

TTF1 – Erste Experimente

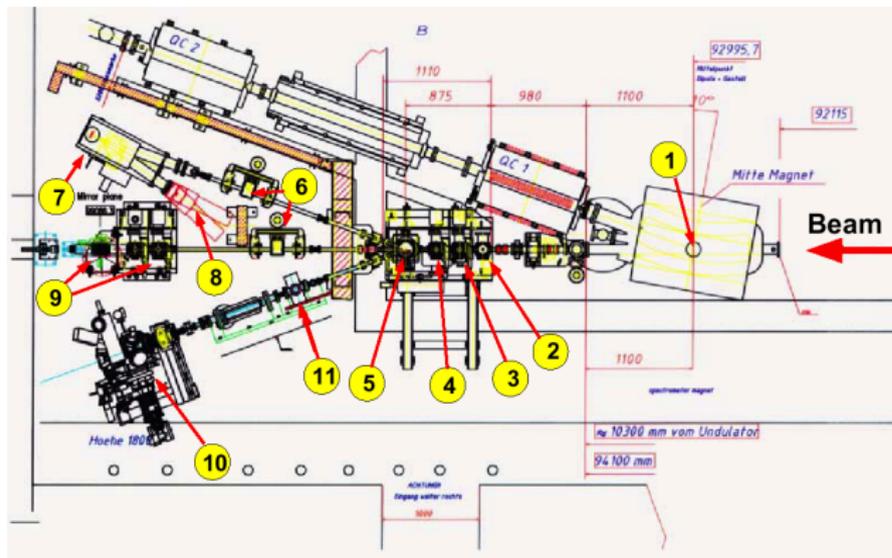


- Photonen Diagnostic
- Wechselwirkung von FEL Strahlung mit Oberflächen

Photonen Diagnostic

- Das erste Experiment am FEL der TESLA Test Facility ist der FEL selbst
 - Photonenenergie der FEL Strahlung
 - Verstärkungsverhalten
 - Statistik der FEL Bunche
 - Zeitstruktur
 - Kohärenz
- Experiment(e) zum Messen all dieser Eigenschaften ist erforderlich
- **Problem**
Es müssen erst Detektoren entwickelt werden, um die FEL Strahlung zu messen
- **SFPD: SASE FEL Photon Diagnostic**

SFPD – Experimenteller Aufbau



- 1 Magnet
- 2 Justier Laser
- 3 Apertur Einheit
- 4 Detektoren
- 5 Abklenkspiegel
- 6 Pumpen
- 7 1 m NIM
- 8 CCD Kamera
- 9 2. Detektor Einheit
- 10 Experimente
- 11 Delay Einheit

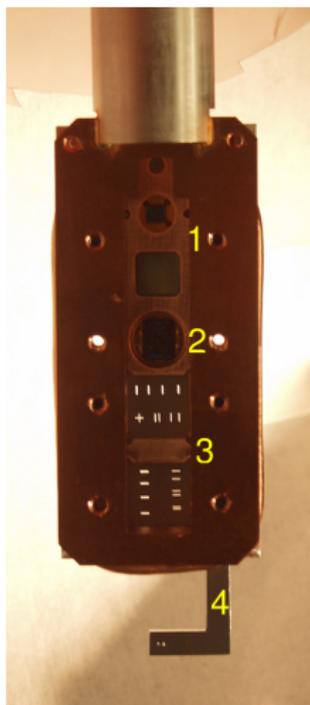
SFPD – Detektoren

- Für normale Synchrotron Experimente werden oft kalibrierte Halbleiterdioden (Si, GaAs, . . .) verwendet, um den absoluten Photonenfluß zu messen
- **Probleme**
 - Detektoren müssen die Leistung über mehrere Größenordnungen messen können, um den Bereich von der spontanen Strahlung bis zur Sättigung messen zu können.
 - Halbleiter Detektoren können nur für den Bereich der spontanen Emission des Undulators verwendet werden, da die FEL Strahlung durch ihre hohe Leistung den Detektor zerstört.
 - Thermopiles, die die Temperaturerhöhung durch die absorbierte Strahlung messen, können die Sättigung messen, sind aber im spontanen Bereich zu unempfindlich
 - Einfluß von nichtlinearen Effekten ?
 - Detektoren sind nicht schnell genug, um z.B. die Zeitdauer des Pulses im Bereich von 100 fs messen zu können

SFPD – Detektoren

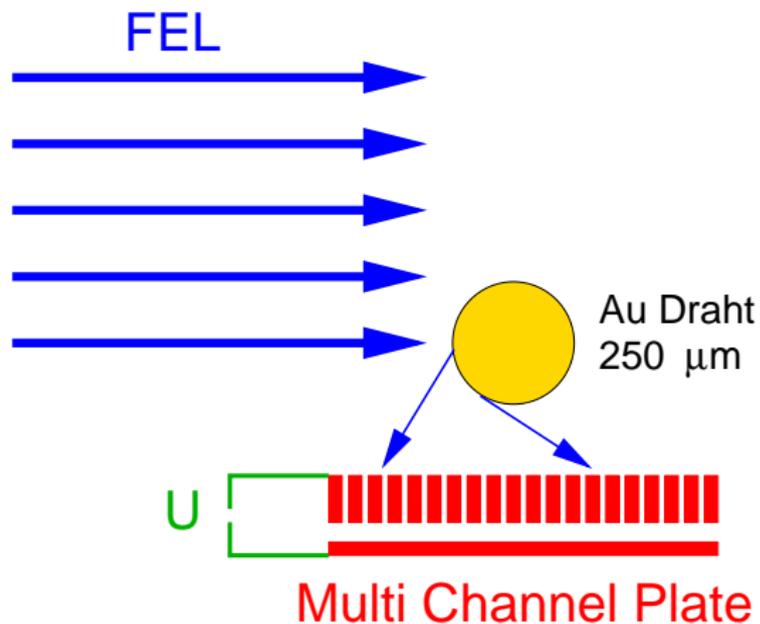
Detektor	Funktion	Bemerkung
Thermopile	Thermischer Detektor	begrenzter Dynamischer Bereich
PtSi Photodiode	Halbleiter Photodetektor	Sättigung Kann zerstört werden
MCP Detektor	Photostrom von einem Golddraht	Beugung am Draht Gold Draht kann zerstört werden Abhängig von der Strahllage
Gas-Monitor Detektor		großer dynamischer Bereich wird nicht zerstört keine Sättigung

SFPD – Detektoren



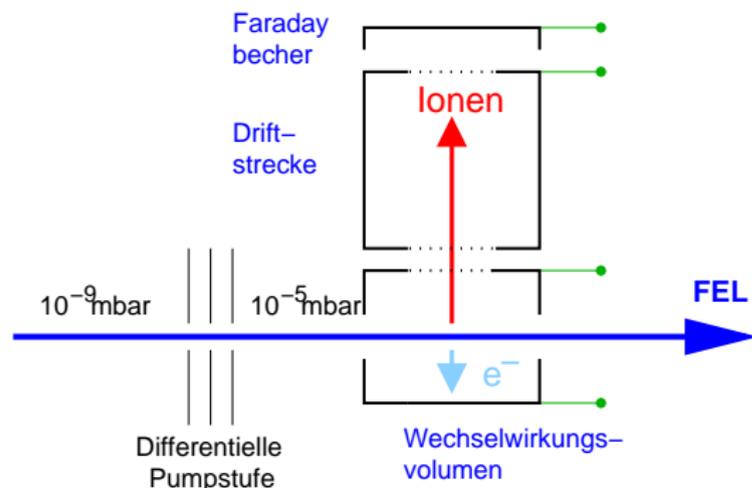
- ① PtSi Photodioden: $1 \text{ nJ} < E_{Puls} < 0.5 \text{ } \mu\text{J}$
- ② Thermopile: $E_{Puls} > \text{einige } \mu\text{J}$
- ③ Beugungsmasken
- ④ Golddraht (MCP Detektor)

SFPD – MCP Detektor



- Messung der an der Oberfläche des Golddrahtes erzeugten Elektronen
- Verstärkung und Nachweis mit einem Multi Channel Plate (MCP)
- Großer dynamischer Bereich (bis zu 10^7)
- Abhängig von der Strahlage

SFPD – Gas Detektor



Einfache Photoionisation

$$N = N_{ph} \times n \times \sigma \times s$$

N Zahl der erzeugten Elektronen oder Ionen

N_{ph} Zahl der FEL Photonen

n Gastargetdichte

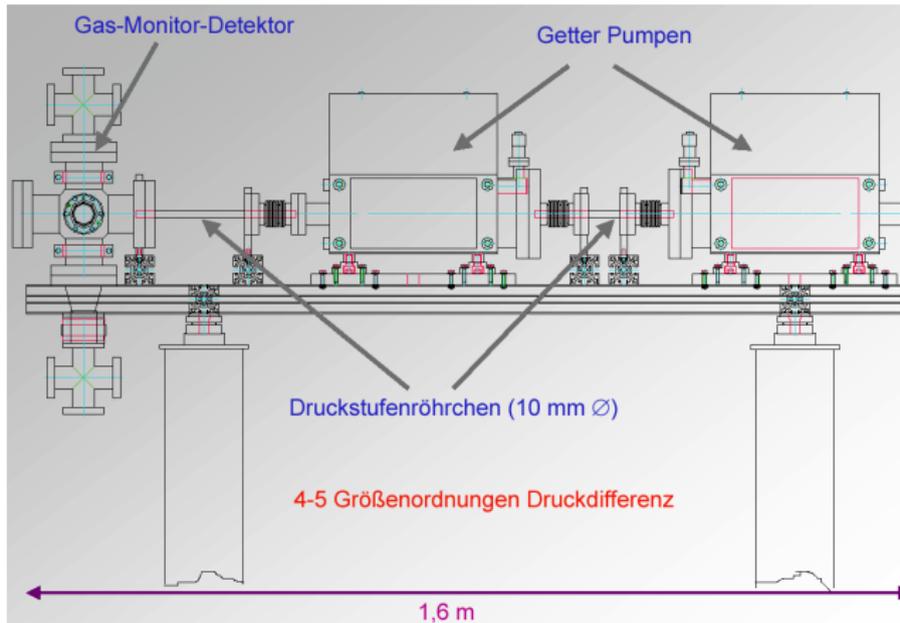
σ Photoionisationswirkungsquerschnitt

s Länge des akzeptierten Wechselwirkungsvolumen

SFPD – Gas Detektor

- Wirkungsquerschnitt ist bekannt
- Intensitätsmessung \Rightarrow Ladungs- + Gasdichtemessung
- Mit Kalibrierung bei der PTB können absoluten Photonenströme gemessen werden
- Patentierte

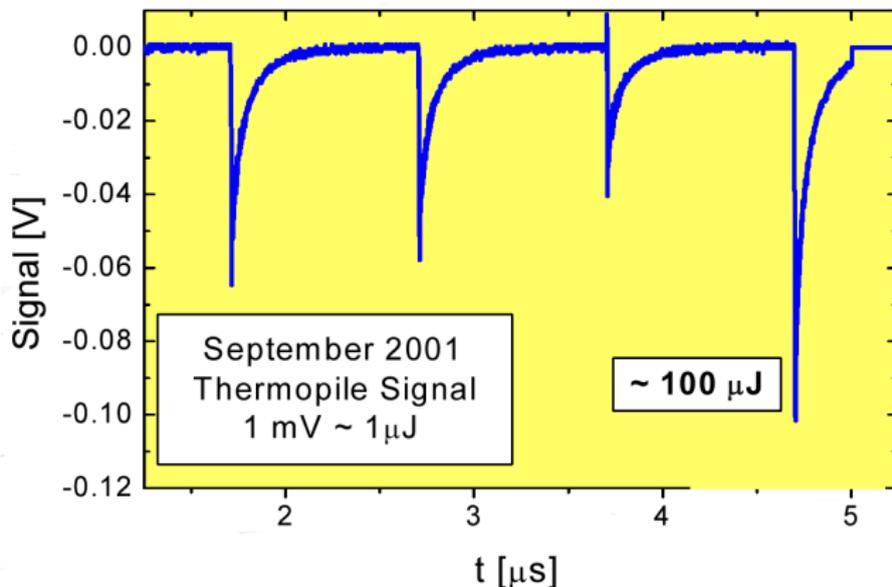
SFPD – Gas Detektor



- Transparent \Rightarrow Gas Monitor-Detektor kann als Online-Monitor verwendet werden

TTF1 – Erstes Lasing

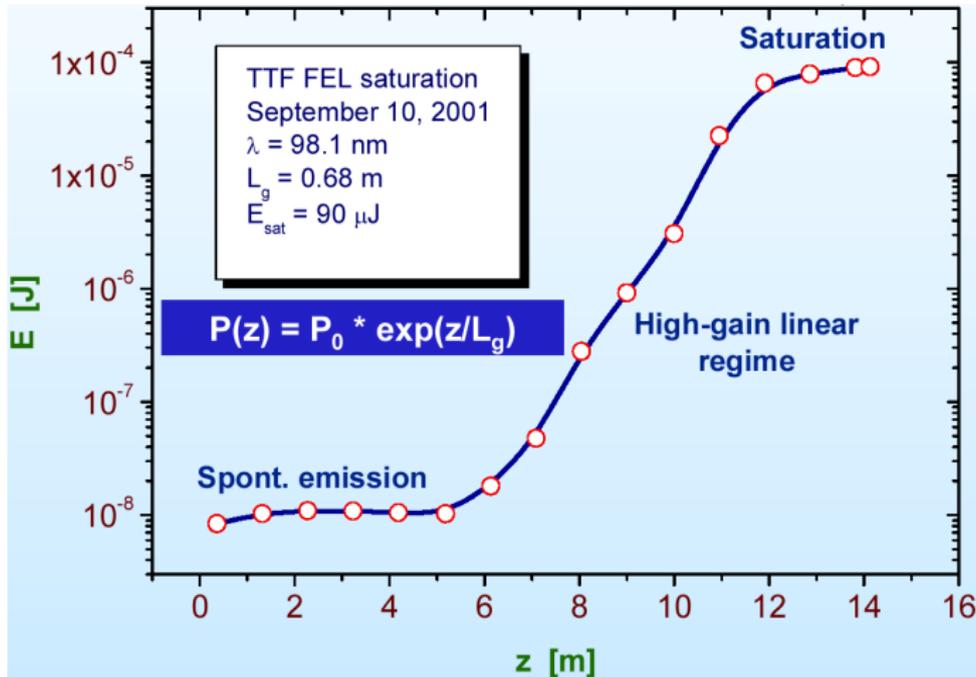
- Im Jahr 2000 wurde das erstmals bei 108 nm Wellenlänge Lasing bei TTF beobachtet [PRL **85**, 3825 (2000)]



TTF1 – Exponentielles Wachstum

- Wie kann der FEL Prozess nachgewiesen werden ?
 - Typisch für den FEL Prozess ist das exponentielle Wachstum. Wie kann dies nachgewiesen werden ?
 - Elektronenstrahl wird mittels der Steerer Magnete, die im Undulator eingebaut sind an verschiedenen Stellen aus dem Undulator gekickt
- ⇒ Elektronenstrahl und Photonenstrahl überlagern nicht mehr und es findet keine Verstärkung mehr statt
- ⇒ FEL Intensität kann einfach in Abhängigkeit von der Verstärkungslänge gemessen werden

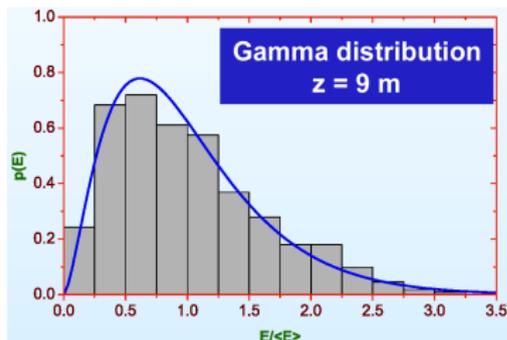
TTF1 – Exponentielles Wachstum



- Experiment stimmt mit der Theorie überein

TTF1 – Statistik

- Der Monochromator im Photonendiagnostikexperiment ermöglicht es einem die Statistik des SASE Prozesses im Frequenzraum zu untersuchen
- Stimmen die experimentellen Ergebnisse wieder mit der Theorie wieder überein ?
- Messung jedes einzelnen SASE Pulses mittels einer ICCD (Intensified CCD) Kamera

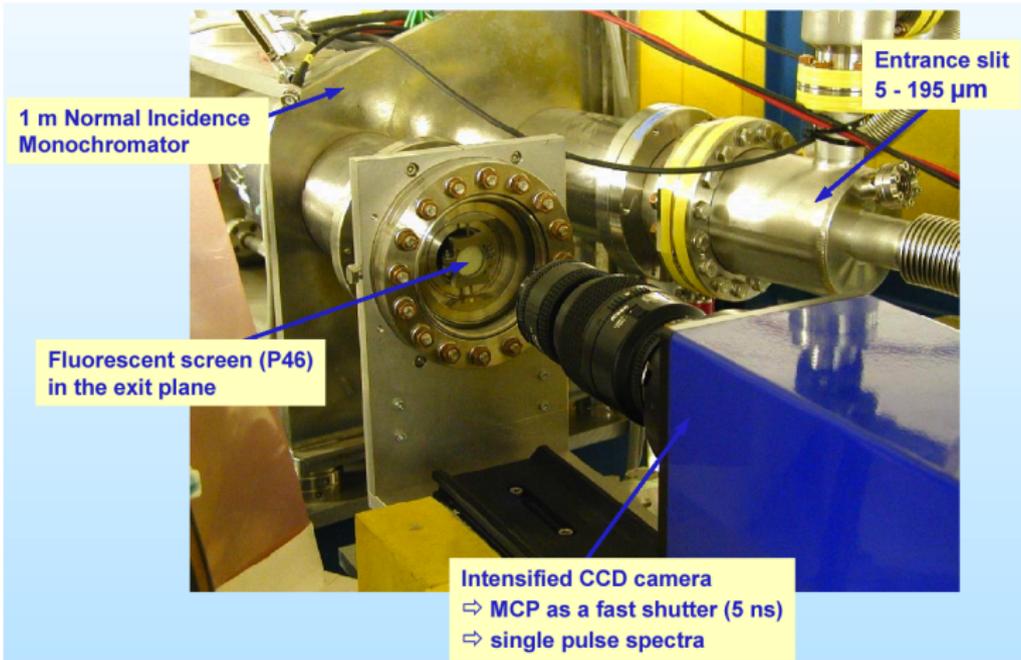


- Beobachtete Gamma Verteilung liefert für die Zahl der Spikes

$$M = 1/\sigma^2 = 2.5$$

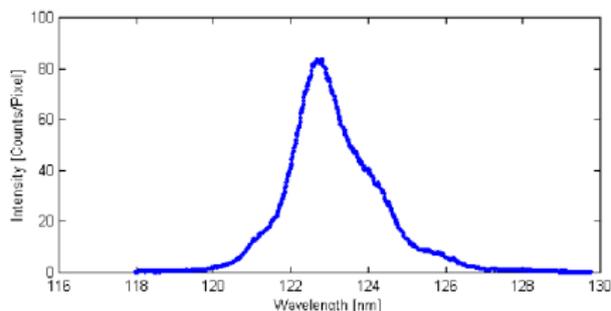
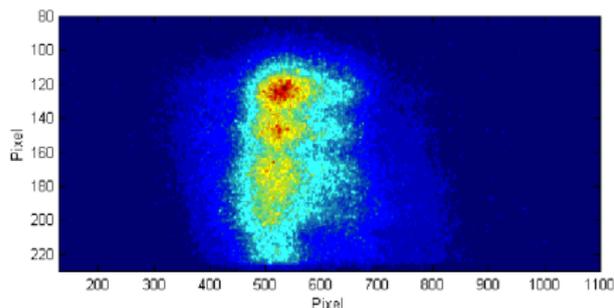
- Pulslänge ist damit $T \cong 50 fs$
- Kürzere Pulse, als erwartet (100 – 200fs)

TTF1 – Statistik



Aufbau zur Messung jedes einzelnen SASE Spektrums

TTF1 – Statistik



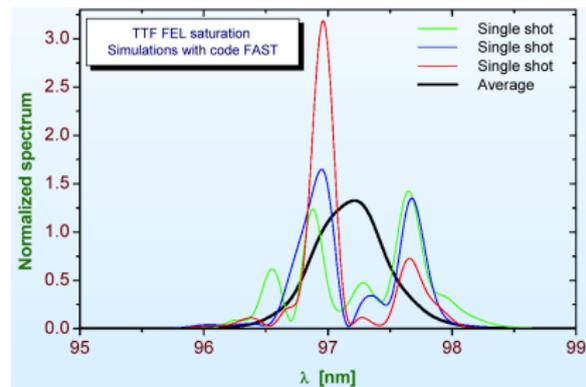
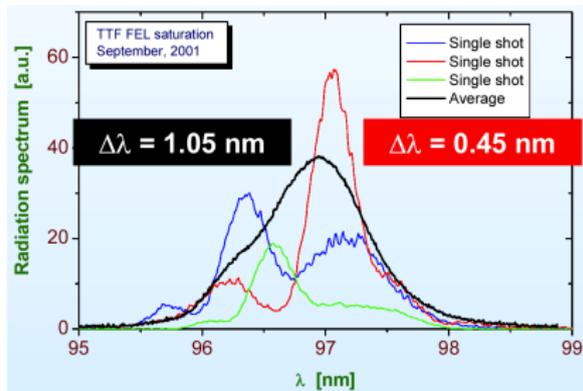
Oben:

- Bild in der Austrittspaltebene eines einzelnen SASE Spektrums
- In der Horizontalen ist die Dispersionsrichtung

Unten:

- Spektrum eines SASE Pulses
- Die Struktur ergibt sich aus der Statistik des Pulses

TTF1 – Statistik



- Einzelspektren von verschiedenen SASE FEL Pulsen
- Theorie von M. Yurkov stimmt gut mit dem Experiment überein
- Zeitliche Länge des Strahlungspulses folgt aus der Breite der Spikes

$$T \cong M2\sqrt{\pi}/\Delta\omega_{\text{FWHM}} \cong 41 \text{ fs}$$

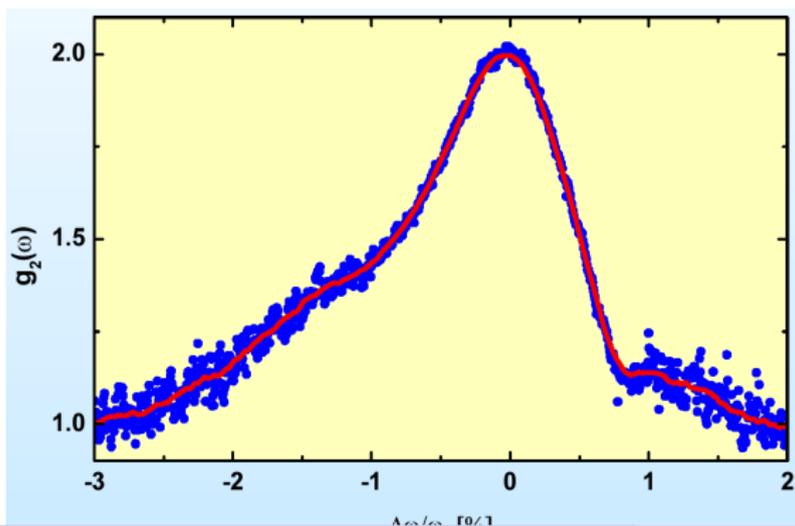
- Wert stimmt gut mit dem aus der Statistik erwarteten Wert überein

TTF1 – Statistik

- Bestimmung der Pulsdauer aus der Correlationsfunktion 2. Ordnung

$$g_2(\omega, \omega') = \frac{\langle \bar{E}(\omega) \cdot \bar{E}(\omega') \rangle}{\langle \bar{E}(\omega) \rangle \langle \bar{E}(\omega') \rangle} = 1 + \frac{\sin^2((\omega - \omega')T/2)}{((\omega - \omega')T/2)^2}$$

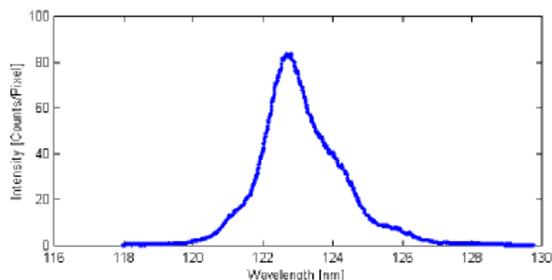
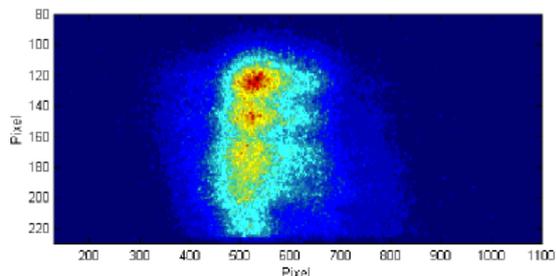
- Problem: Genaue Pulsform sollte hier bekannt sein



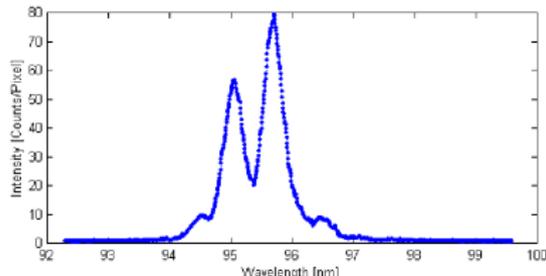
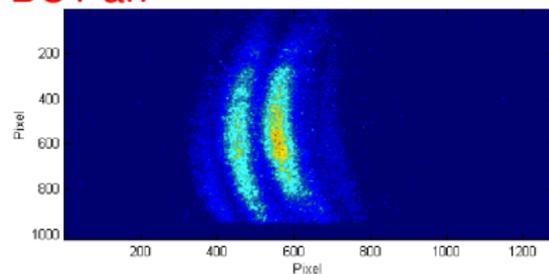
TTF1 – Statistik

- Welche Einfluß hat die Form des Elektronenbunch auf den SASE FEL Puls
- Ein- und Ausschalten des Bunchkompressors (BC) 1

BC1 aus

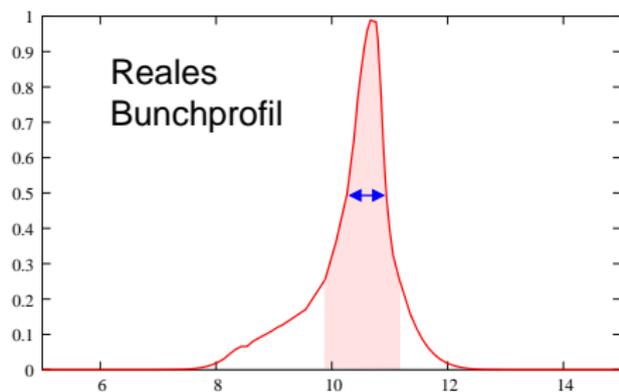
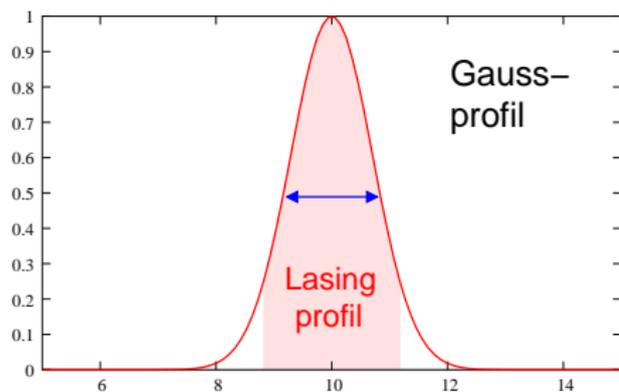


BC1 an



TTF1 – Statistik

- **BC1 aus:** Kurzer FEL Puls mit 2-3 Moden
 - **BC1 an:** Längerer FEL Puls mit 7-10 Moden
 - ? Erwartet werden würde es genau anders herum, da durch den Bunchkompressor der Elektronenbunch verkürzt wird
 - Wie ist das zu erklären ?
- ⇒ Die einfachen Annahmen für den Elektronenbunch sind nicht richtig!



Zeit (arb. units)

TTF1 – Statistik

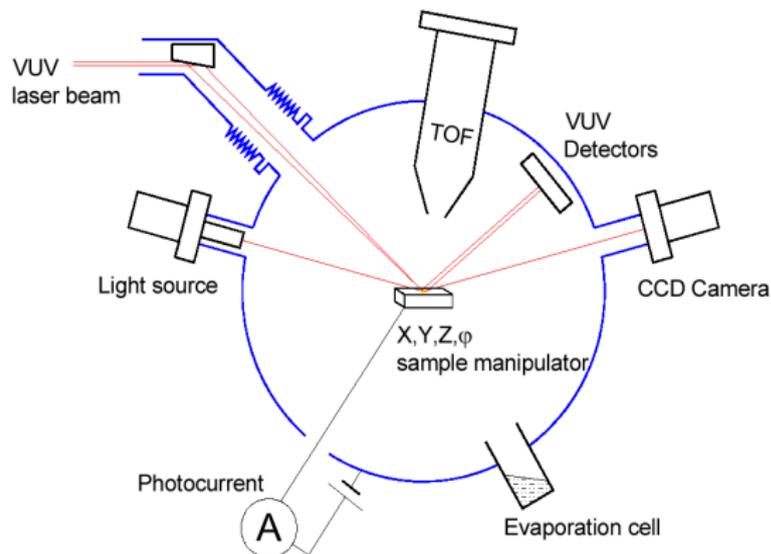
- Der Elektronenbunch ist kein einfaches Gauss- oder Rechteckprofil
- Elektronenquelle und LINAC erzeugen eine asymmetrischen Elektronenbunch, der eine kleine effektive Pulsdauer hat
- SASE Prozess findet im Teil der hohen Dichte des Elektronenbunch statt
- FEL Puls ist deutlich kürzer und hat weniger Moden
- Bunchkompressor erzeugt aus dem asymmetrischen Puls einen eher symmetrischen Puls, bei dem mehr Elektronen am SASE Prozess teilnehmen, aber der Puls insgesamt länger wird.

Wechselwirkung von FEL Strahlung mit Oberflächen

- Wichtiges erstes Experiment um die Wechselwirkung der FEL-Strahlung mit Oberflächen insbesondere im Hinblick auf optische Komponenten zu untersuchen
- Laserablation
- Erzeugung von Plasmen im FEL Fokus
- Verschiedene untersuchte Materialien:
 MgF₂, BaF₂, Ce:YAG, SiO₂, Al₂O₃ – Isolatoren und Fluoreszenzmaterialien
 Si – Spiegelmaterial
 Au, Al, Cu, C – Spiegelbeschichtungen, dünne Filme und Bulkmaterial
- FEL Parameter:

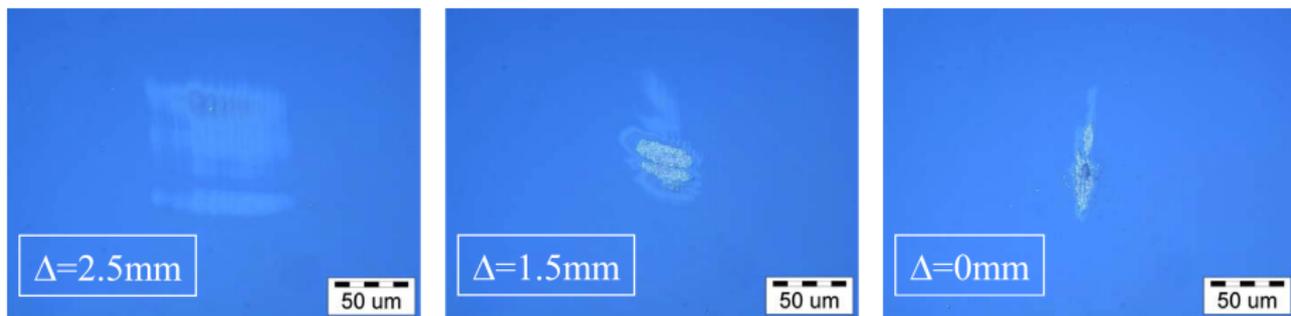
Pulslänge	30-100 fs	Pulsenergie	1-100 μJ
Wellenlänge	86-120 nm	Fokusgröße	> 10 μm
Max. Leistungsdichte	$\approx 10^{14} \text{W/cm}^2$		

WW FEL Oberflächen – Experiment



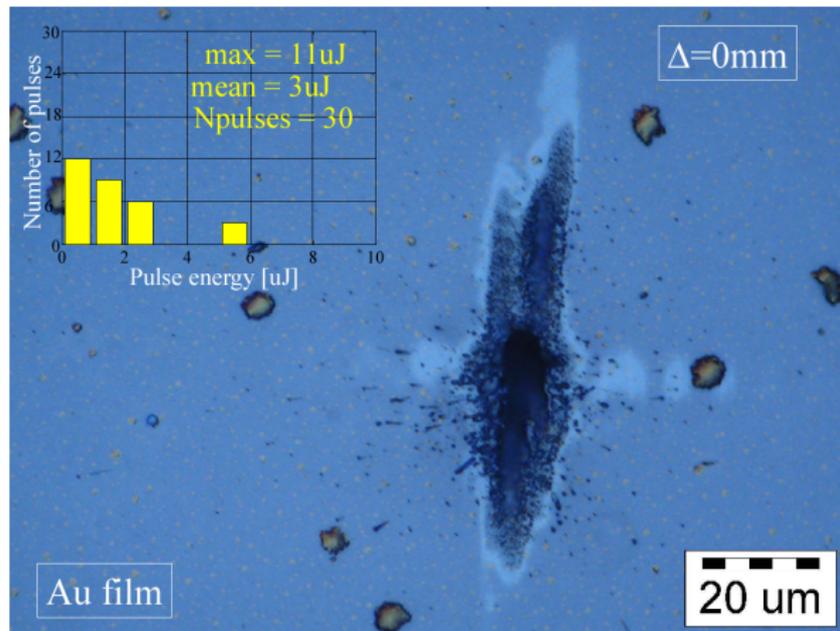
- FELIS: FEL Interaction with solids
- Gruppe um R. Sobierajski hat die Experimente durchgeführt
- Nachweis der erzeugten Ionen mittels eines Flugzeit Massenspektrometers (TOF)
- Untersuchung der Oberflächen mittels STM und AFM

WW FEL Oberflächen – Fokussierung



- Variation des Fokusabstandes von der einer Probe
- AFM Aufnahmen der Oberfläche zeigen deutliche Veränderungen bei starker Fokussierung

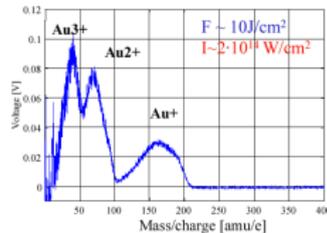
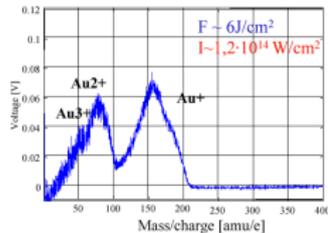
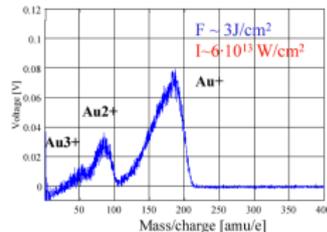
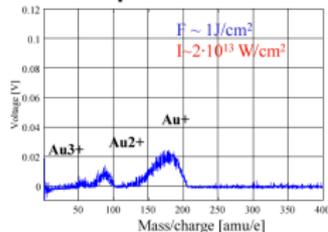
WW FEL Oberflächen – Fokussierung



- Ergebnis der Fokussierung von 30 FEL Pulsen auf einen dünnen Gold Film

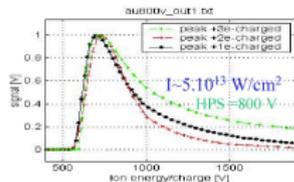
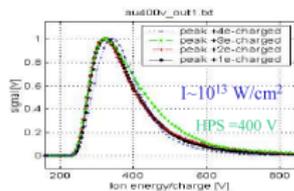
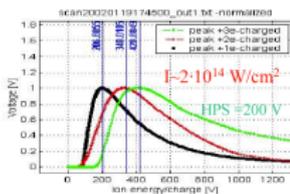
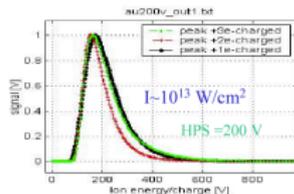
WW FEL Oberflächen – TOF Spektren

TOF Spektren von einer Goldoberfläche



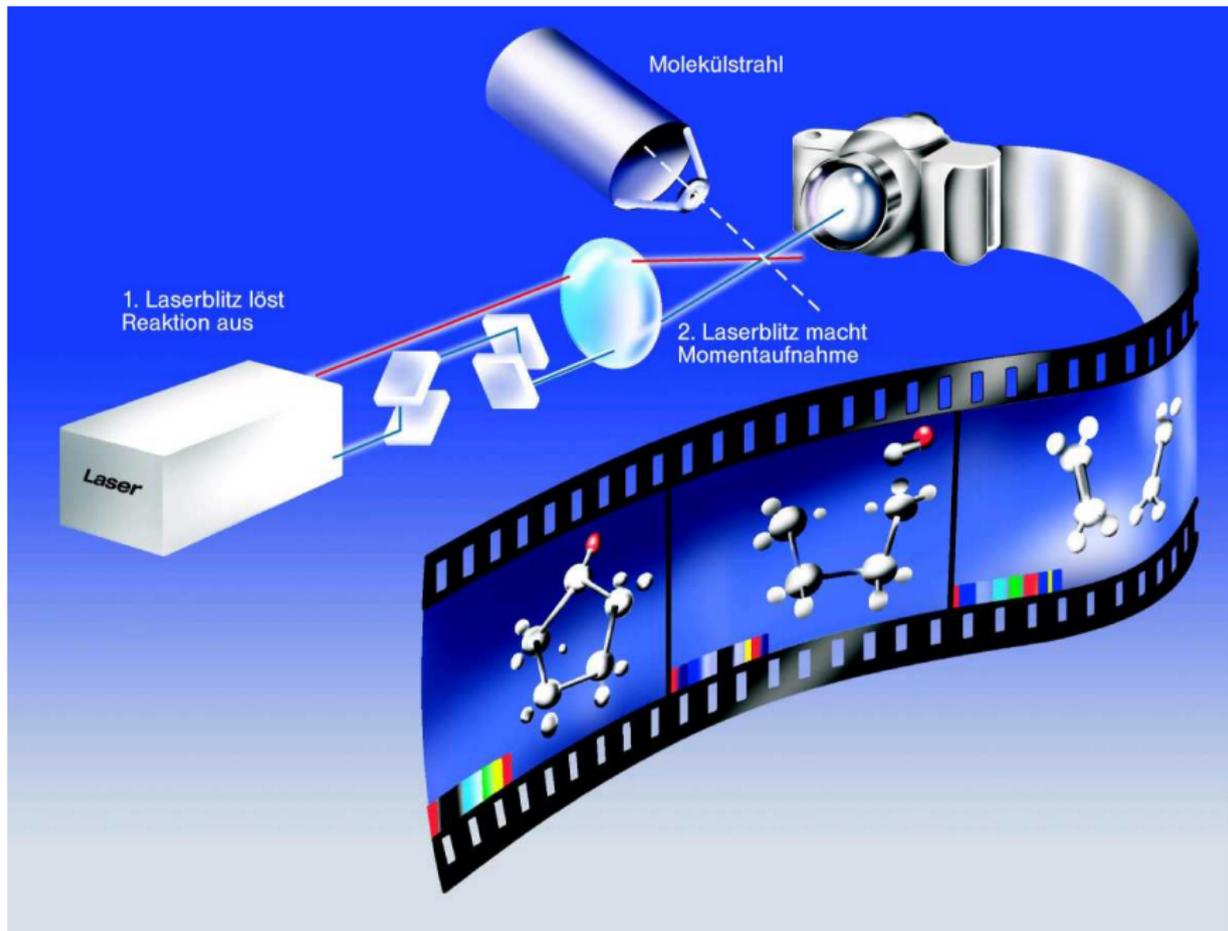
- Es entstehen bis zu 3-fach geladene Au Ionen unter dem Einfluß der FEL Strahlung
- Höher geladene Ionen nehmen deutlich mit der Leistungsdichte zu
- Ionen haben eine hohe kinetische Energie

WW FEL Oberflächen – TOF Spektren



- Vor dem TOF wird ein Gegenpotential angelegt
- Hochpassfunktion, so daß nur Ionen mit einer minimalen Energie im TOF nachgewiesen werden
- Es entstehen sehr schnelle Au Ionen mit einigen 100 eV kinetischer Energie
- Für C-Schichten wird bis zu 5-fach ionisierte C-Ionen beobachtet

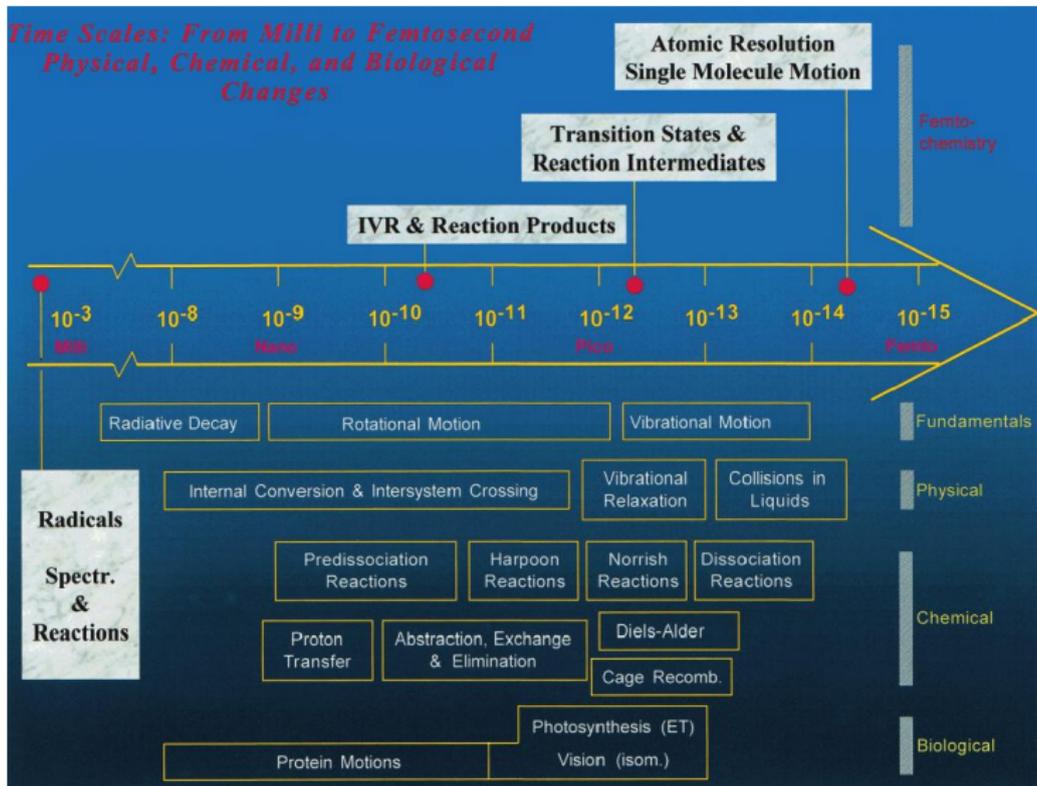
- Übergang zu einem Plasma wird beobachtet
- FLASH und der X-FEL werden Plasmen mit sehr hohen Temperaturen erreichen können.



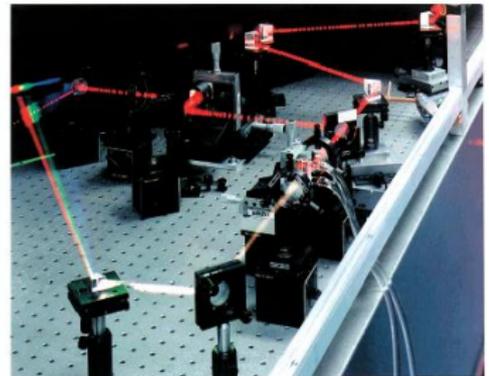
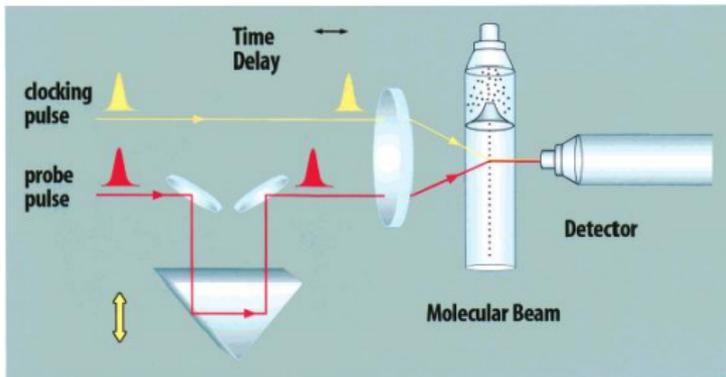
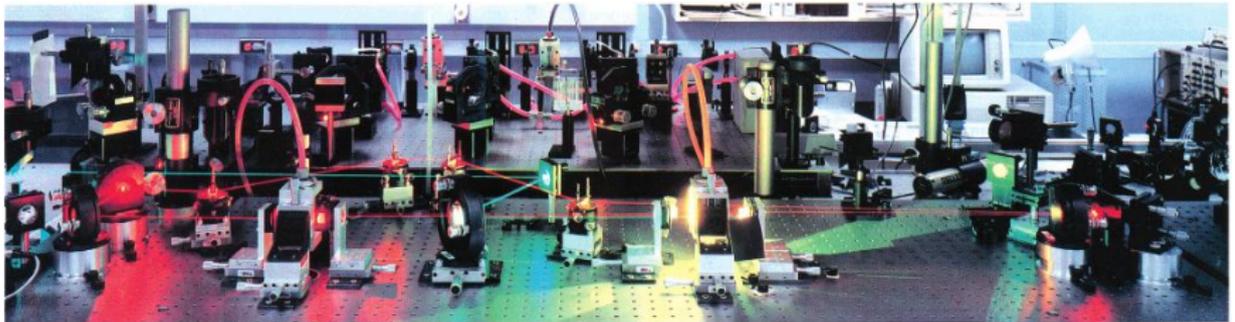
Pump-Probe Spektroskopie

- Untersuchung dynamischer Prozesse, die auf einer Zeitskala von $10^{-10} - 10^{-16}$ s ablaufen
- ⇒ Chemische Reaktionen
- Nobel-Preis 1999 für die Entwicklung diese Methode an A. Zewail
 - Nutzung von Lasern mit ultrakurzen Pulsen im ps und fs Bereich

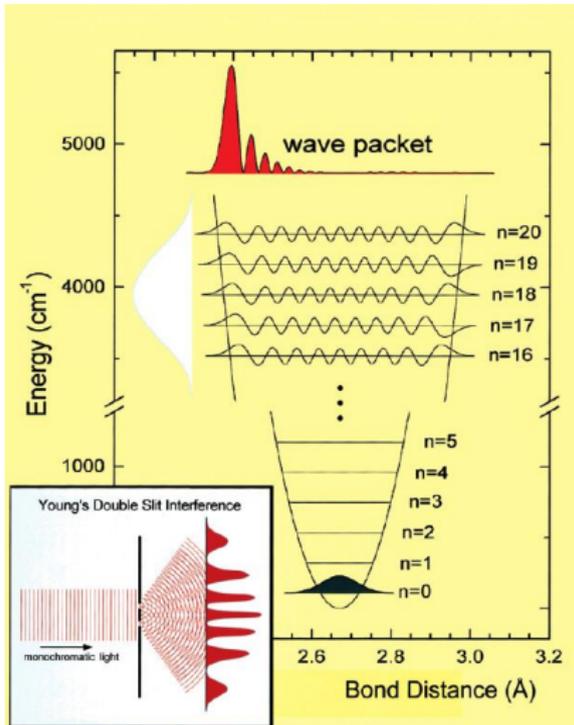
Pump-Probe Spektroskopie



Pump-Probe Spektroskopie

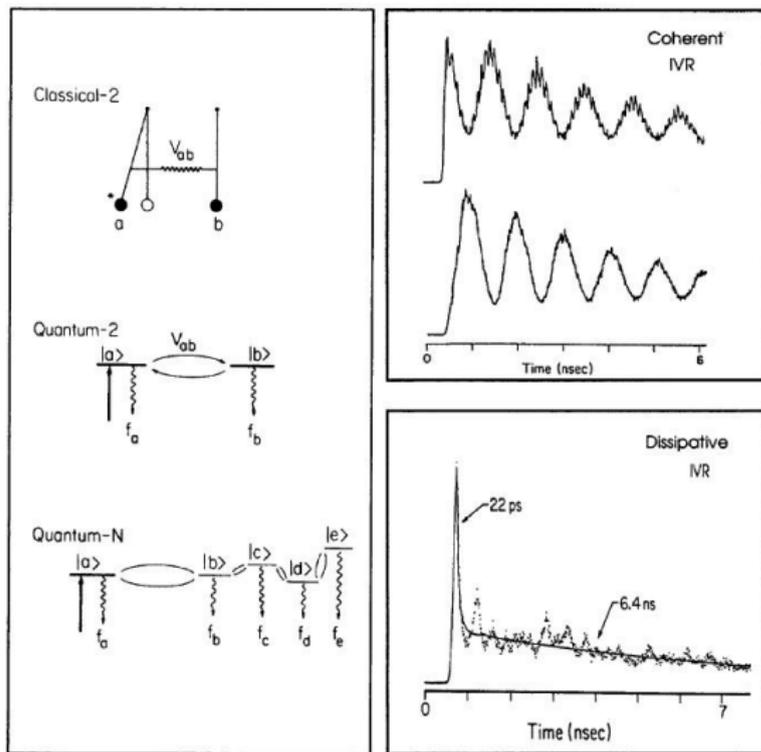


Pump-Probe Spektroskopie



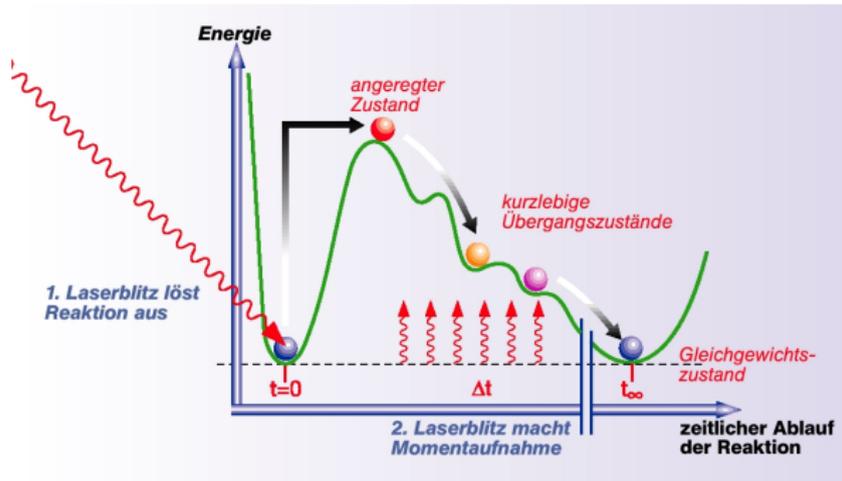
- Anregung eines Wellenpaketes durch kohärente Überlagerung von Eigenzuständen
- Wellenpaket oszilliert in dem Potential

Pump-Probe Spektroskopie



- Vergleich mit einem klassischen Oszillator
- Quantenmechanisches Analogon

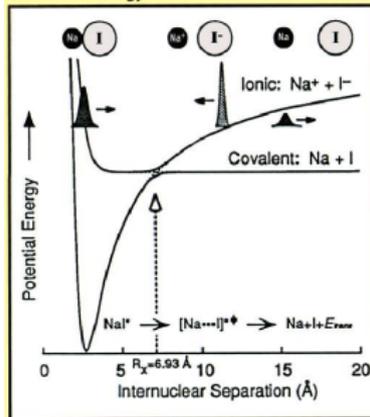
FEL – Pump-Probe Spektroskopie



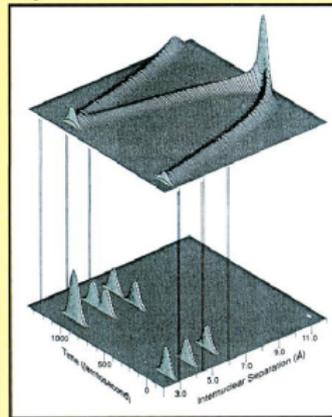
- System wird mit einem ersten Pumpulse angeregt und der Zustand des angeregten mit einem Probepuls nach einer definierten Zeit abgefragt.
Im optischen Bereich kann eine Zeitauflösung bis zu einigen fs erreicht werden.

Pump-Probe Spektroskopie – NaI Molekül

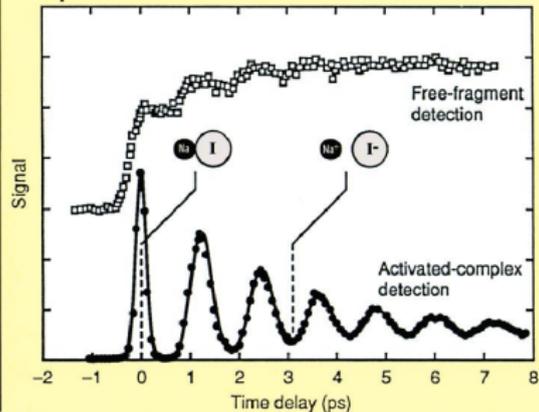
Potential Energy Surfaces



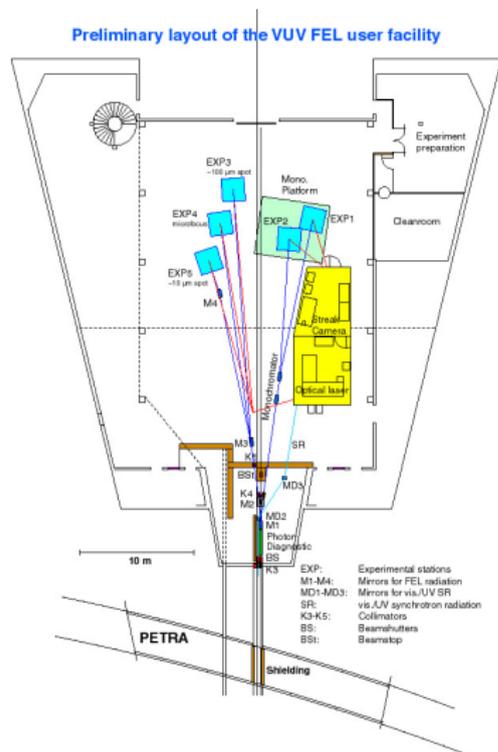
Trajectories R,t



Experimental



FEL – Pump-Probe Spektroskopie

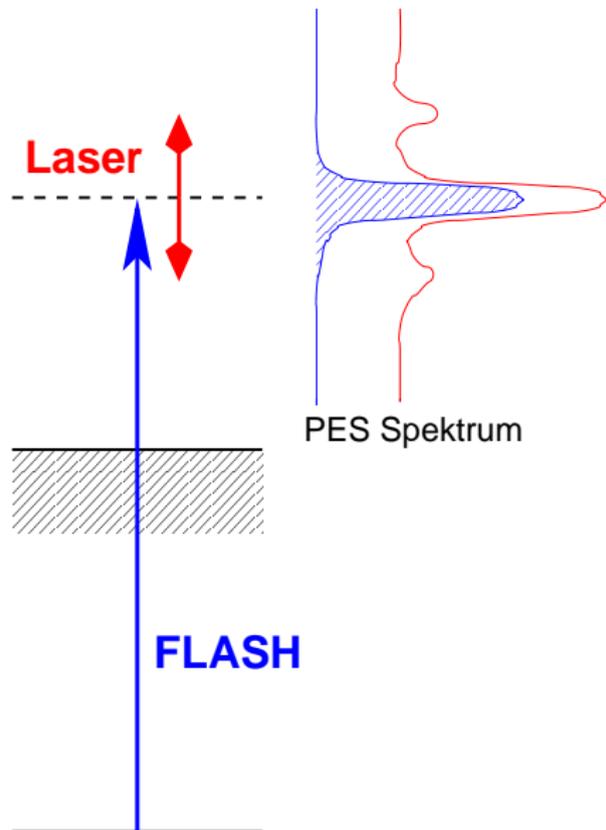


- FLASH hat eine Pulsdauer von ca. 10-100 fs
- Die FLASH Facility wird einen zum FEL synchronisierten Femtosekundenlaser bereitstellen
- Der fs-Laser wird im sichtbaren (VIS) und infraroten (IR) Bereich durchstimmbare sein
- Pump-Probe Experimente mit XUV und VIS Licht werden möglich
- Für XUV-XUV Pump Probe Experimente soll ein XUV Beamsplitter entwickelt werden

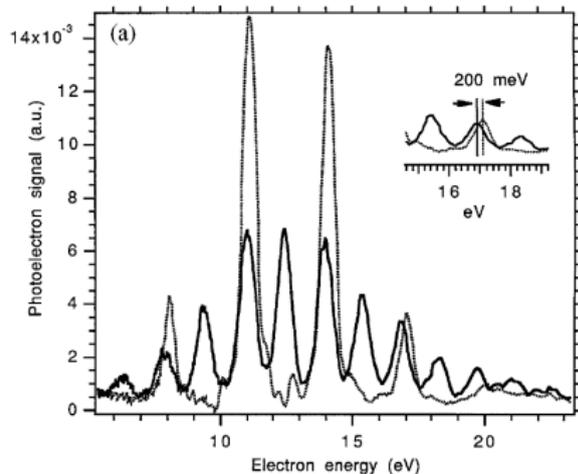
FEL – Pump-Probe Spektroskopie

- **Problem:** Synchronisation von fs-Laser und FEL und Festlegen des Delays zwischen den Laserpulsen
- Beide verwenden die gleiche Masterclock, aber der FEL hat einen nicht vorhersagbaren Jitter
- Thermische Schwankungen können leicht ein Delay verursachen
Abstand Elektronengun-Undulatorenende: $> 100 \text{ m}$
Abstand Undulatorenende-Experiment: ca. 70 m 100 fs entsprechen $3 \cdot 10^{-5} \mu\text{m}$
- Eine Entfernung von mehr als 200 m müsste somit auf besser als $10 \mu\text{m}$ konstant gehalten werden.
- Elektronischer Jitter ist dann noch nicht enthalten
- Das Delay kann somit nicht eingestellt werden, wie bei *normalen* Pump-Probe Messungen, sondern muß nachträglich gemessen werden.
- **Wie ?**

Side Bands



- ATI: Above Threshold Ionization
- Seitenbänder (Site bands) in den Photoelektronenspektren

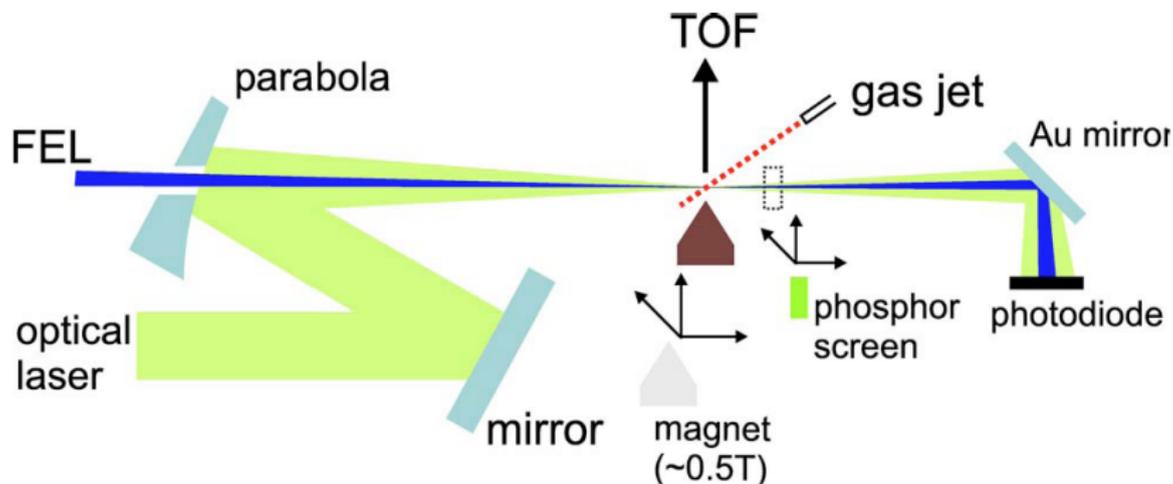


et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 2468 (1996)

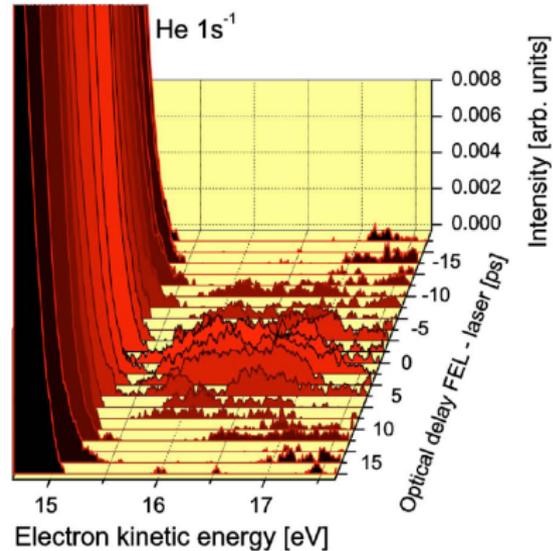
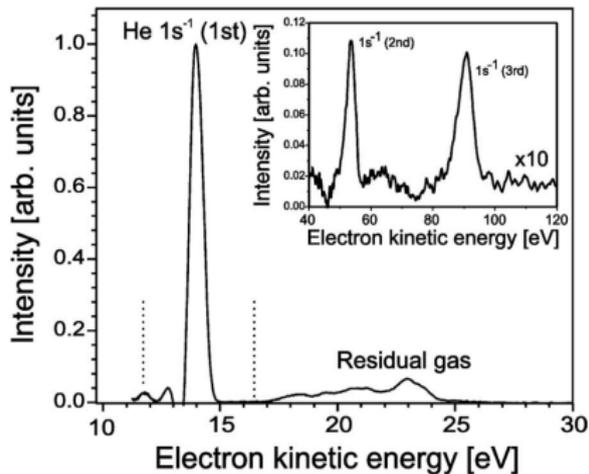
Glover

FLASH – Side Bands

- Seitenbänder treten nur bei einem Überlapp der FEL und der Laser Strahlung auf
- Finde den Überlapp !



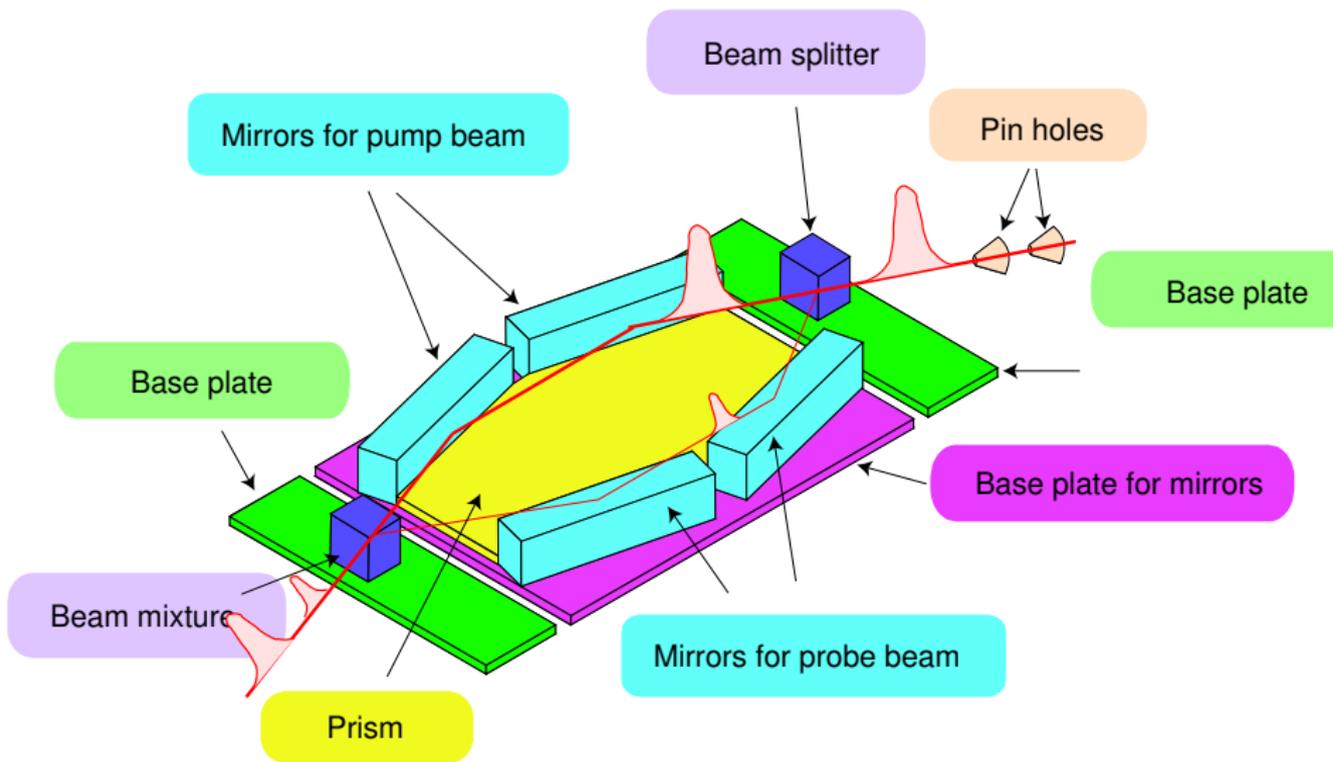
FLASH – Side Bands



FEL – Zeitaufgelöste Experimente

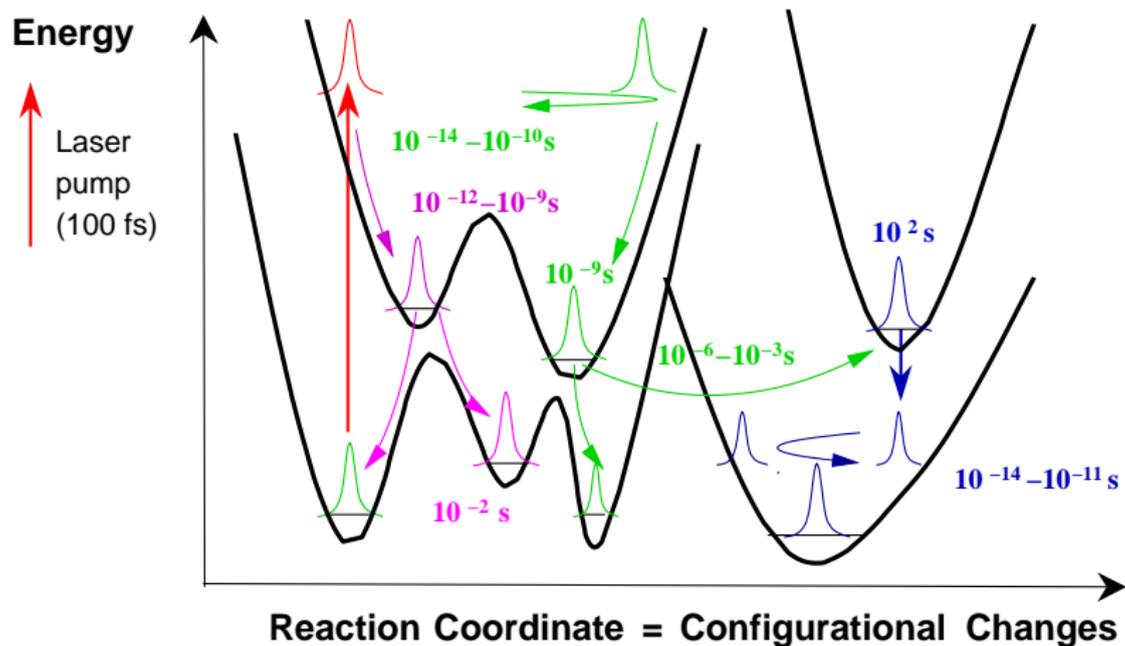
- Vorteil der Rumpfniveauanregung am FEL
Im Idealfall kann bei kleinen Molekülen elementspezifisch der Zustand jedes einzelnen Atoms abgefragt werden.
 - VUV und XUV: elektronischer Zustand
 - Röntgenbereich: geometrische Struktur über Beugung
- An Synchrotrons waren bis jetzt nur Experimente mit ca. 50-100 ps Zeitauflösung möglich
 - Für die allermeisten Prozesse, die untersucht werden sollen, ist das viel zu langsam !
 - Slicing Projekte (ALS Berkeley, BESSY II): zu wenige Photonen
- Was wird nun am FEL möglich sein ?
 - Zeitaufgelöste Röntgenbeugung
 - Wie laufen chemische Reaktionen ab
 - Dynamik des Photoionisationsprozesses
 - Dynamik magnetischer Systeme

XUV Beamsplitter



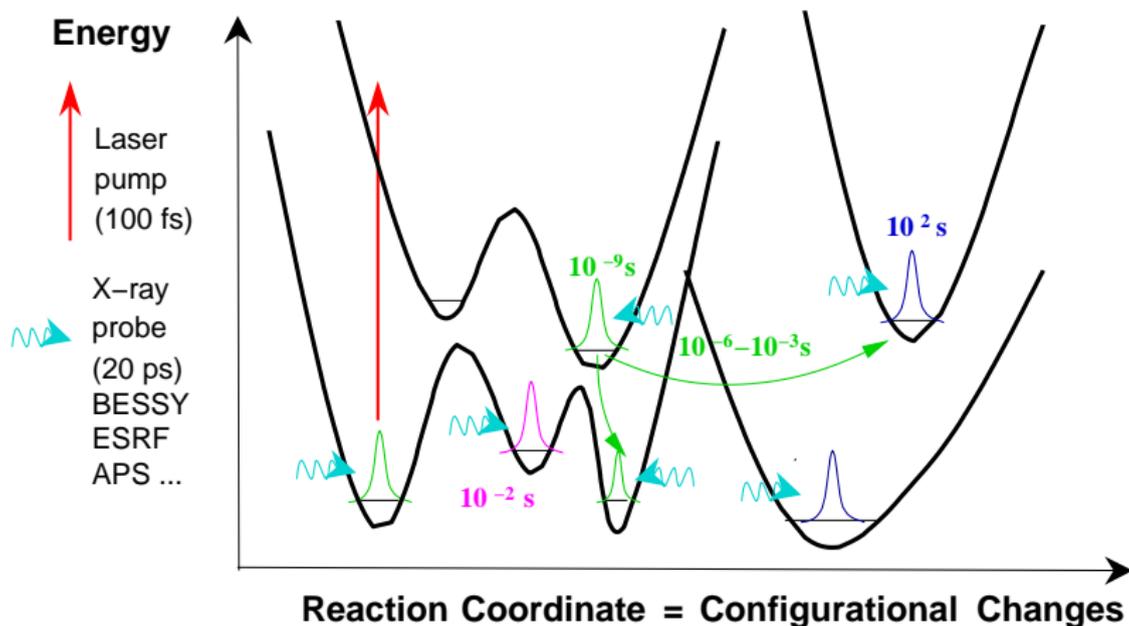
FEL – Chemische Reaktionen

In Situ Characterisation of a Chemical Reaction



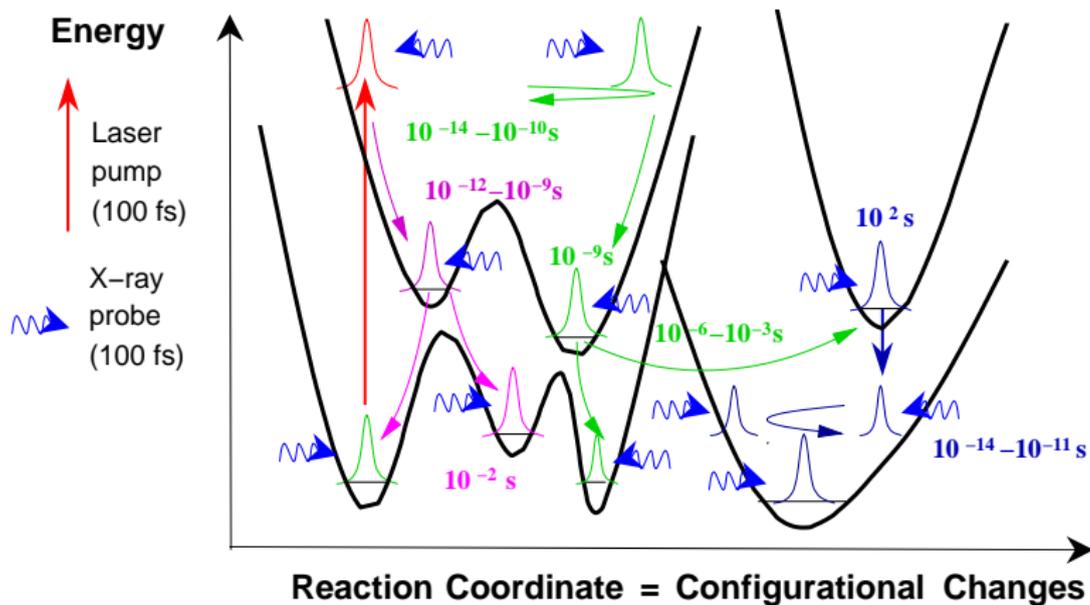
FEL – Chemische Reaktionen

In Situ Characterisation.... as seen by SR puls



FEL – Chemische Reaktionen

In Situ Characterisation.... as seen by X-ray puls



Zeitaufgelöstes ESCA

