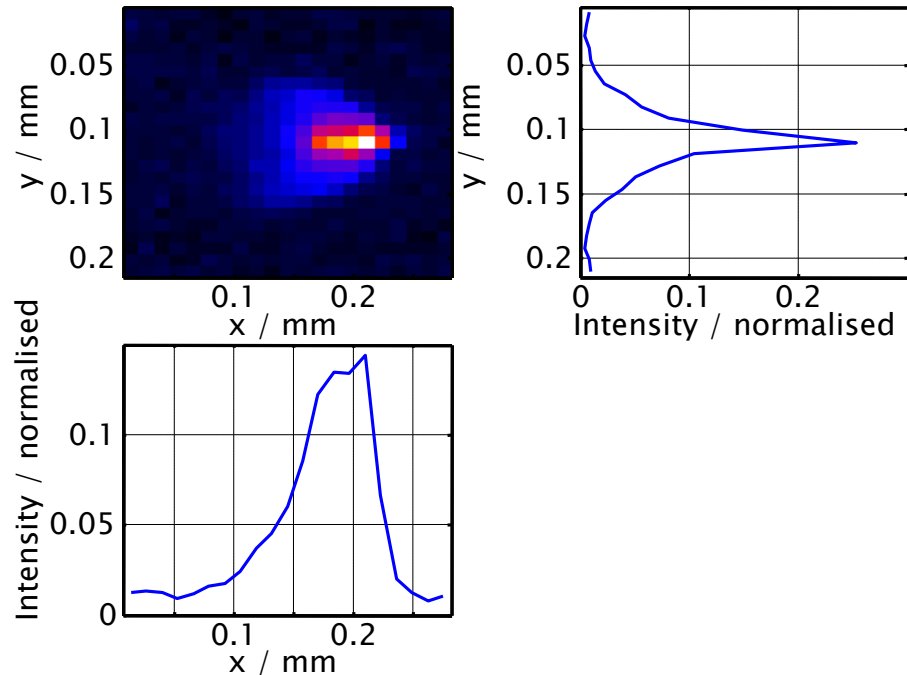


- Mittelwert von 100 Bildern



# Effekte des experimentellen Aufbaus

- Fluoreszenz-Kristall (Ce:YAG):
  - Auflösung: gemessen mit Photokathodenlaser
  - Sättigung / nicht-lineare Fluoreszenz: gemessen mit FEL
- Kamera
  - Abbildungsschärfe: gemessen mit Testmuster und mit punktförmiger Lichtquelle
- CCD-Chip
  - Rauschen: gemessen am unbelichteten CCD



Bildverarbeitung

# Entfaltung der Auflösungsfunktion

- Gemessene Bild wird durch Beugung an der Blende und durch Linsenfehler beeinflusst
- Beschreibung als Faltung der wahren Verteilung  $\Psi$  mit der **Point Spread Function P**:

$$\Phi(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P(x - u, y - v) \cdot \Psi(u, v) du dv$$

- Für diskrete Verteilungen:

$$\Phi_{i,k} = \sum_{m,n} P_{i-m,k-n} \cdot \Psi_{m,n}$$

Bildverarbeitung

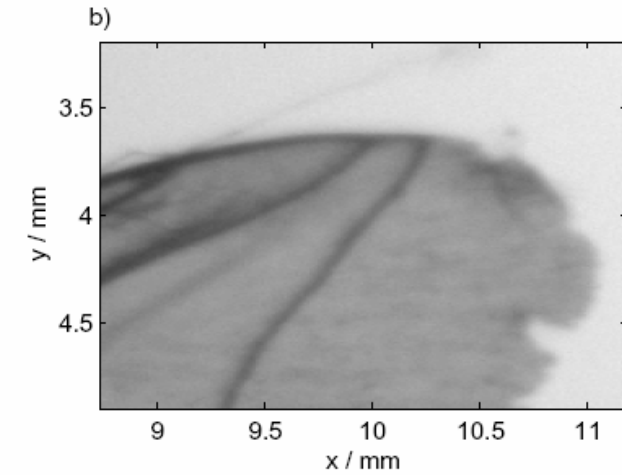
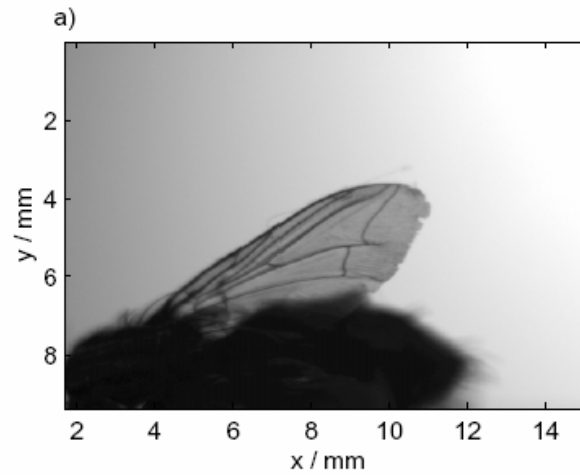
# Entfaltung der Auflösungsfunktion

- ⇒ Reduzierter Kontrast
  - ⇒ scheinbar reduzierte Kohärenz des FEL
  
- Wenn  $P$  bekannt ist, kann das Gleichungssystem im Prinzip nach  $\Psi$  aufgelöst werden
- Aber: Aufgrund des Rauschens im gemessenen Bild erscheinen so negative Werte für die wahre Intensität
  
- Die Intensität kann mit Hilfe des **Lucy–Richardson–Algorithmus** rekonstruiert werden
  - Iterativer Algorithmus
  - Maximiere die Wahrscheinlichkeit der Messung, mit gegebenen Randbedingungen

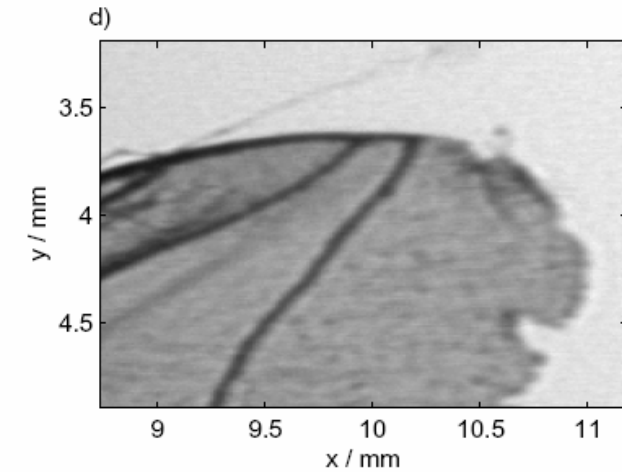
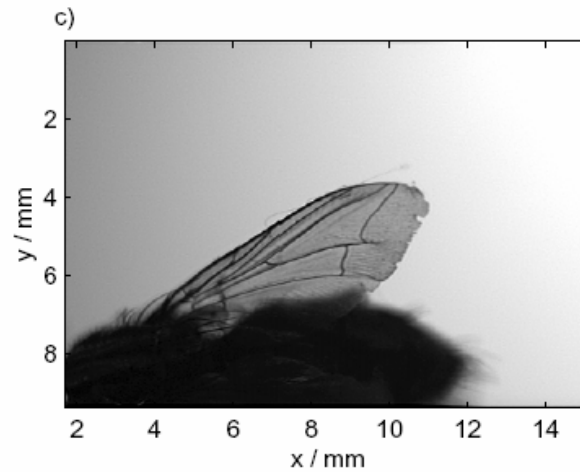
## Bildverarbeitung

# Entfaltung der Auflösungsfunktion

- unkorrigiertes Bild



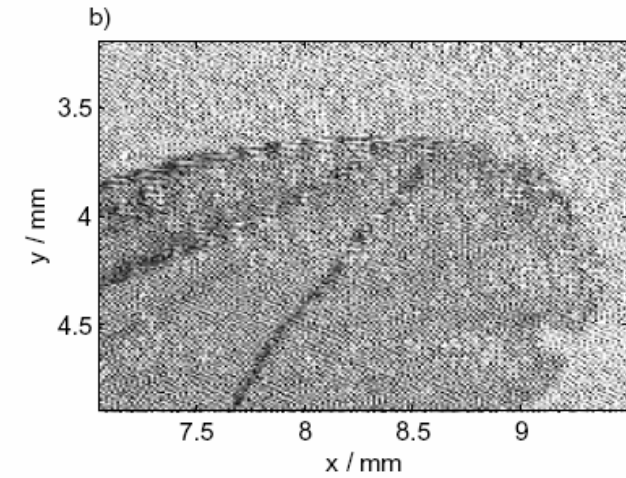
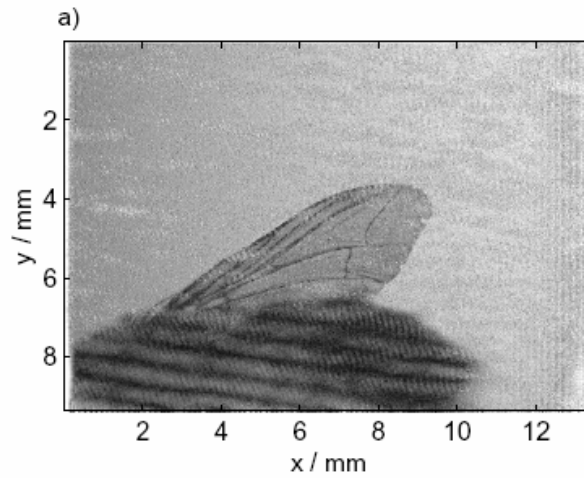
- Entfaltet mit dem Lucy-Richardson-Algorithmus



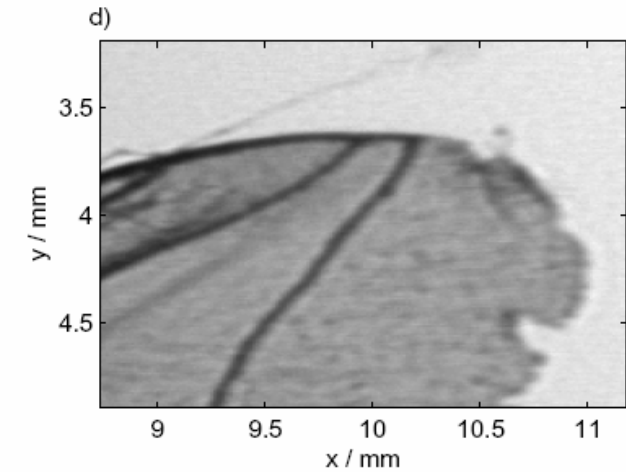
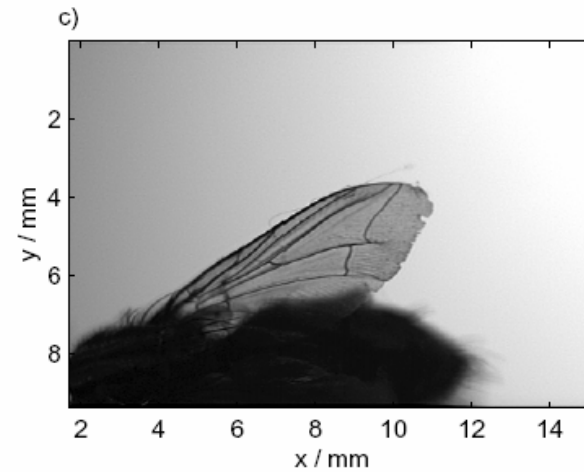
Bildverarbeitung

# Entfaltung der Auflösungsfunktion

- „Korrektur“ durch Auflösen des Gleichung-Systems



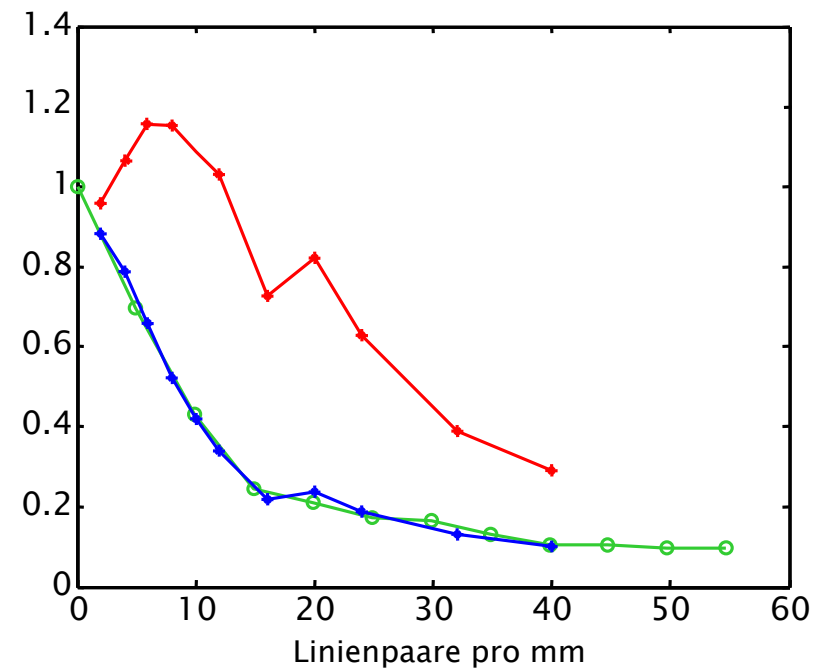
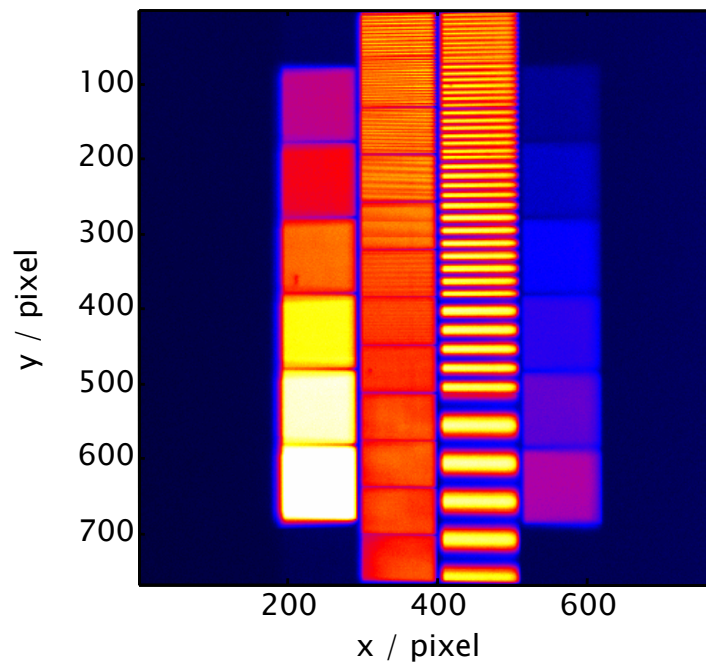
- Entfaltet mit dem Lucy-Richardson-Algorithmus



## Bildverarbeitung

# Entfaltung der Auflösungsfunktion

- Messung der Modulations-Transfer-Funktion (MTF) mit Test-Muster
- Messung der Verbesserung durch Lucy-Richardson-Algorithmus

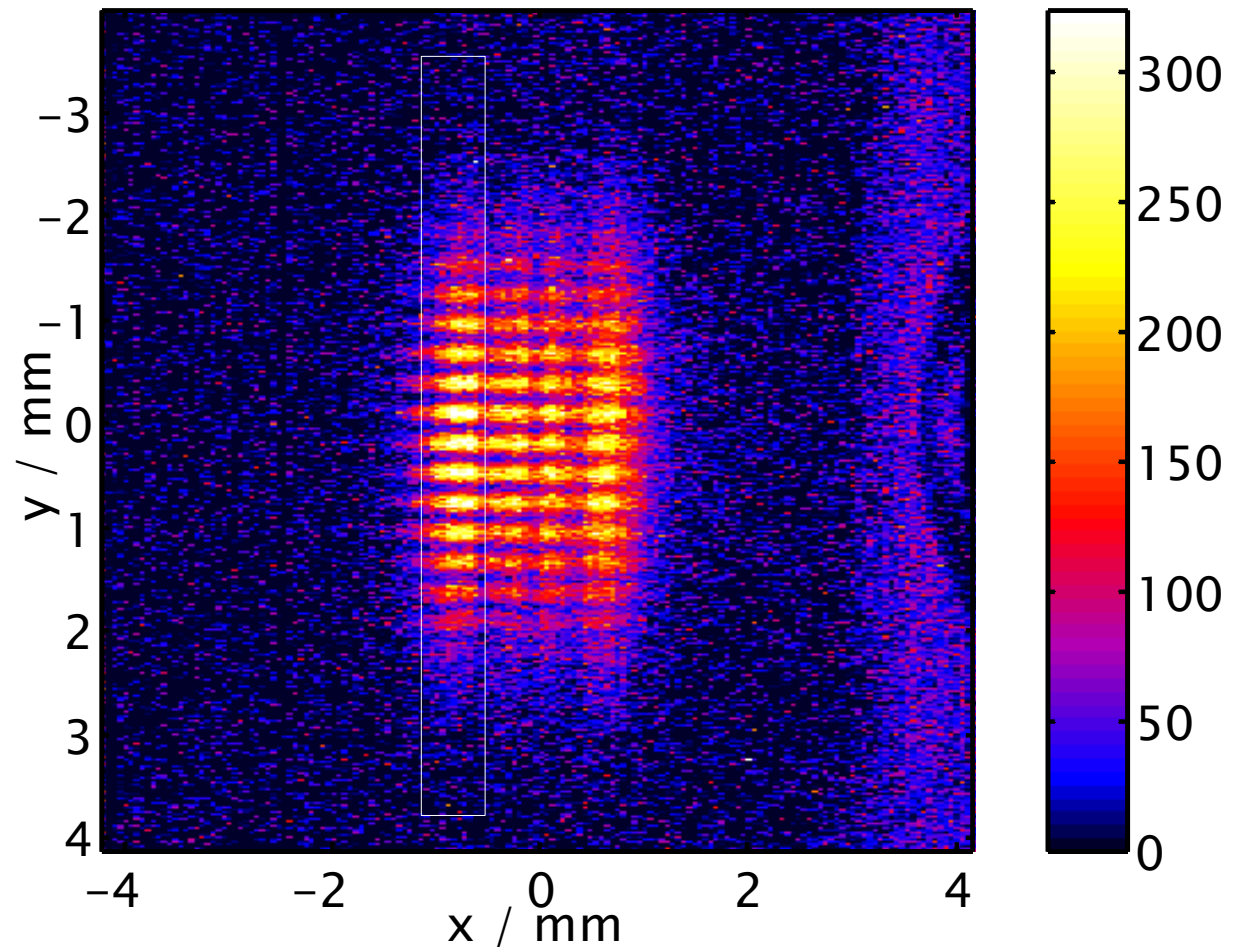


Bildverarbeitung

# Korrigiertes Beugungsbild

Korrekturen:

- Nicht-Linearität
- Auflösung



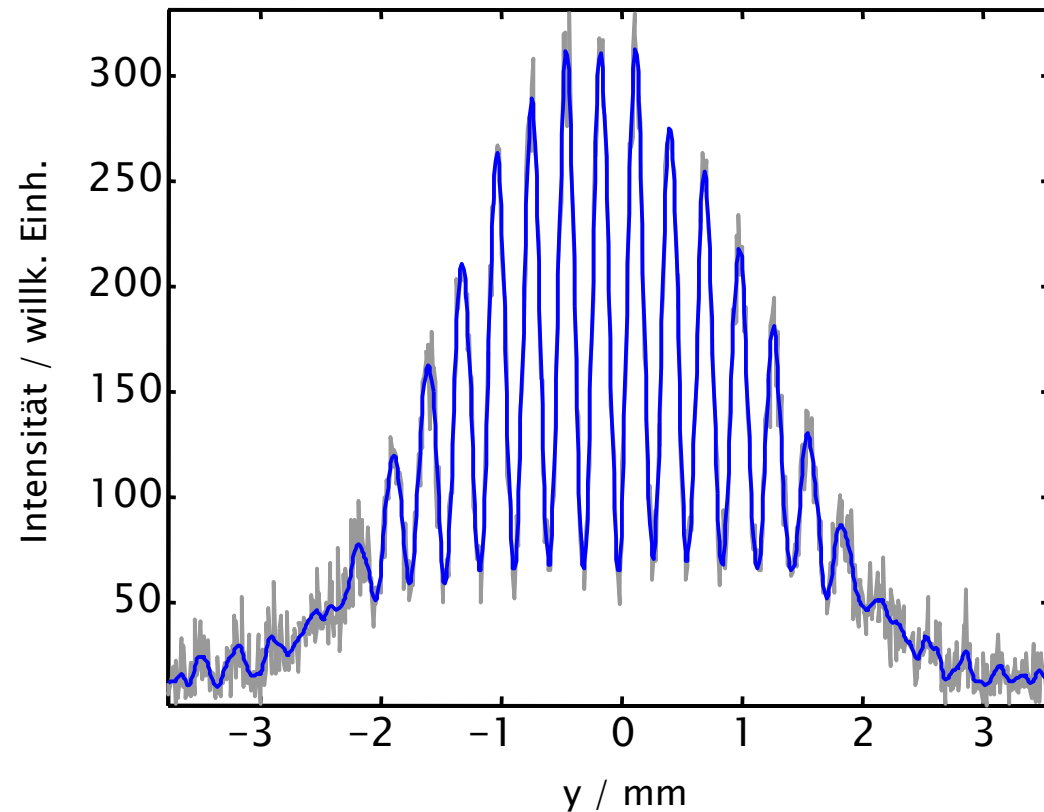
# Analyse

- Ziel: bestimme die Kohärenzfunktion
- Im Fernfeld, mit perfekter Apparatur:
  - Kohärenz ist gleich der Sichtbarkeit der Interferenzstreifen  
 $\mathcal{C} = \mathcal{V}$
- Hier:
  - Nahfeld
  - Ergebnis durch Apparatur beeinflusst
- Zeige jetzt zwei Analyse-Methoden:
  1. Sichtbarkeit der Interferenzstreifen
  2. Fit an die Intensitätsverteilung
- Mathematische Modellierung der Effekte zum Vergleich
  - Anwendung der Analyse auf simulierte Bilder

Analyse-Methode 1:

# Sichtbarkeit der Interferenzstreifen

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



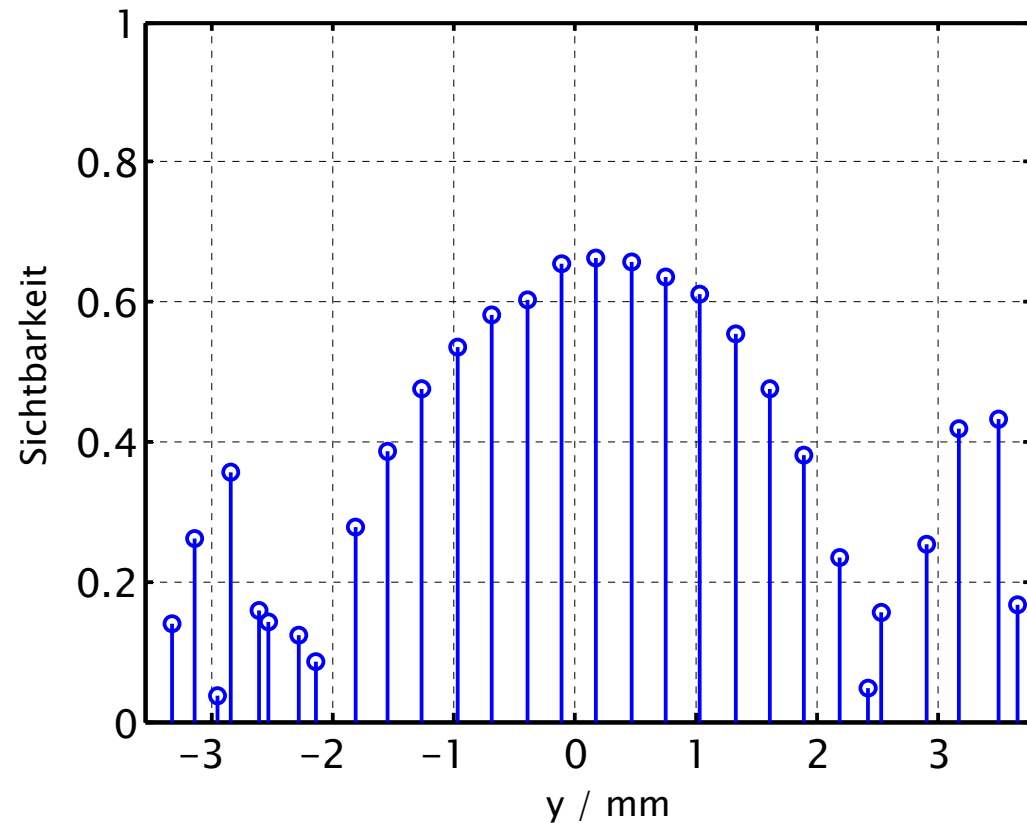
Analyse-Methode 1:

# Sichtbarkeit der Interferenzstreifen

- Berechnung der Sichtbarkeit

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

aus den Maxima und Minima der Kurve

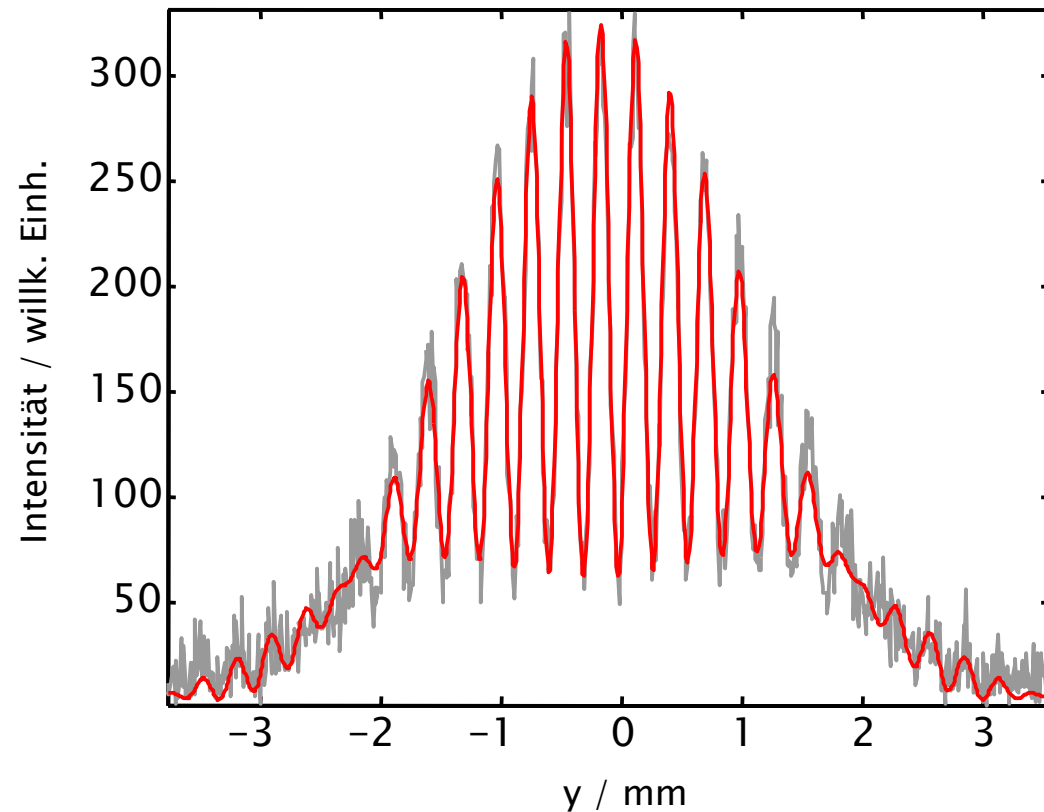


Analyse-Methode 2:

# Fit an die Intensitätsverteilung

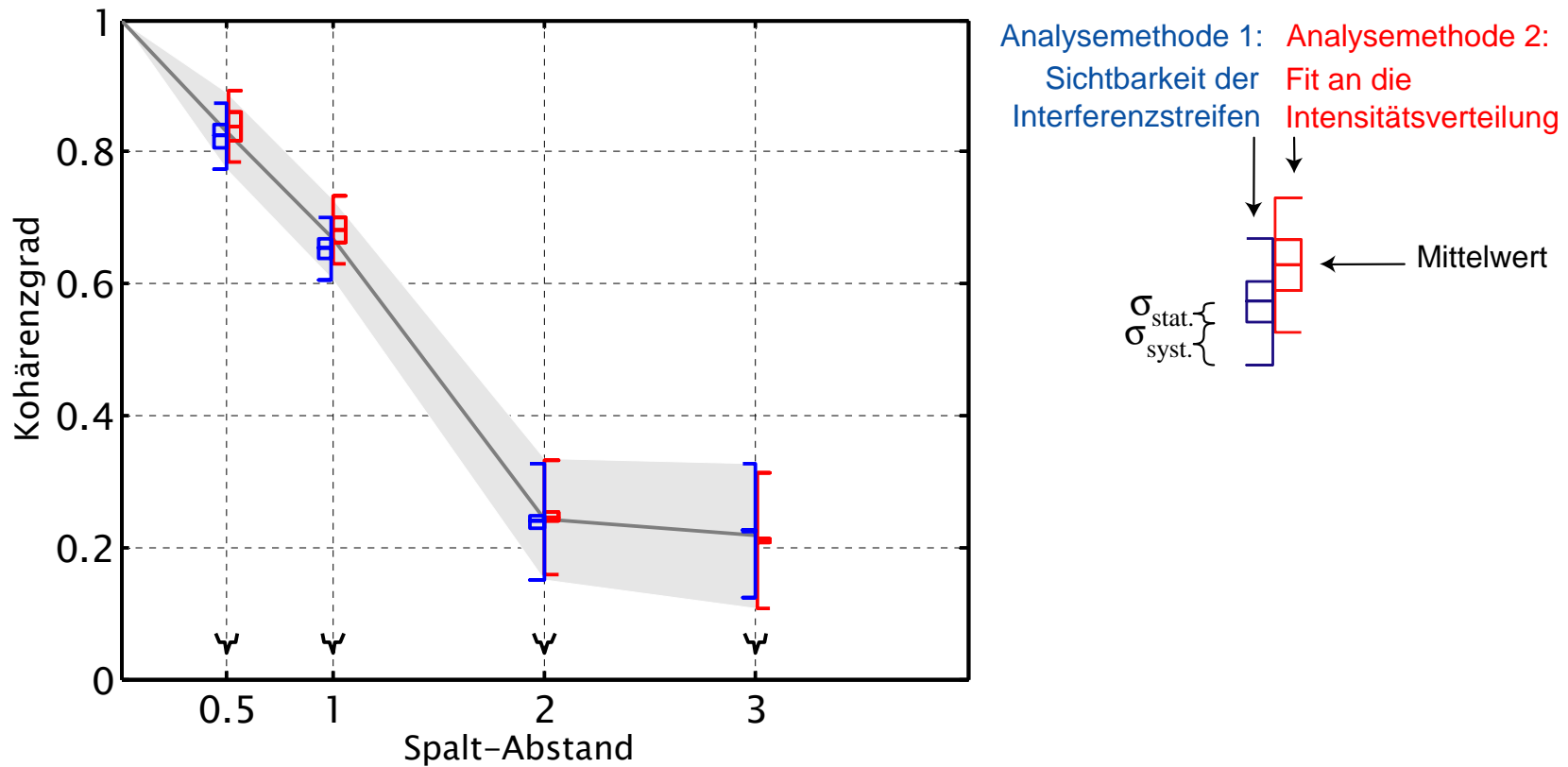
Passe 7 Parameter an:

- 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



# Ergebnisse der Messungen

## Kohärenz als Funktion des Abstandes

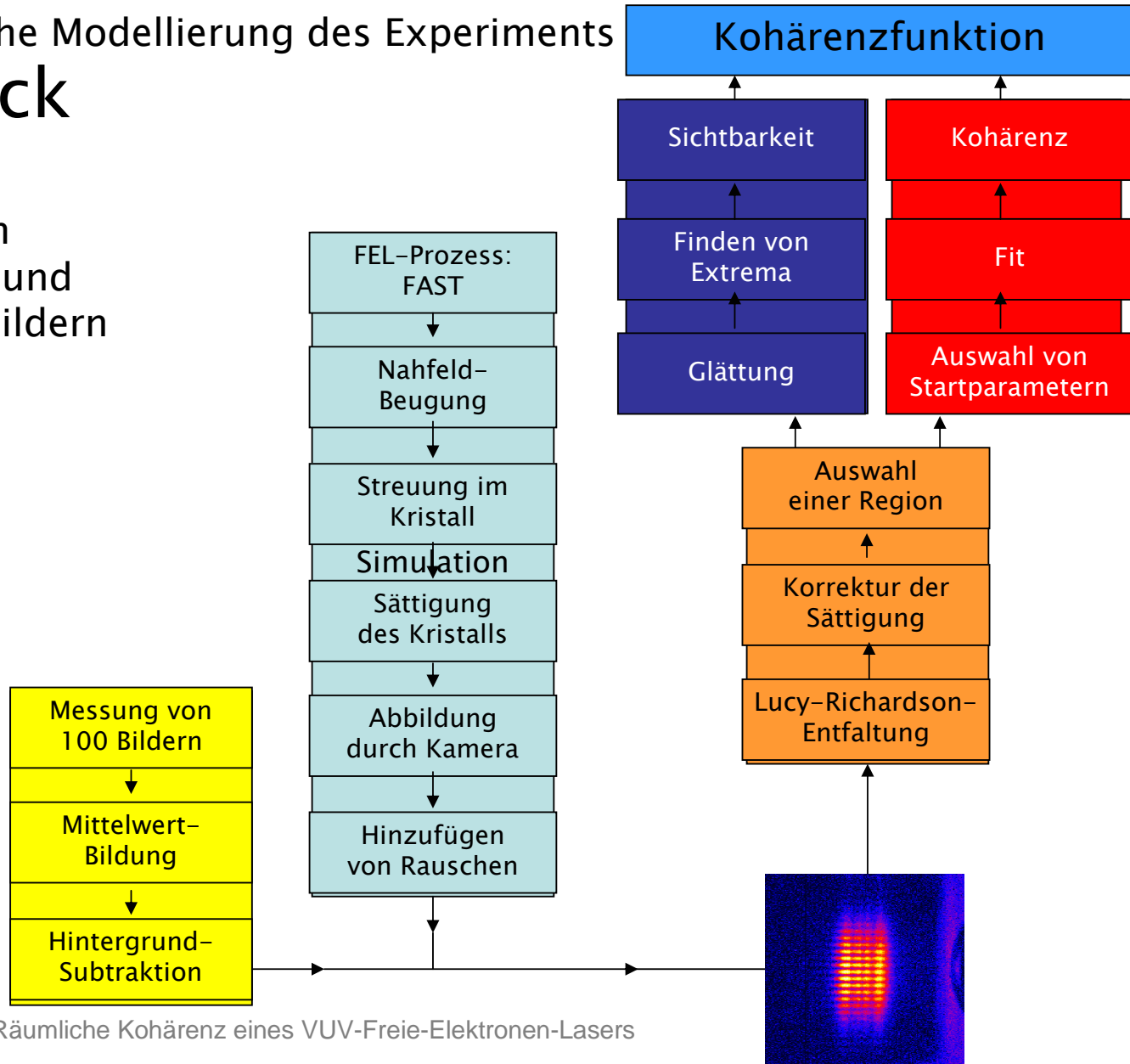


# Mathematische Modellierung des Experiments

- Ziele der Simulationen:
  - Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messungen
  - Überprüfung der Bildverarbeitungs- und Analyse-Routinen
- Simulation von
  - FEL-Prozess (M. Yurkov)
  - Nahfeld-Beugung
  - Apparative Störungen
    - Fluoreszenzkristall
      - Streuung gemessen mit Photokathoden-Laser
      - Linearität gemessen im Vergleich mit kalibriertem Detektor
    - Kamera-Objektiv vermessen mit Test-Dia und Punktblende
    - CCD-Detektor

# Mathematische Modellierung des Experiments Überblick

Vergleich von  
gemessenen und  
simulierten Bildern

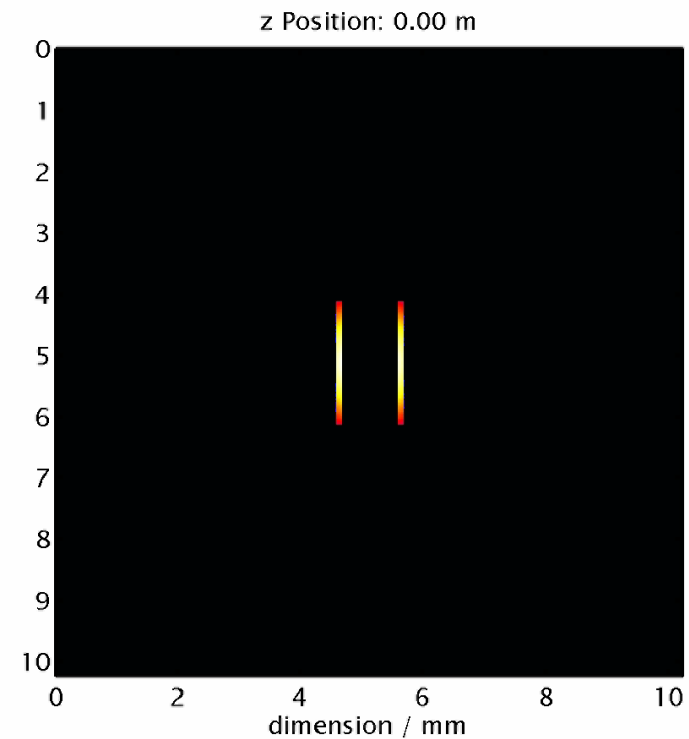


# Mathematische Modellierung des Experiments

## Interferenzeffekte

### Nahfeld-Beugung (GLAD)

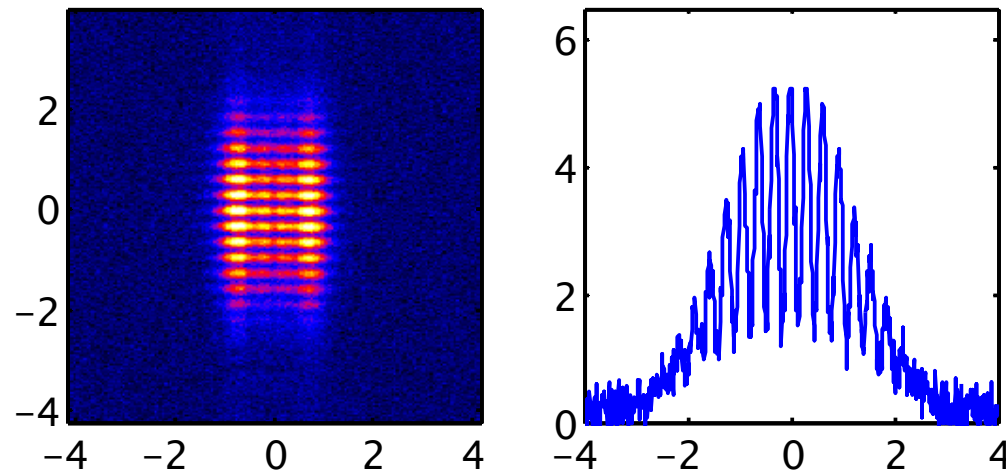
- Darstellung als klassisches elektromagnetisches Feld mit langsam veränderlicher Amplitude
- Beugungseffekte werden im Fourier-Raum berechnet
- dargestellt auf einem Gitter



# Mathematische Modellierung des Experiments

## Simulation des Messaufbaus

- Fluoreszenz-Kristall
  - Aufweitung durch Streuung: Faltung mit einer gaußförmigen Verteilung
  - Nicht-Linearität
- Abbildung durch Kamera: Faltung mit gemessener Point Spread Function
- CCD-Detektor: Hinzufügen von Pixelrauschen



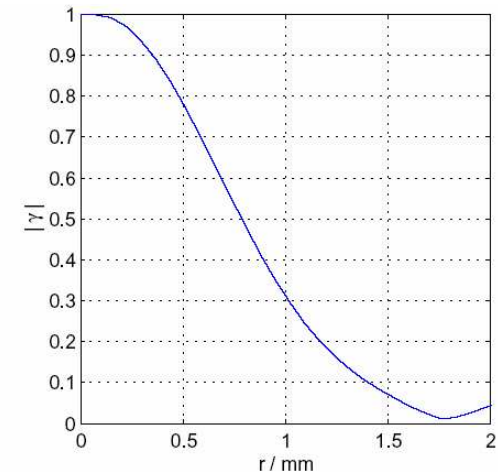
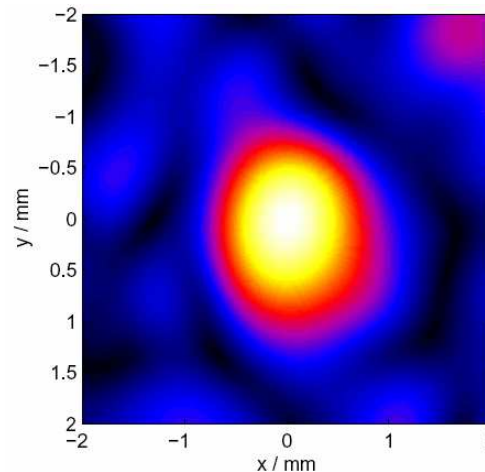
## Mathematische Modellierung des Experiments

# Analyse von simulierten Bildern

- Entfaltung der Auflösungsfunktion
- Korrektur der Nicht-Linearität des Fluoreszenzkristalls
- Projektion eines ausgewählten Bereichs
- Anwendung der Analysemethoden
  - Sichtbarkeit der Interferenzstreifen
  - Fit an die Intensitätsverteilung

- Bestimmung der Korrelationsfunktion für die Welle direkt vor dem Doppelspalt

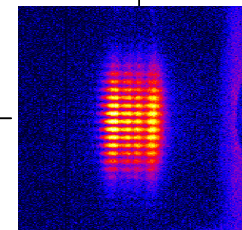
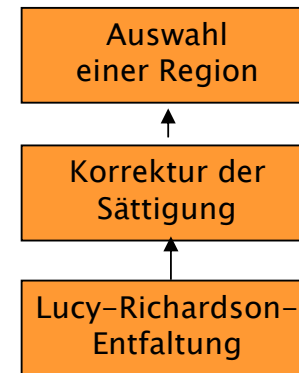
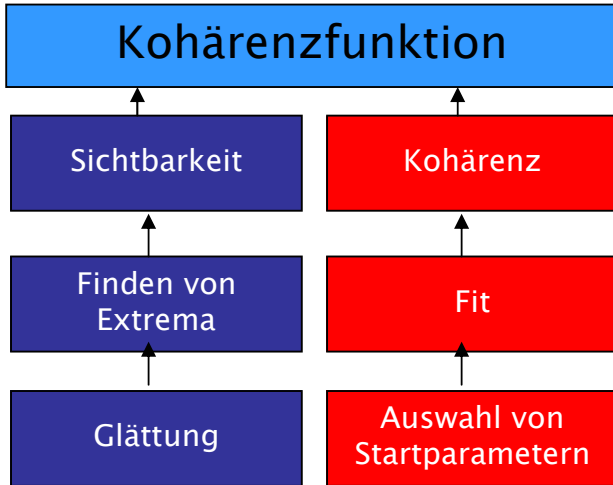
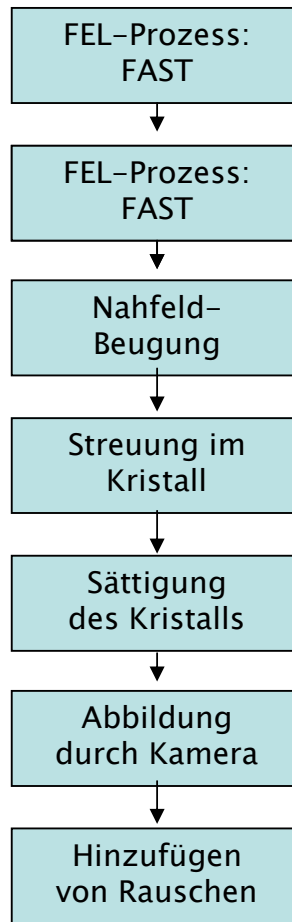
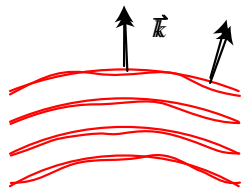
⇒ Vergleich der Resultate mit der Korrelationsfunktion



# Mathematische Modellierung des Experiments

## Ergebnisse

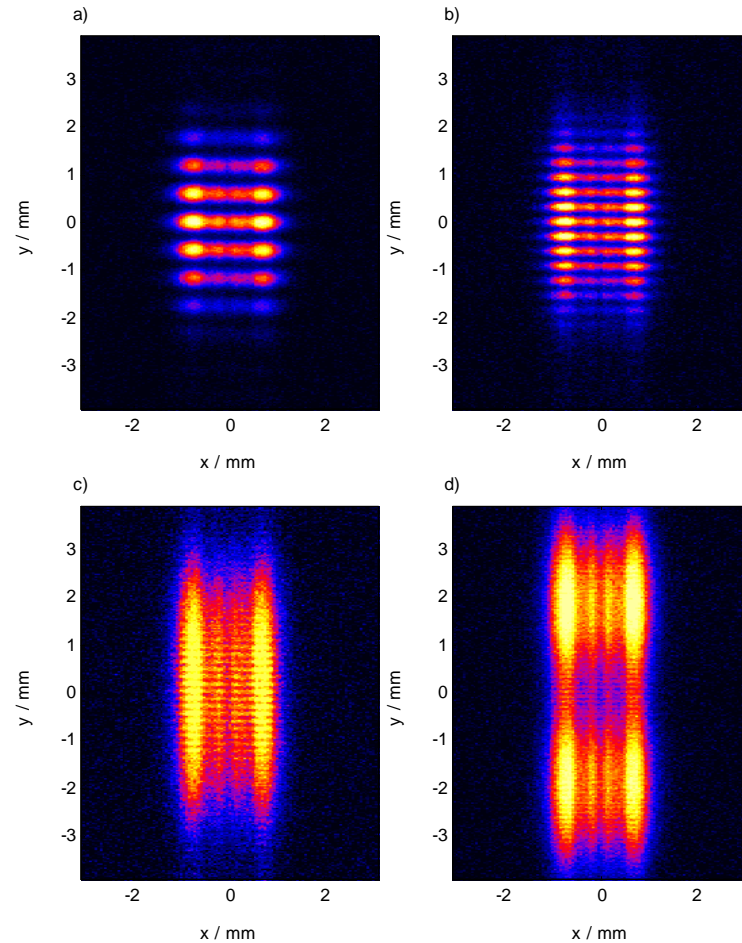
- Kohärenzgrad ist höher als in den Messungen
- Anpassung durch Änderung der Wellenfront
- Neue Version von FAST erzeugt geringere Kohärenz



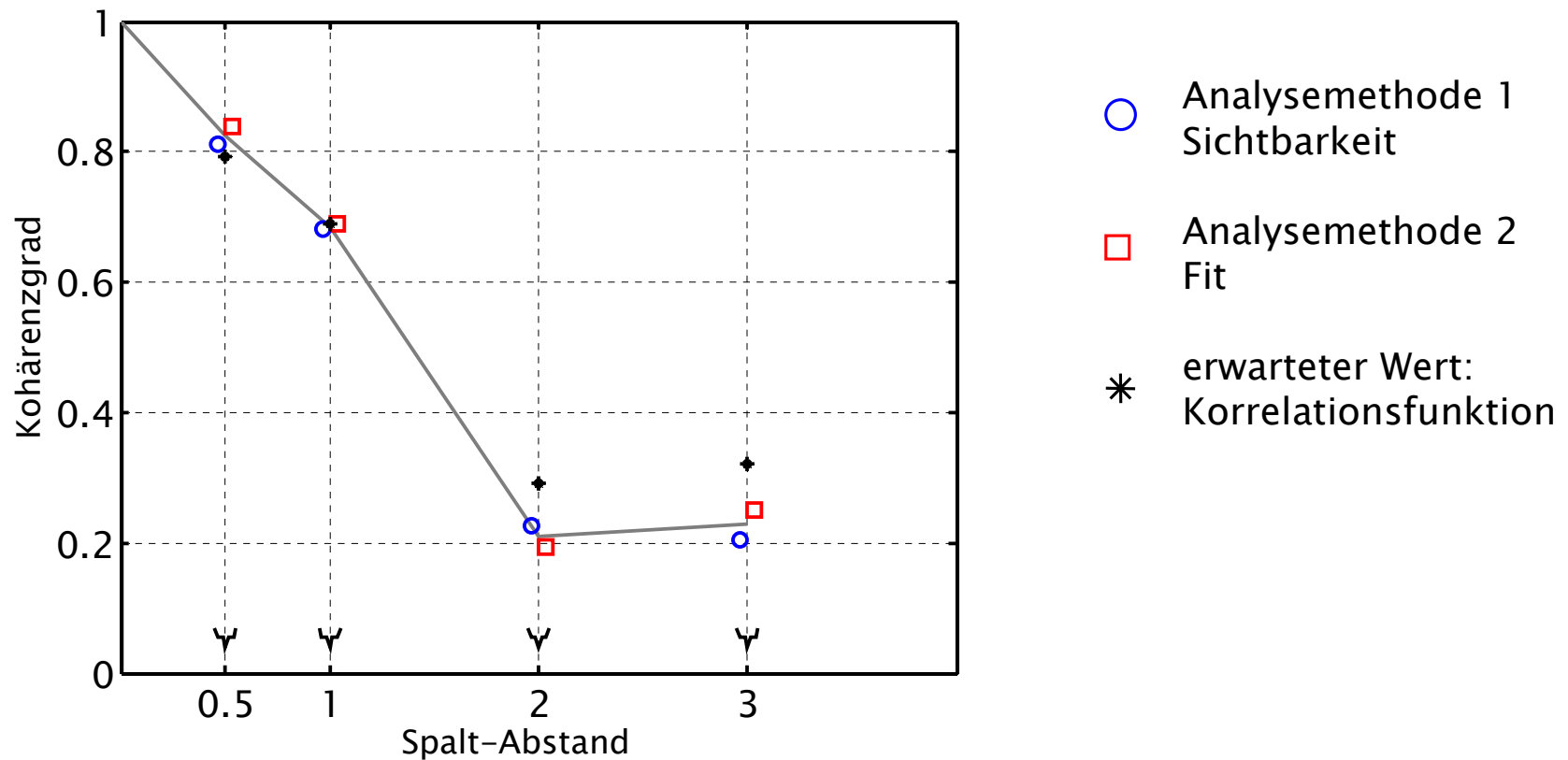
# Mathematische Modellierung: Zusammenfassung

Simulation von

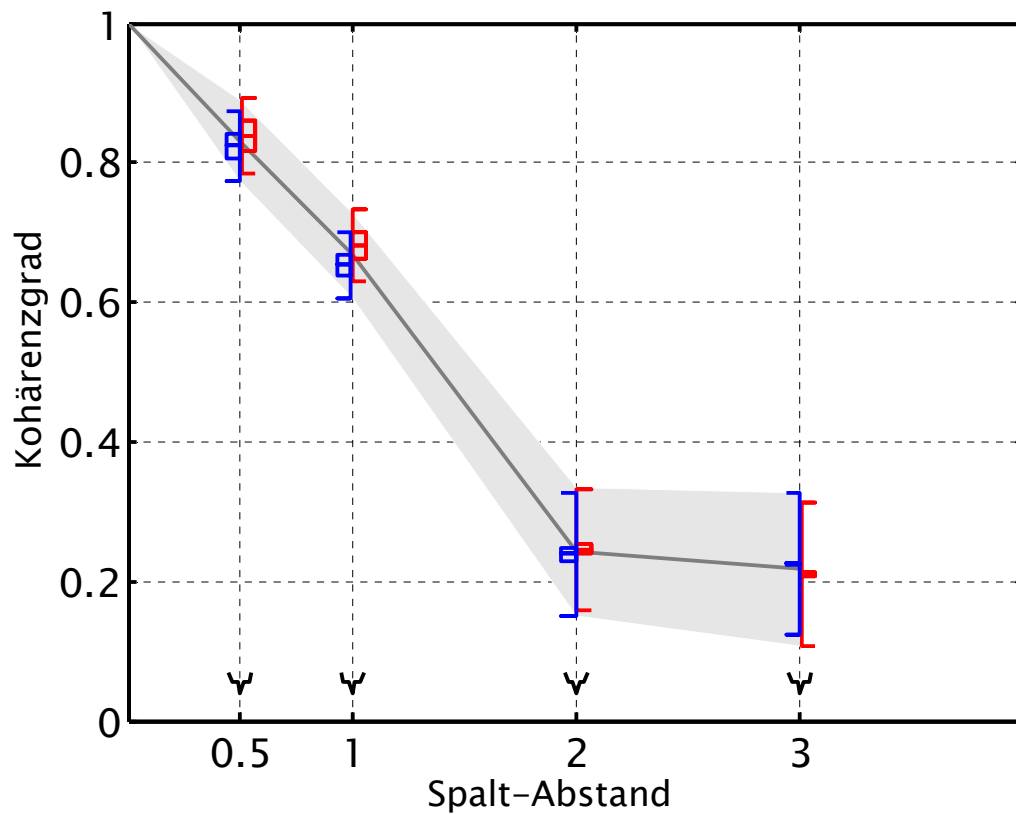
- FEL-Prozess
- Anpassen der Kohärenzfunktion durch Verzerrung der Wellenfronten
- Nahfeld- (Fresnel-) Beugung
- Apparative Störungen



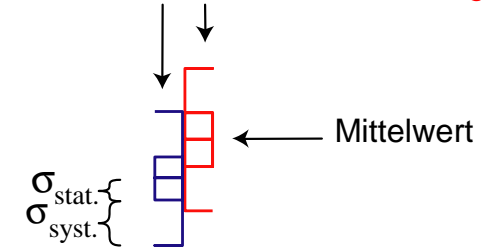
# Mathematische Modellierung: Transversale Kohärenz als Funktion des Spalt-Abstandes



# Zur Erinnerung: Ergebnisse der Messungen

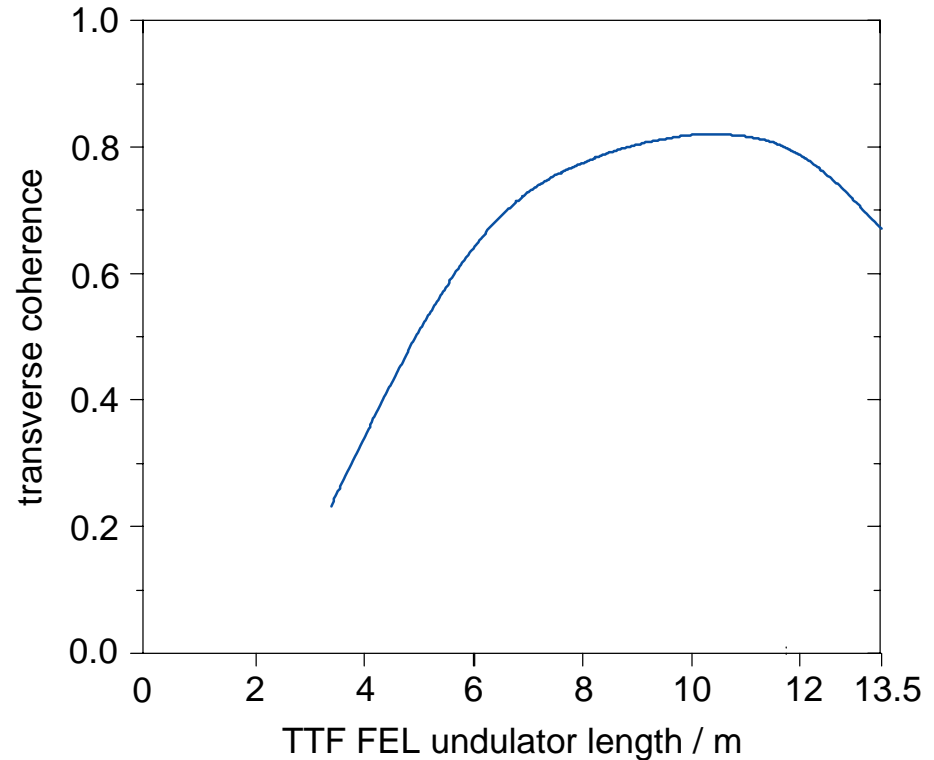


Analysemethode 1: Sichtbarkeit der Interferenzstreifen  
Analysemethode 2: Fit an die Intensitätsverteilung



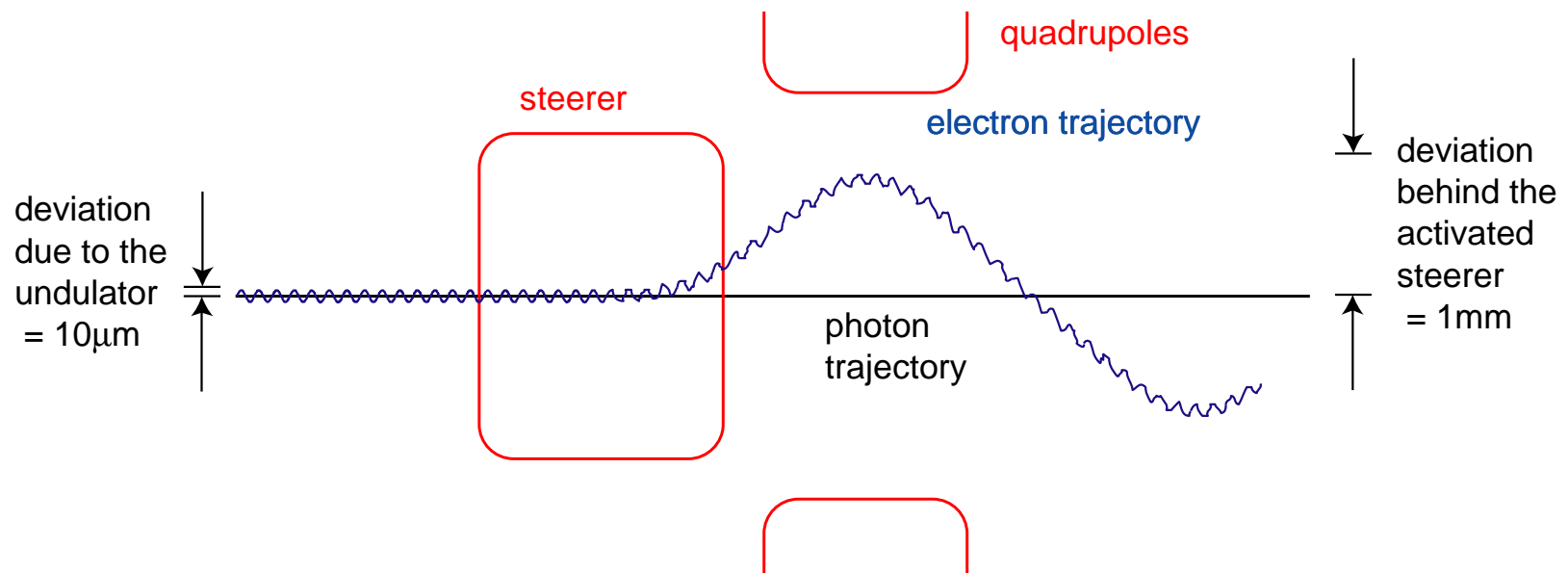
# Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

- Zur Erinnerung: theoretische Vorhersage
- Wie kann die Undulatorlänge eingestellt werden?



# 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

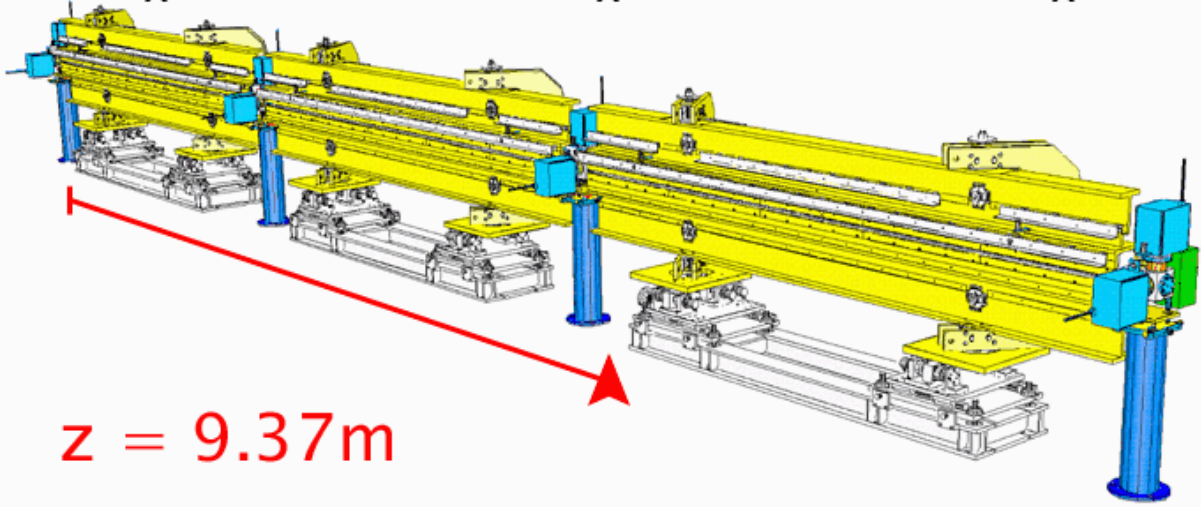
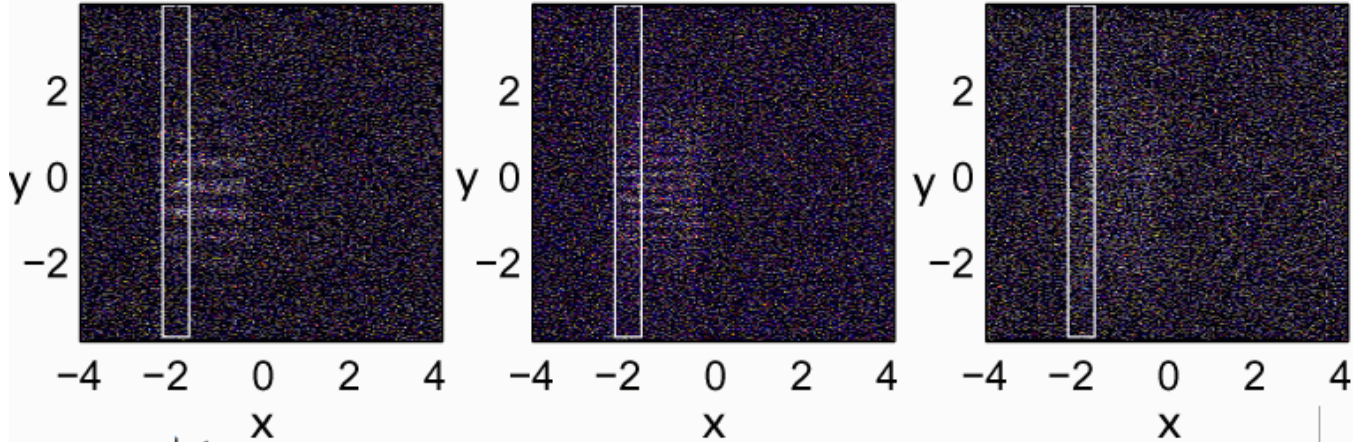


# Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators Beugungsbilder

Spaltabstand: 0.5mm

1mm

2mm

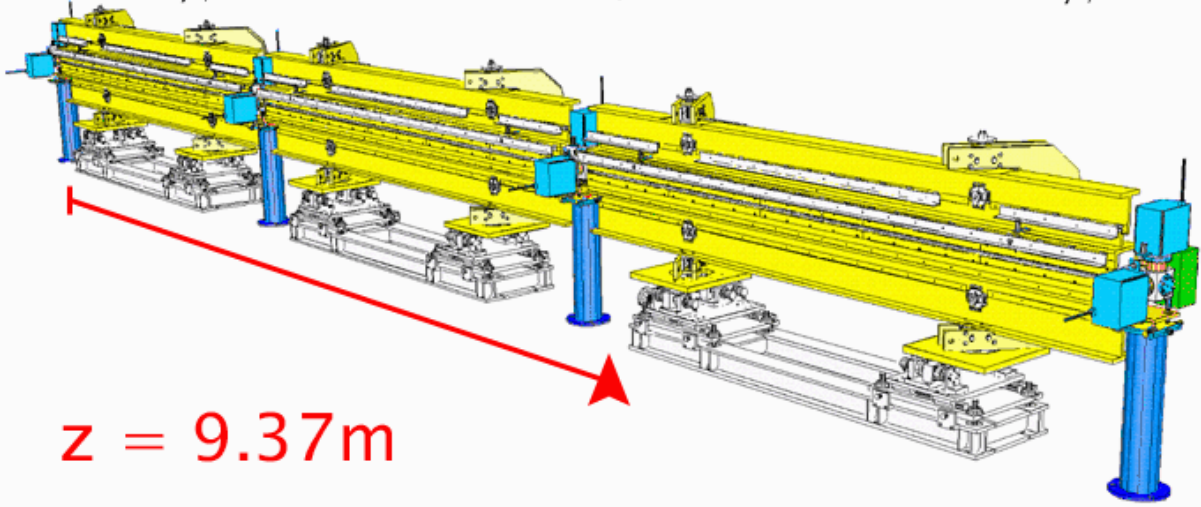
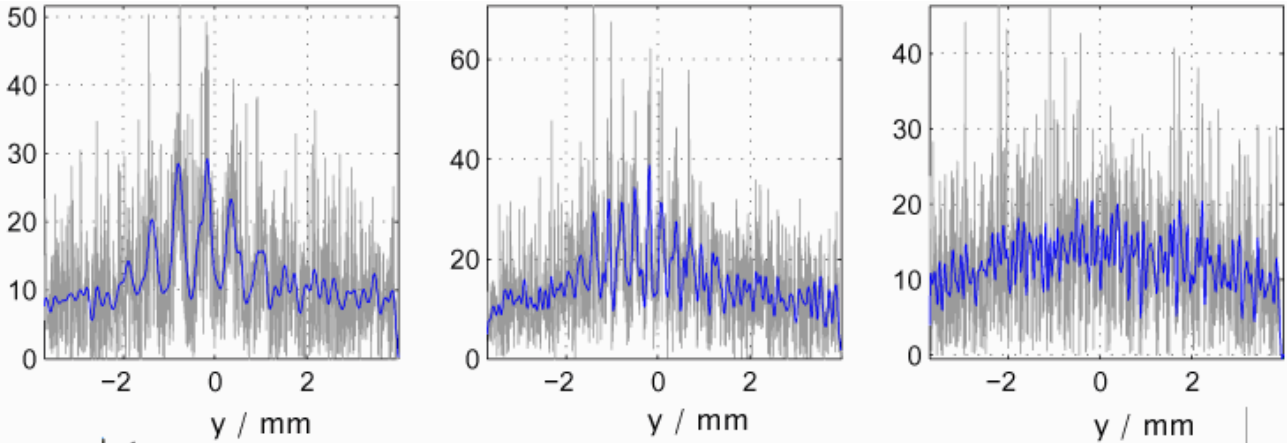


# Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators Gefilterte Projektion

Spaltabstand: 0.5mm

1mm

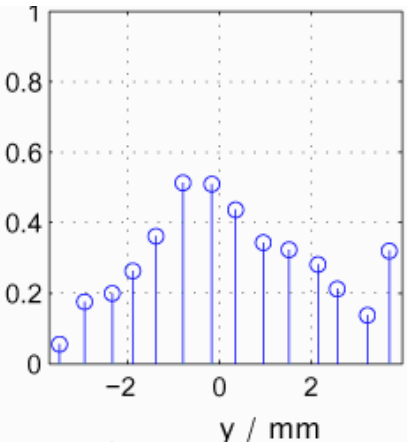
2mm



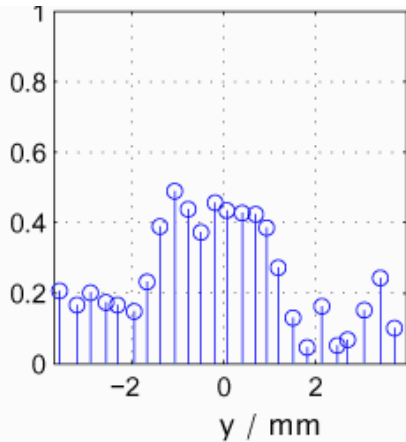
# Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

## Sichtbarkeit der Interferenzstreifen

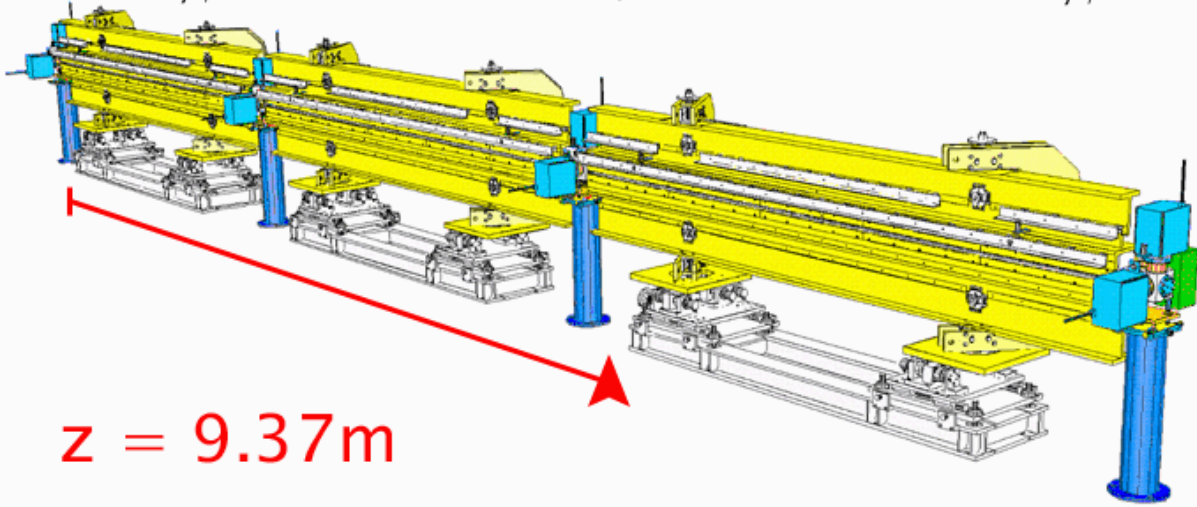
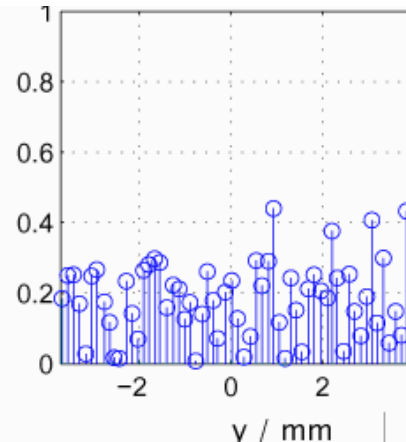
Spaltabstand: 0.5mm



1mm



2mm

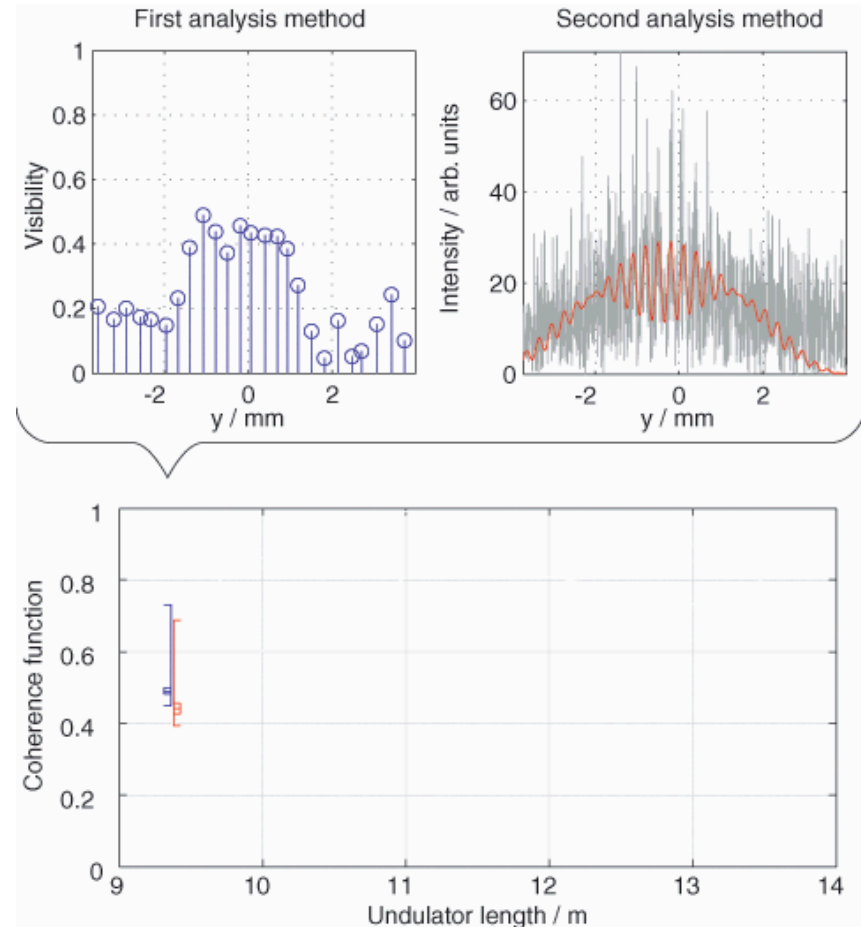


# Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

## Ergebnisse

Ergebnisse der Analyse:

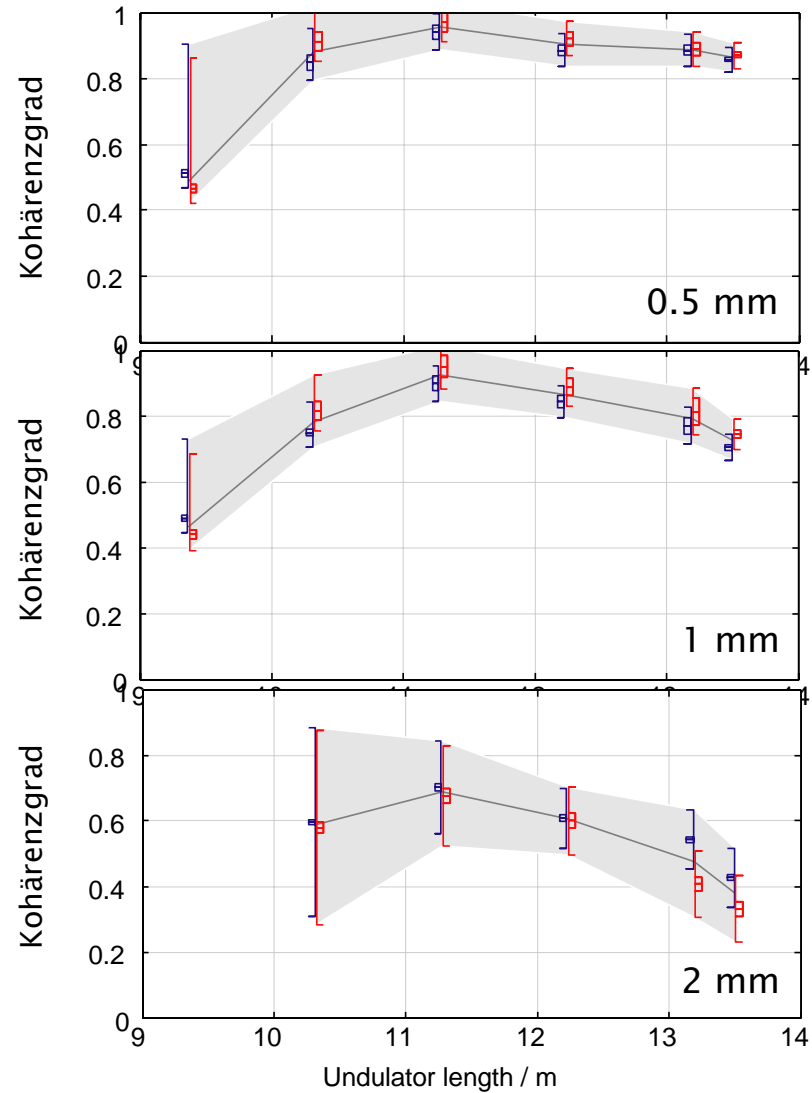
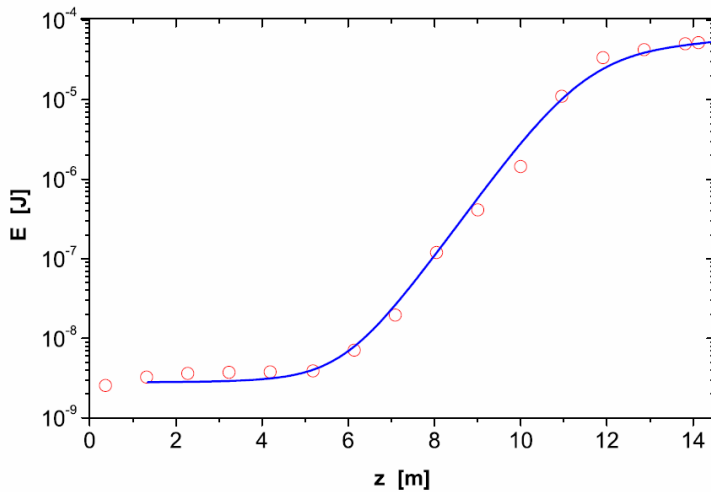
- Bestimmung der Sichtbarkeit aus den Maxima und Minima der geglätteten Intensitätsverteilung
- Fit des Nahfeld-Beugungsbildes an die Intensitätsverteilung



# Entwicklung der Kohärenz entlang des Undulators

## Ergebnisse

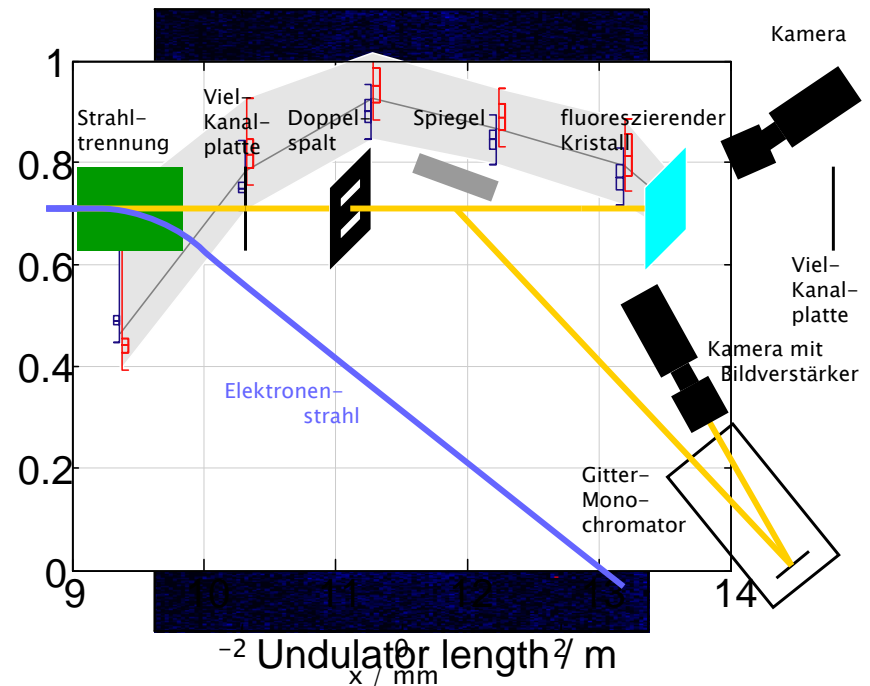
- Kohärenzgrad bei 0.5, 1 und 2 mm Abstand
- Dazu im Vergleich: Intensität des FEL (gemessen mit MCP)



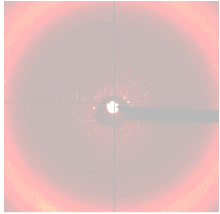
# Räumliche Kohärenz eines VUV-FEL

## Zusammenfassung

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



# Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers



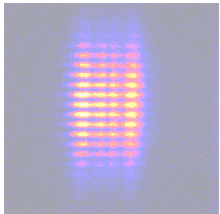
## Einführung

- Bedeutung der Kohärenz
- Definition und Messungen



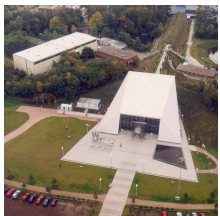
## Messung der Kohärenz am TTF-FEL

- Herausforderungen für die Messungen
- Experimenteller Aufbau



## Resultate

- Kohärenz als Funktion des Spaltabstandes
- Entwicklung im Undulator



## Ausblick

- Phase 2 des TTF-FEL

# Ausblick

## TTF Phase 2:

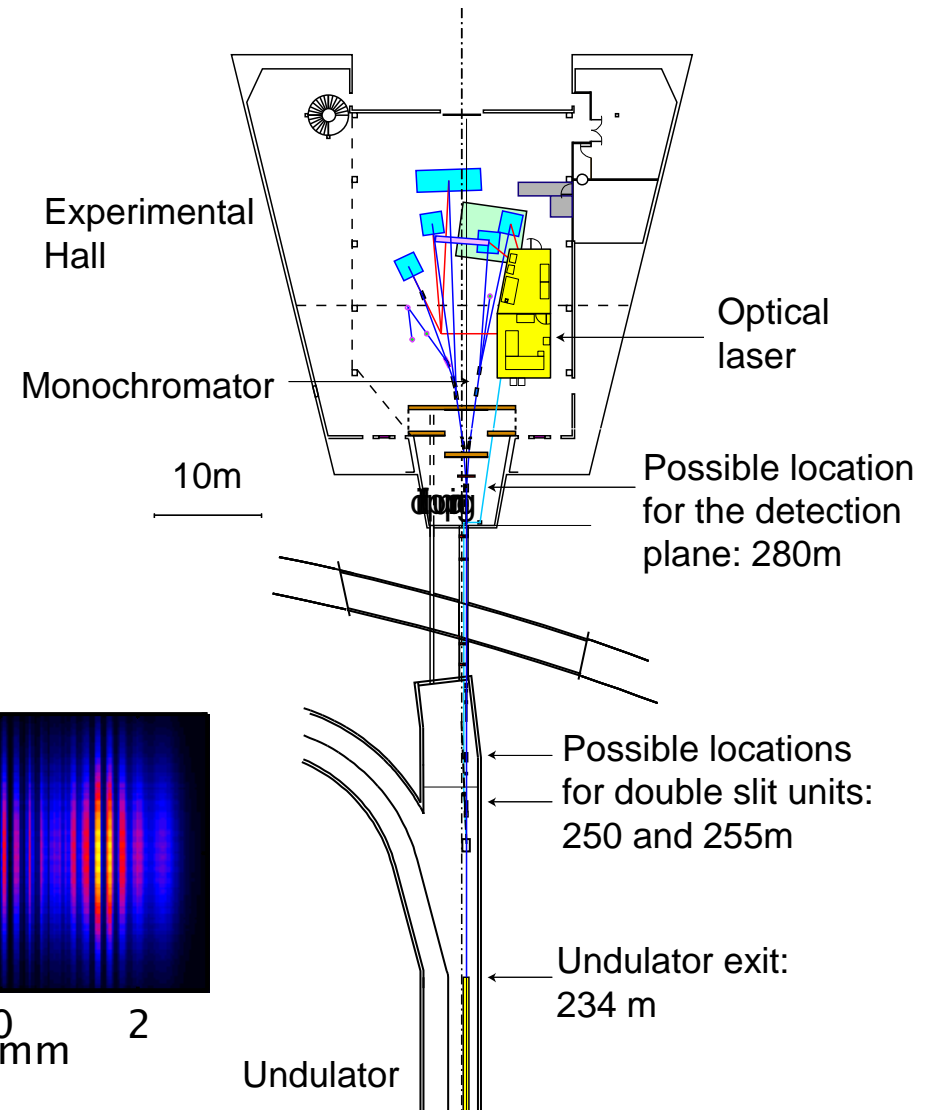
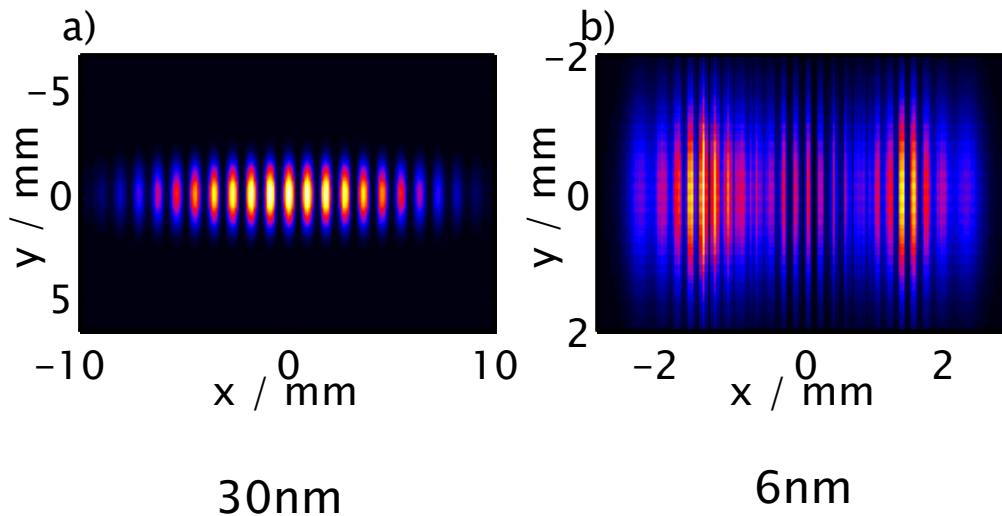
- Verlängerung der Anlage auf 250 m
  - Erhöhung der Elektronen-Energie auf bis zu 1 GeV
- ⇒ FEL-Wellenlängen bis 6 nm



Rasmus Ischebeck, Räumliche Kohärenz eines VUV-Freie-Elektronen-Lasers

# Ausblick

- Aufnahme von Beugungsbildern
- Schwierigkeiten:
  - Belastung der Blenden und des Detektors



# Vielen Dank an das TTF Team!

V. Ayvazyan, N. Baboi, I. Bohnet, R. Brinkmann, M. Castellano, P. Castro, L. Catani, S. Casalbuono, 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