

Photonen-Experimente an FLASH

Neues und Spannendes
für die Nutzer und von den Nutzern

Rolf Treusch
BBS Travemünde, 13.02.2020

Was euch erwartet

Inhalte des Vortrags

01 Neue Installationen / Features für FLASH Experimente

- FLASH2 Pump-Probe Laser (FLASH2: FL24, FL26)
- Normierte Absorptions-Spektroskopie (FLASH1: PG2, demnächst auch an FLASH2: FL24)
- Lasen mit zwei Farben (FLASH2)

02 Science Highlight

- „Superstrahler“ im XUV-Bereich (Rohringer, Mercadier et al.)

Neue Installationen / Features für FLASH Experimente

FLASH2 Pump-Probe Laser

(FLASH2: FL24, FL26)

Normierte Absorptions-Spektroskopie

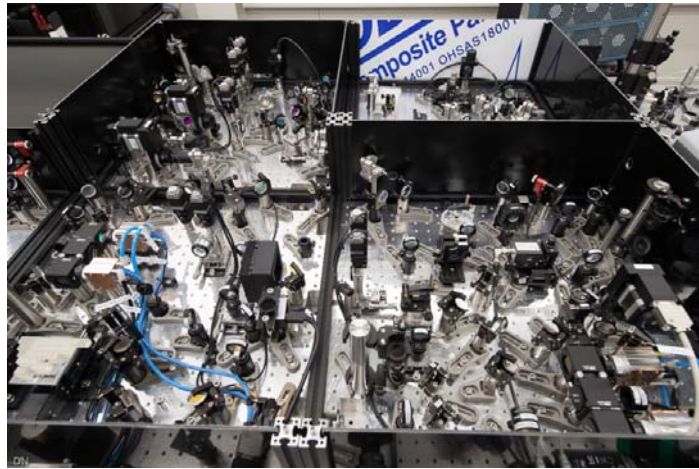
(FLASH1: PG2, FLASH2: FL24)

Lasen mit zwei Farben

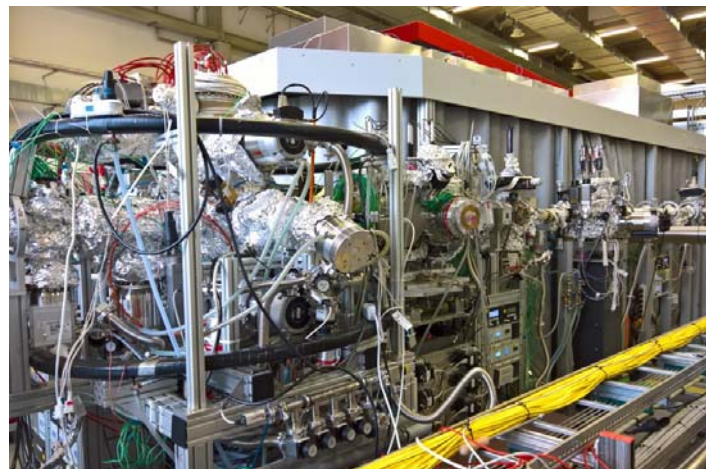
(FLASH2)

FLASH2 Pump-Probe Laser

... nun verfügbar an FL26 und FL24

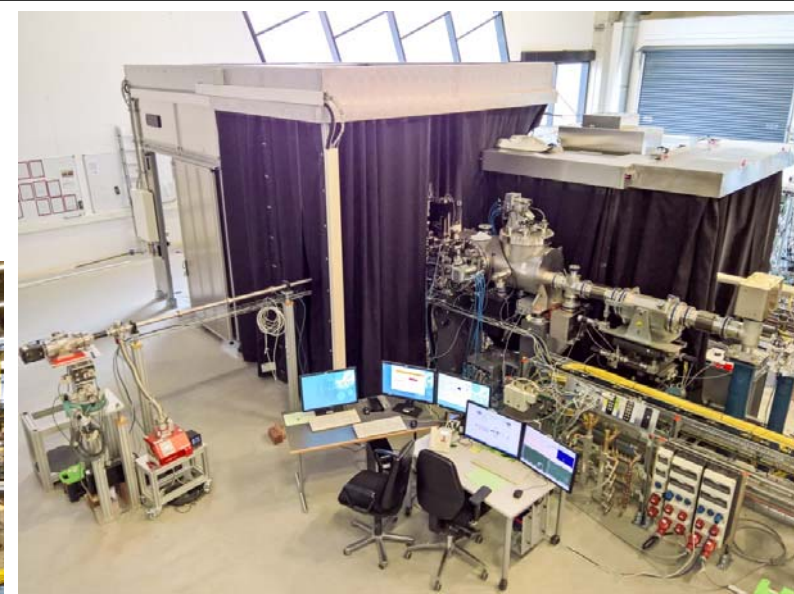
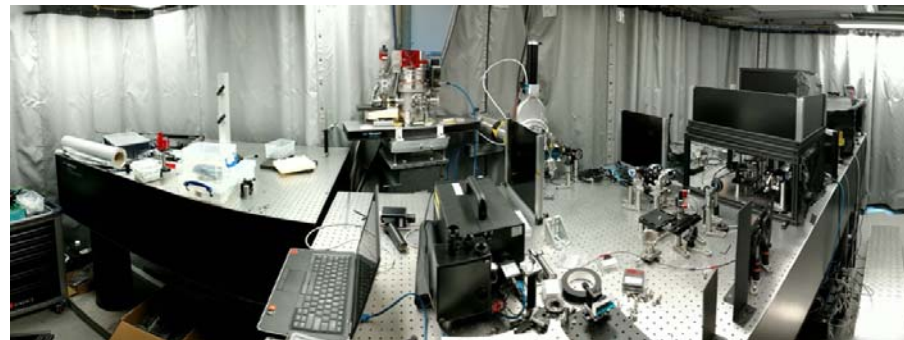


in der großen (80 m²) Pump-Probe Laserhütte



ReMI@FL26 und Laserhütte dahinter und ...

... Blick in die FL26 Laserhütte mit HHG-Laserquelle

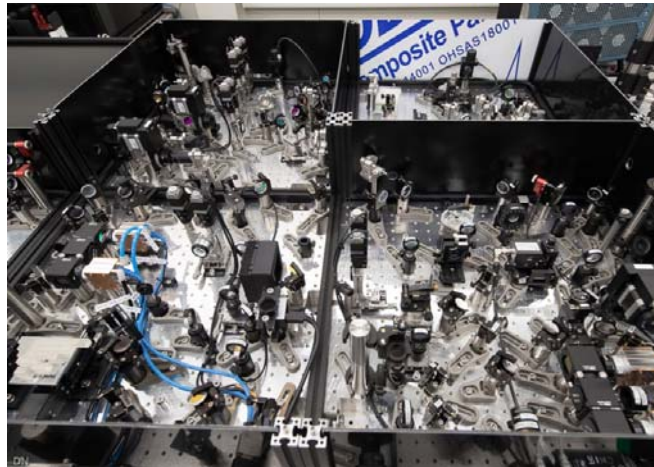


FL24 Laser-Hütten (**links:** Experiment, **rechts:** finale Kompression, SHG, THG, ...)

S. Ališauskas, N. Ekanayake, U. Große-Wortmann, T. Hülsenbusch, T. Lang, B. Manschwetus, C. Mohr, F. Peters, N. Schirmel, A. Swiderski, H. Tavakol, J. Zheng, (all FS-LA), J. Müller, S. Schulz (MSK) and M. Brachmanski (FS-FLASH-B)

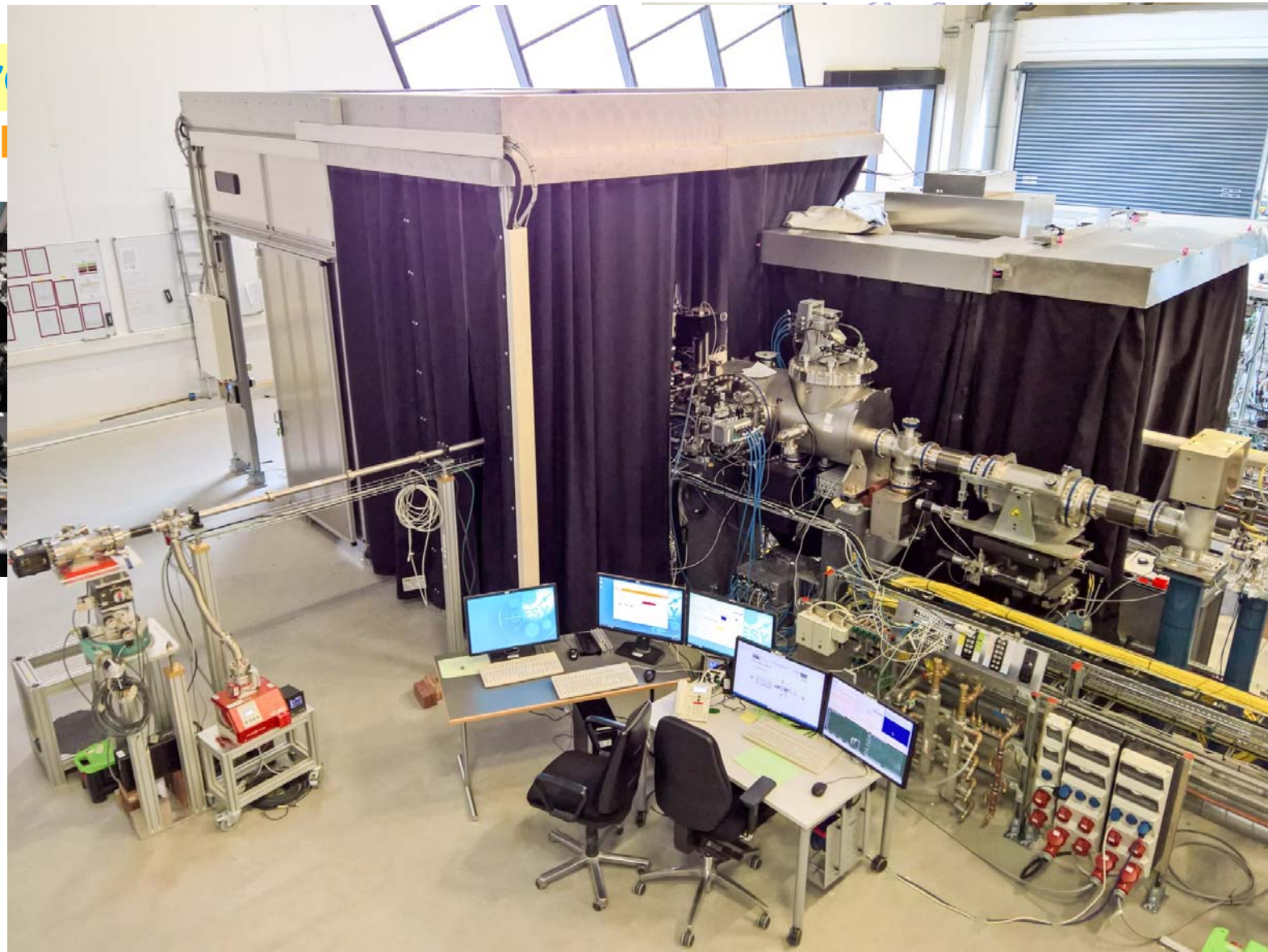
FLASH2 Pump-Probe

... nun verfügbar an FLASH



in der großen (80 m²) Pump-Probe Laserhütte

S. Ališauskas, N. Ekanayake, U. Große-Wortmann, T. Hülsenbusch, T. Lang, B. Manschwetus, C. Mohr, F. Peters, N. Schirmel, A. Swiderski, H. Tavakol, J. Zheng, (all FS-LA), J. Müller, S. Schulz (MSK) and M. Brachmanski (FS-FLASH-B)



PP Laser – FEL Zeitüberlapp („Time Zero“) Scan

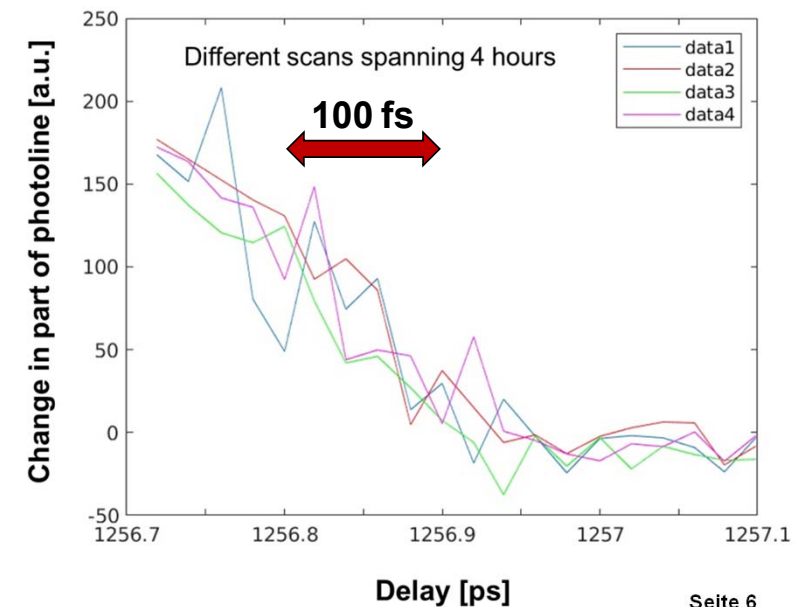
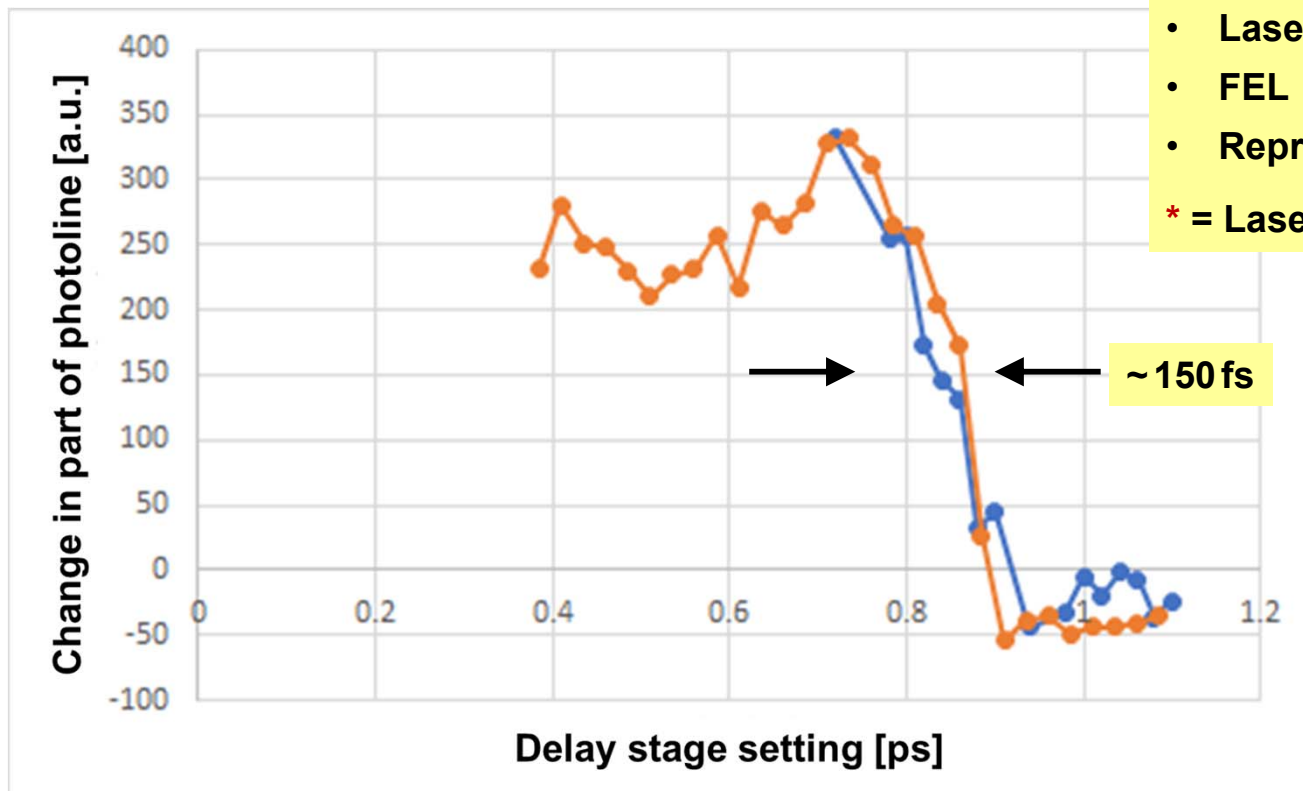
Courtesy: M. Gühr

Hier schaut man auf Änderungen der molekularen Photo(elektronen)linie

FLASH2 Pump-Probe-Laser-Betrieb sehr robust:

- Laser Pulslänge ~ 100 fs* (FWHM) (266 nm, THG)
- FEL Pulslänge ~ 50 fs (FWHM)
- Reproduzierbarkeit der Scans besser als 50 fs

* = Laserpulse nur so lang, da UV, sonst < 20 fs



Energy Scan Tool ...

... nun auf Wunsch in Nutzerhand

User Undulator Control

User Control

Photon Energy: eV

Current Photon Energy SP: 88.560 eV

Readback Undulator server: 88.560 eV

Readback OPIS: off

Control

Allow User Gap Control: SOME ALLOWED

Allow User Group Control: SOME ALLOWED

Allow User Photon Energy Control: ☒ ☐

Minimum Allowed User Photon Energy: 210.00 eV

Maximum Allowed User Photon Energy: 250.00 eV

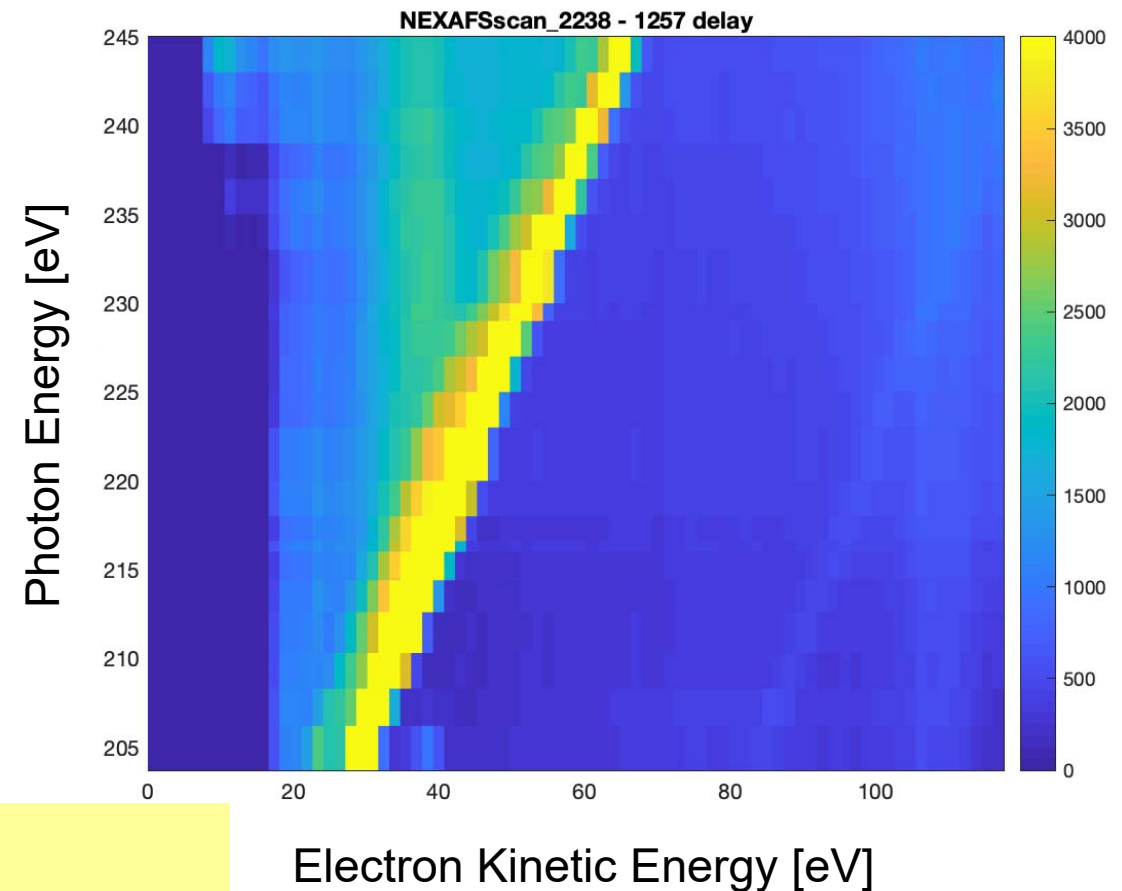
Current Photon Energy SP: 88.560

Energie Scan hier:

- 40 eV (von 6 bis 5 nm) Scan-Fenster
- SASE Intensität stabil während des Scans (s. Photolinie rechts)
- Pump-Probe Laser Delay Scan an jedem Photonenenergie-Punkt

DESY | Photonen-Experimente bei FLASH | Rolf Treusch, 13.02.2020

Spektroskopie des Schwefel 2s Coster Kronig Zerfalls (gelb = 2p Photolinie)

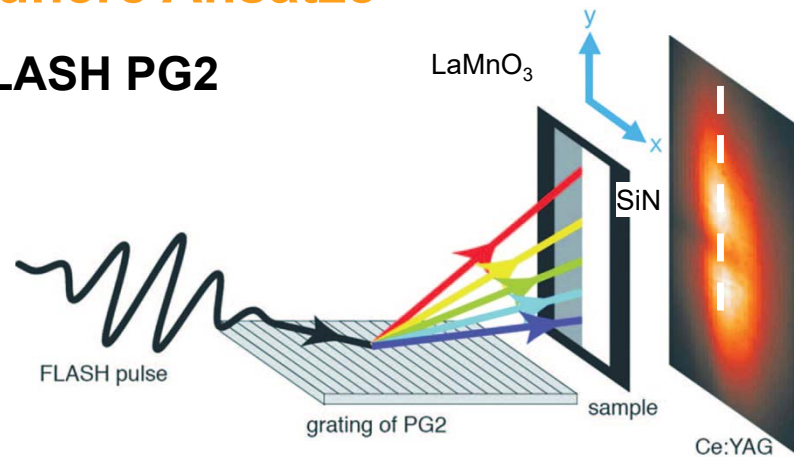


Courtesy: M. Gühr

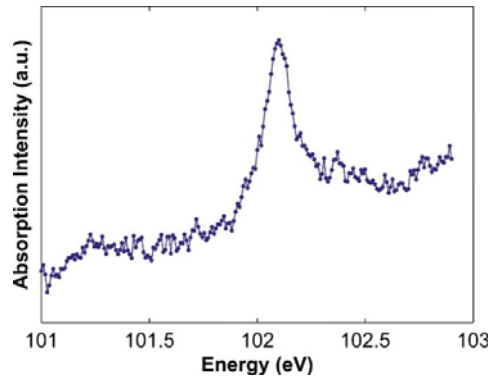
Normierte Absorptionsspektroskopie an einem SASE FEL

Frühere Ansätze

FLASH PG2



- Divergenz und Dispersion produzieren großen Strahlfleck
- Probe im halben Strahl (links), kurz vor einem Ce:YAG-Kristall
- Spektrum der rechten Hälfte des Strahls zur Normierung

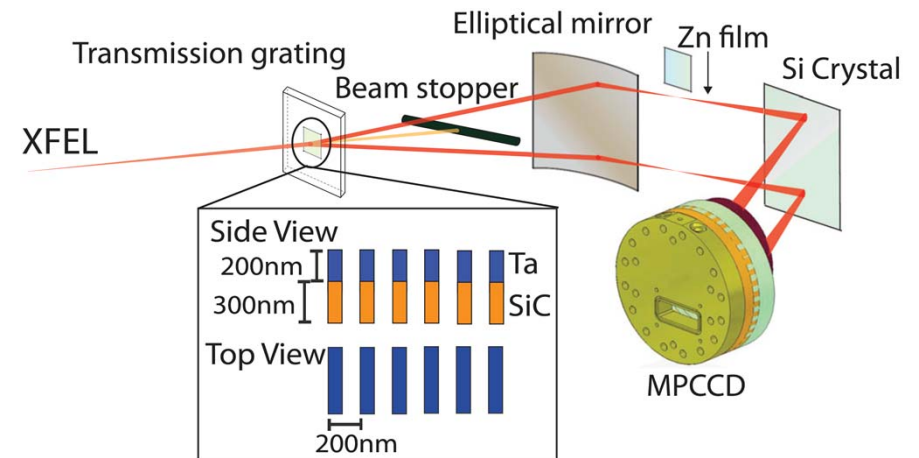


Absorption resonance at the $N_{4,5}$ edge of the La^{3+} ions

**D.P. Bernstein et al.,
Appl. Phys. Lett. 95 , 134102 (2009)**

SACLA

**Courtesy: G.Brenner,
M.Beye, R.Engel**

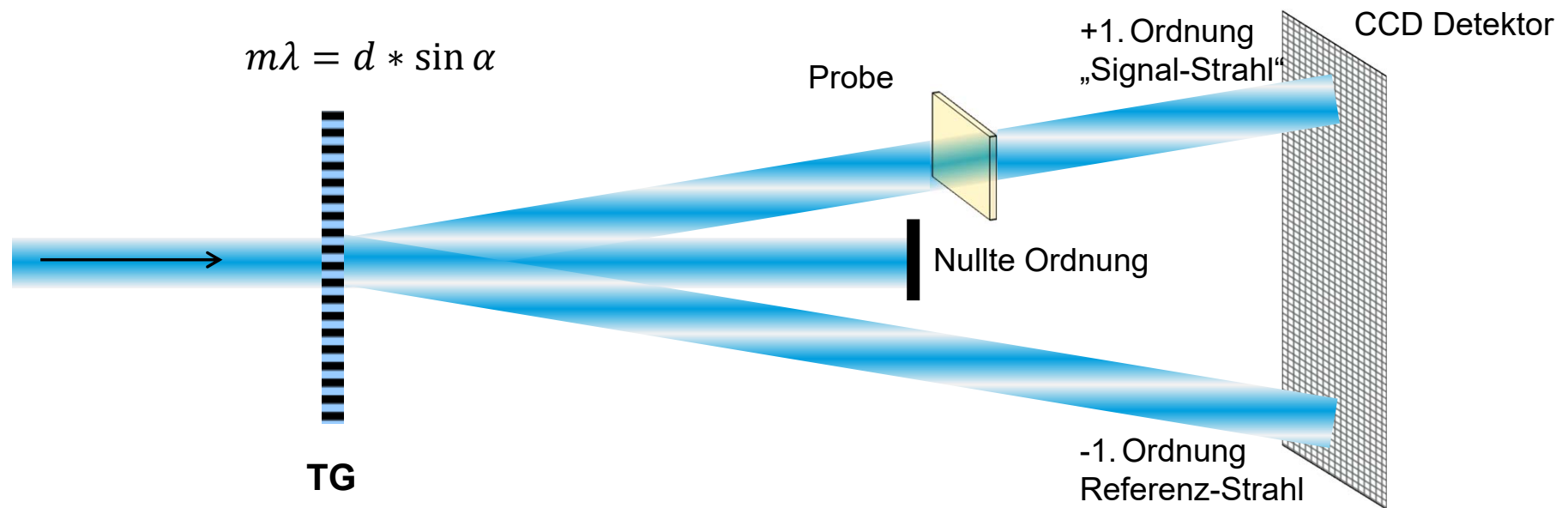


- Transmissionsgitter teilt Strahl via Wellenfront-Aufspaltung
- Spektrometer für die Energiedispersion hier dahinter

**Tetsuo Katayama, et al.,
Appl. Phys. Lett. 103 , 131105 (2013)**

Transmissionsgitter als Strahlteiler

Normierungs-Schema



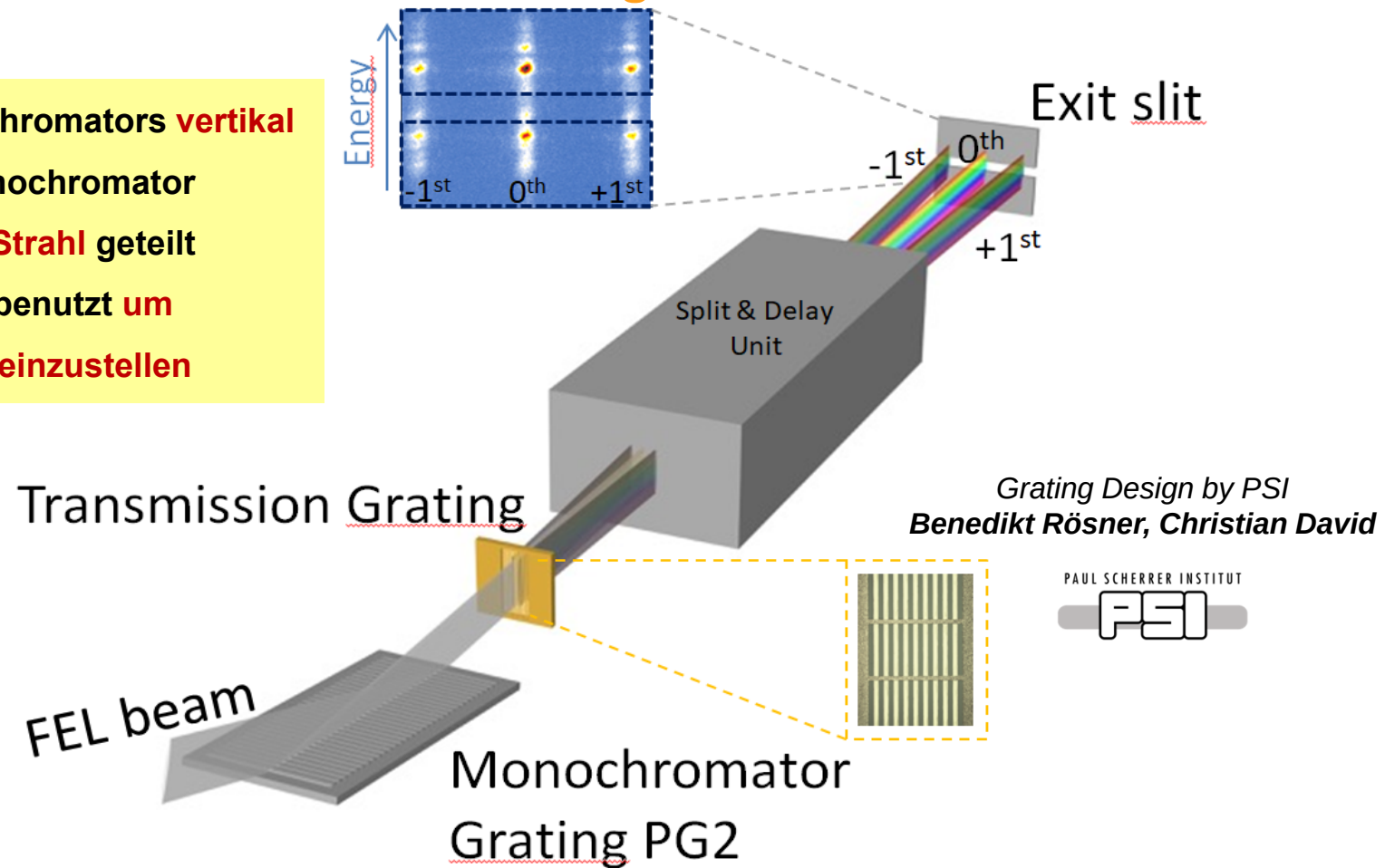
Transmissions-Beugungsgitter (TG)
teilt FEL-Puls in zwei identische Kopien

→ **Signal- & Referenz-Strahl**

Normierungsschema bei FLASH

Aufbau an der PG2 Monochromator-Strahlführung

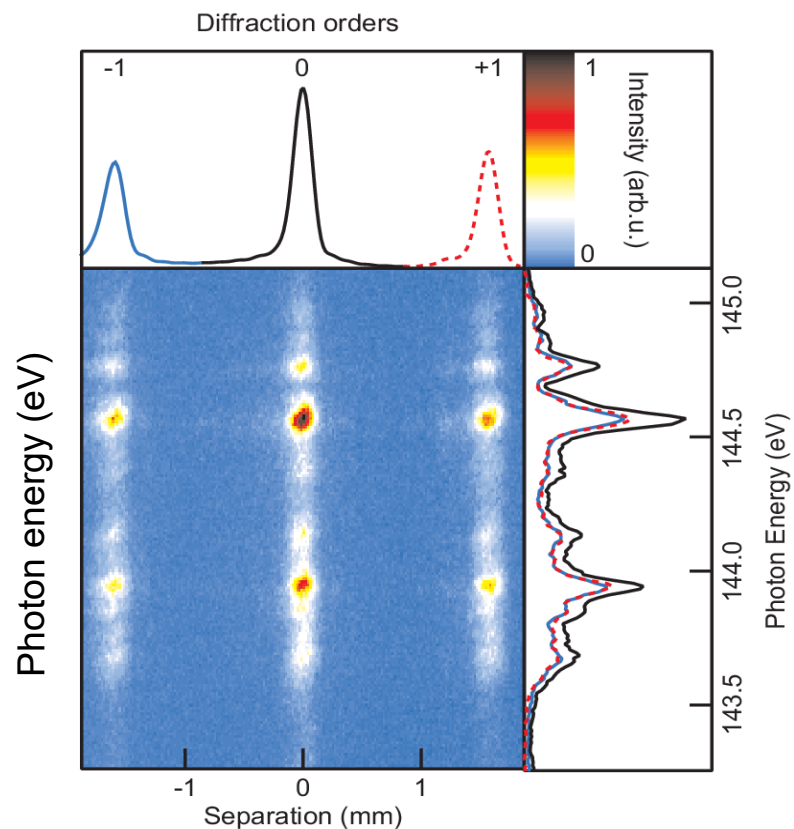
- Energie-Dispersion des Monochromators **vertikal**
- **Transmissionsgitter** hinter Monochromator
- **horizontal** in **Signal-/Referenz-Strahl** geteilt
- Optik der **Split & Delay-Einheit** benutzt um Strahlen in ihrer **Richtung** fein einzustellen



Gebeugtes Einzelpuls SASE-Spektrum

Gemessen am Monochromator Austrittsspalt

G. Brenner, S. Dziarzhytski, P.S. Miedema, B. Rösner, C. David, and M. Beye, "Normalized single-shot X-ray absorption spectroscopy at a free-electron laser", Opt. Lett. 44, 2157 (2019)

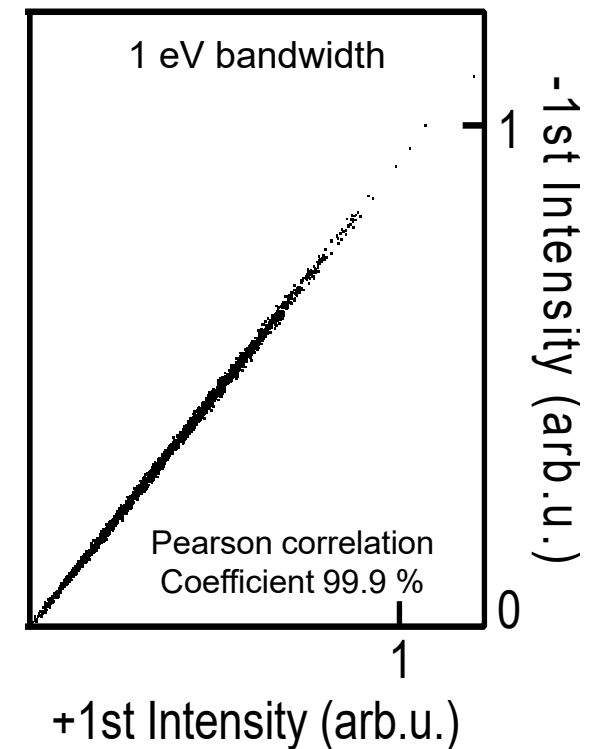


Beispiel:

Monochromator, 0.1 eV Bandbreite,
500 Bunches @ 10 Hz

→ in 1 Sekunde Integrationszeit
pro Datenpunkt erreicht man
eine Empfindlichkeit auf
Absorptions-Änderungen
von **< 0.1 %**.

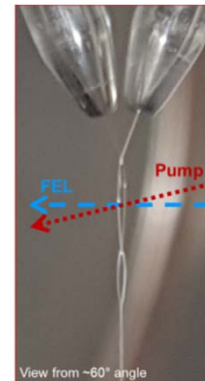
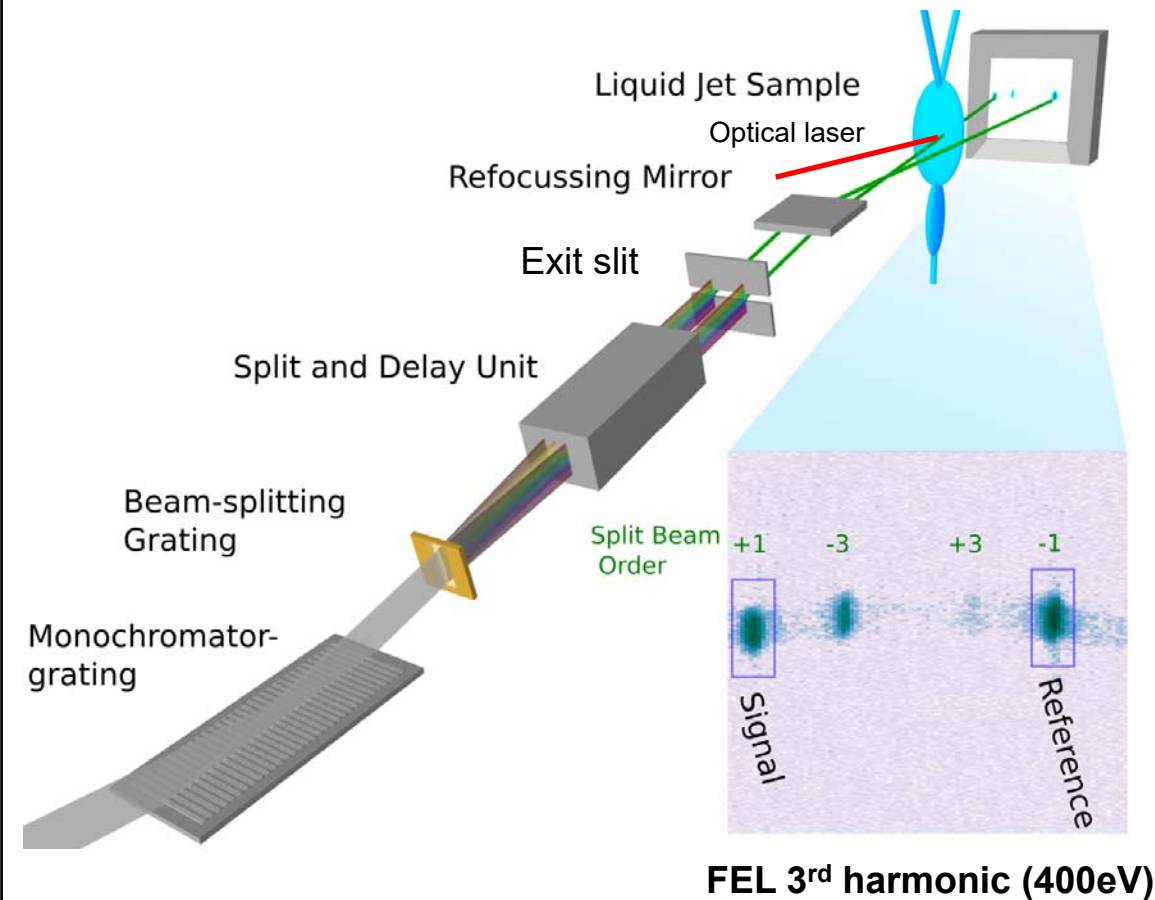
Intensity correlation



Sehr gute Korrelation der Strahlen +1./-1. Ordnung in Intensität und Energie

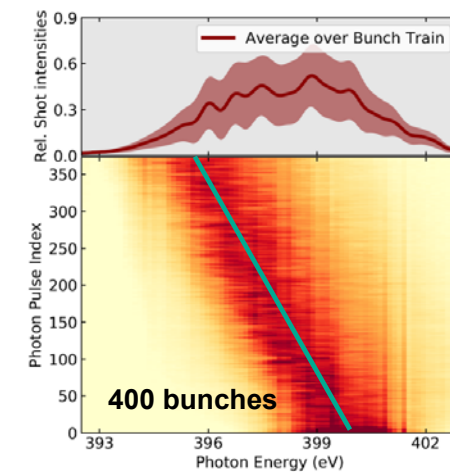
Stickstoff K-Kanten-Spektroskopie an flüssigen Proben (Beye et al.)

Weichröntgen-Absorptions-Spektroskopie (XAS) bei FLASH



Ekimova et al.
Struct. Dyn. 2,
054301 (2015)

Verdoppeln der effektiven FEL Bandbreite auf Wunsch!



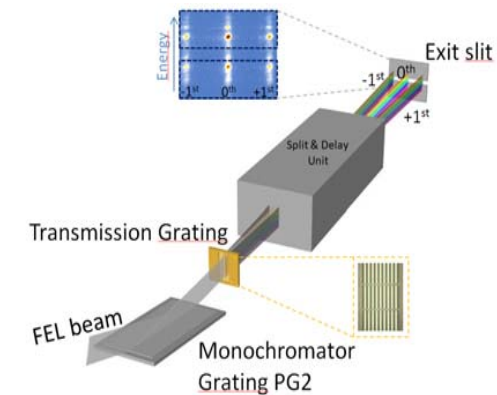
$\Delta E = 9 \text{ eV}$

Absichtlicher
Intra-train
FEL Energy
Chirp

VLS Spektrometer & KALYPSO Zeilendetektor

Normierte XAS Spektren: Zusammenfassung

- **Robuste Methode** für dispersive Röntgen-Absorptions-Spektroskopie bei FLASH implementiert
 - Diffraktive **Transmissionsgitter zur Aufspaltung** des Strahls **in Signal- & Referenzstrahl** benutzt
 - Exzellente Korrelation der beiden Strahlen nachgewiesen
 - Sehr hohe Empfindlichkeit auf Absorptionsänderungen (Empfindlichkeit **besser als 1 Promille** erreichbar)
 - Methode auch bei Harmonischen von FLASH (z.B. an Sauerstoff und Stickstoff K-Kante) einsetzbar
- ➔ **Zeitaufgelöste Pump-Probe XAS an SASE FELs möglich!**



Zwei-Farben-Lasing-Schema bei FLASH2

Courtesy: M. Braune

... durch alternierende Einstellungen des Undulator-Gaps



Erste Messungen am 10. Oktober 2018

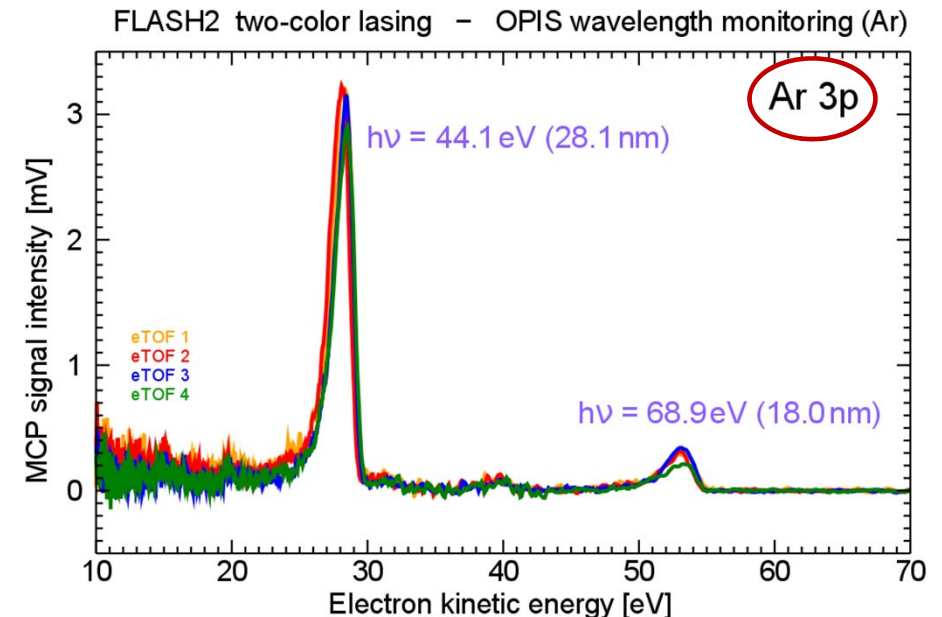
E = 675 MeV

$\lambda_1 = 18$ nm $\lambda_2 = 28$ nm

Undulator-Segmente mit der “falschen” Wellenlänge sind trotzdem aktive Elemente, die das Microbunching verstärken

Quellpositionen beider Farben dicht am Undulator-Ende
→ guter Transport und Fokussierung möglich

**E. Schneidmiller, M. Yurkov, M. Kuhlmann, M. Braune,
B. Faatz, K. Tiedtke, A. Sorokin, U. Jastrow**



Aus GMD- (gas monitor detector = Intensität)
und OPIS- (online photo-ionization spectrometer)
Messungen, kann man die **Puls-Energien**
abschätzen:

~ 5 μ J for 18 nm

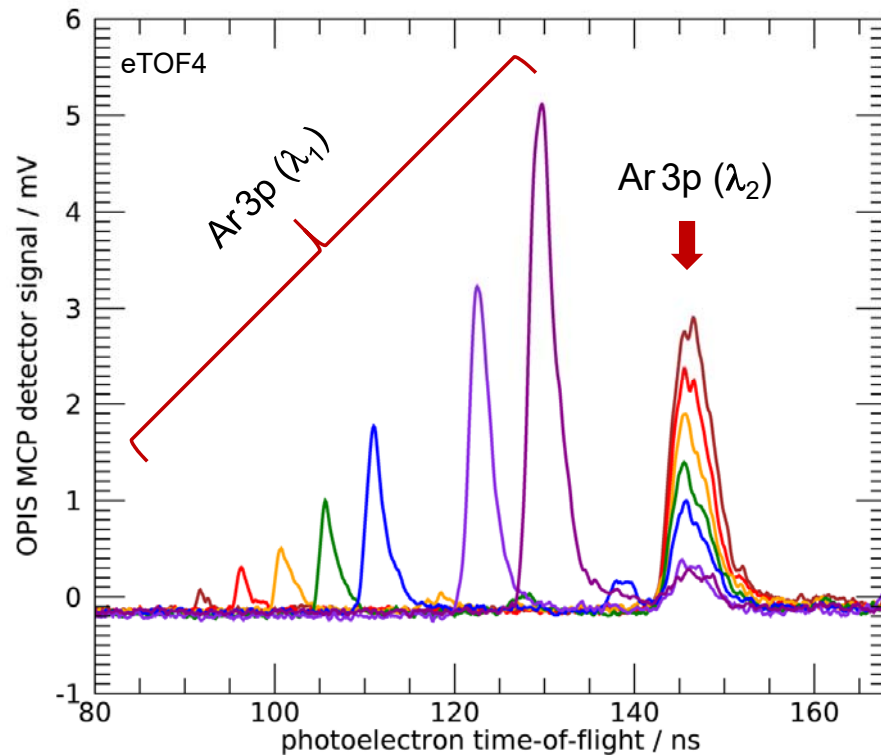
~ 20 μ J for 28 nm

Zwei-Farben-Lasing bei FLASH2

Nächster Schritt: Scannen der Wellenlänge

Änderungen des Gaps für die auf λ_1 eingestellten, ungradzahligen Undulator-Nummern

OPIS Wellenlängen-Messung



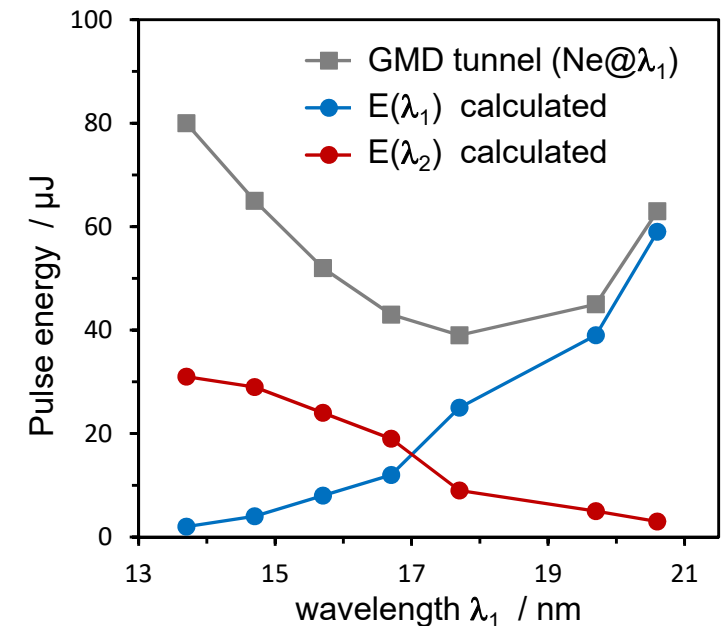
$\lambda_1=13.6\text{nm}$	$\lambda_2=22.6\text{nm}$
$\lambda_1=14.7\text{nm}$	$\lambda_2=22.5\text{nm}$
$\lambda_1=15.6\text{nm}$	$\lambda_2=22.5\text{nm}$
$\lambda_1=16.6\text{nm}$	$\lambda_2=22.5\text{nm}$
$\lambda_1=17.6\text{nm}$	$\lambda_2=22.5\text{nm}$
$\lambda_1=19.6\text{nm}$	$\lambda_2=22.6\text{nm}$
$\lambda_1=20.6\text{nm}$	$\lambda_2=22.6\text{nm}$

$\lambda_1 = 13.6 - 20.6 \text{ nm}$
 $\lambda_2 = 22.6 \text{ nm}$

Die Puls-Intensitäten der beiden Farben sind im nichtlinearen SASE-Verstärkungsbereich gekoppelt, d.h. nicht unabhängig

→ Man kann nicht die Intensität für eine Wellenlänge messen, indem man die andere „abschaltet“ (durch Öffnen der entsprechenden Undulatoren)

→ Offline Intensitäts-Bestimmung, z.B. aus GMD Messungen mit Photonen beider Farben und relativen Intensitätsverhältnissen aus OPIS Daten



Zwei-Farben-Lasing bei FLASH2

Tools für Online Intensitäts-Messungen

Methode 1: zwei GMDs mit verschiedenen Gasen:

GMD Tunnel (Ne): kombinierte Puls-Energie $E_{\text{Ne}}(\lambda_1 + \lambda_2)$

GMD Halle (Kr): kombinierte Puls-Energie $E_{\text{Kr}}(\lambda_1 + \lambda_2)$

Lineares Gl.-System → effektive Puls-Energien $E(\lambda_1)$, $E(\lambda_2)$

Methode 2: ein GMD und OPIS für Intensitäts-Verhältnis:

GMD Tunnel (Ne): kombinierte Puls-Energie $E_{\text{Ne}}(\lambda_1 + \lambda_2)$

OPIS : relative Intensitäten $I(\lambda_1) / I(\lambda_2)$

→ effektive Puls-Energien $E(\lambda_1)$, $E(\lambda_2)$

OPIS_TwoColor_IntensityAnalysis.xml FLASH.UTIL/STORE/FL2.TUNNEL.OPIS/*

OPIS Two-Color Intensity Analysis

TUNNEL

Mean pulse energy for analyzed spectra 107.3 uJ

GMD gas type Neon (Ne)

Photoelectron feature 1

Ne_2pSP

Photoelectron feature 2

Ne_2s

	Color 1	Color 2
wavelength	6.9 nm	9.9 nm
photon energy	180.1 eV	125.2 eV
relative intensity	4.6	16.9
cross section	1.2 Mb	2.6 Mb
mean charge	1.1	1.1
calc.intensity	12.4 uJ	31.8 uJ

	Color 1	Color 2
wavelength	6.9 nm	9.9 nm
photon energy	179.5 eV	125.0 eV
relative intensity	0.7	2.5
cross section	1.2 Mb	2.6 Mb
mean charge	1.1	1.1
calc.intensity	12.9 uJ	31.9 uJ

$\lambda_1 = 7 \text{ nm}$

$\lambda_2 = 10 \text{ nm}$

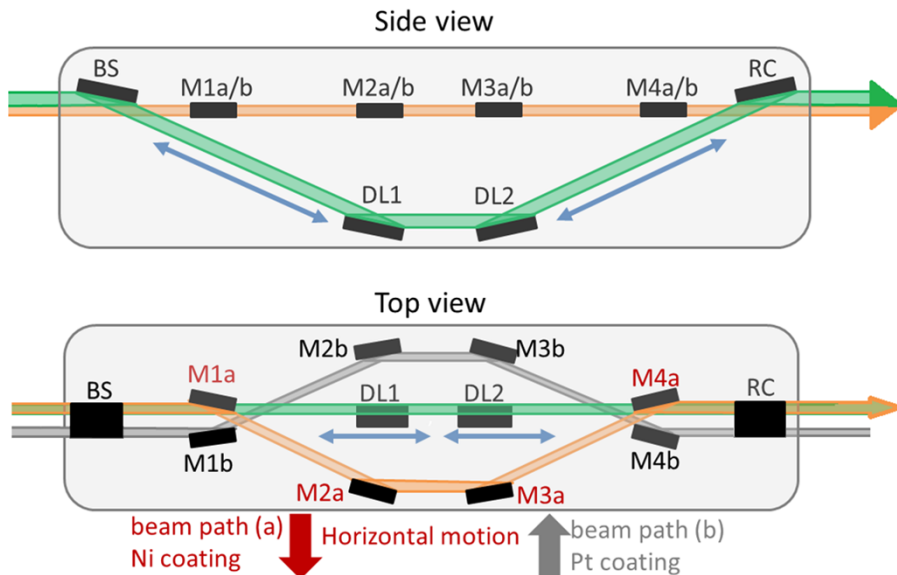
**Kürzeste
kombinierte
Wellenlängen
bisher!
(24.03.2019)**

two_colour.xml TEST.HASYLAB/FINI/TWO_COLOURS/

Detector A		tunnel	Detector B		hall
length	22.90	edit	length	22.90	edit
curr L	52.03p		curr L	38.08p	
curr R	47.88p		curr R	26.22p	
sum	99.91p		sum	64.3p	
press	1.81E-5		press	5.61E-6	
temp	22.42		temp	22.69	
gas ID	2		gas ID	3	
	neon			krypton	
cross	1.285	1.442	cross	5.065	11.921
gamma	1.122		gamma	2.354	
cross	2.69	2.915	cross	2.925	6.403
gamma	1.084		gamma	2.189	
desity	4.430E17		desity	1.372E17	
ratio	2.0225	$\frac{\text{cross}_2 * \text{gamma}_2}{\text{cross}_1 * \text{gamma}_1}$	ratio	0.5371	$\frac{T1 * \text{cross}_2 * \text{gamma}_2}{T2 * \text{cross}_1 * \text{gamma}_1}$
rep	10.00		lambda 1	7.00	edit
bunches	1.00		lambda 2	10.00	edit
Assuming there is no wavelength 2			transm 1	1.66	edit
number	4.26E13	A	transm 2	1.66	edit
pulsener	121.01µ		swap 1 <=> 2		
number	1.07E13	B			
pulsener	30.4µ				
from extern			N1	8.791E12	
calculated				24.949µ	
manual			N2	1.674E13	
RPC				33.248µ	

Ausblick: Trennen & Verzögern der zwei Farben

... mit dem nächsten Upgrade der Split & Delay Unit (SDU) für FL24 (and FL23)



DESY | Photonen-Experimente bei FLASH | Rolf Treusch, 13.02.2020

- XUV / Weichröntgen *Pump-Probe* Experimente an FL24 & FL23
- erwarteter Jitter: **< 1 fs**
- Verzögerung τ : **– 6 ps to 18 ps**
- 30 – 1800 eV
Auswahl an Spiegeln: **Ni**- und **Pt**-beschichtet
- Justage des Split-Verhältnisses über **vollen Bereich** (0-100%)

- **Upgrade für flexiblen Zwei-Farben-Betrieb** geplant, durch Ersatz von zweien der Spiegel in jedem Zweig durch ein Gitter (jeweils 2 Gitter, um Pulslänge kurz zu halten) **könnte Ende 2022 einbaubereit sein**

BMBF 'Verbundforschung'
H. Zacharias et al., Uni Münster



Zwei-Farben-Lasing: Zusammenfassung



- Elegante Methode, um zwei Farben mit ähnlichen longitudinalen Quellpositionen zu produzieren
- **Über weiten Bereich freie (durchstimbare) Wellenlängenwahl, typischerweise (bisher) mit einigen 10 μJ Intensität**
- Verschiedene Tools zur Intensitätsmessung in Entwicklung, die schon gut in Resultaten übereinstimmen
- kürzeste mögliche Wellenlängen mit geeigneten Intensitäten noch zu bestimmen
- (wellenlängen-selektive) Split&Delay Einheit in Planung
- **Erstes 2-Farben-(Inhouse-)Experiment: Ende April**

Science Highlight

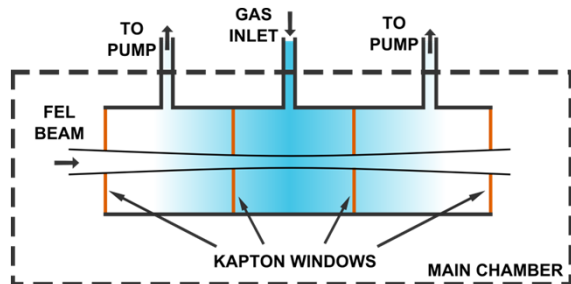
„Superstrahler“ im XUV-Bereich (Rohringer, Mercadier et al.)

Extreme Ultraviolette Superfluoreszenz in Xenon

Laurent Mercadier, Nina Rohringer et al.

1. Experiment:

**Gas Zelle (unten) eingebaut in
CAMP Experimentierkammer**



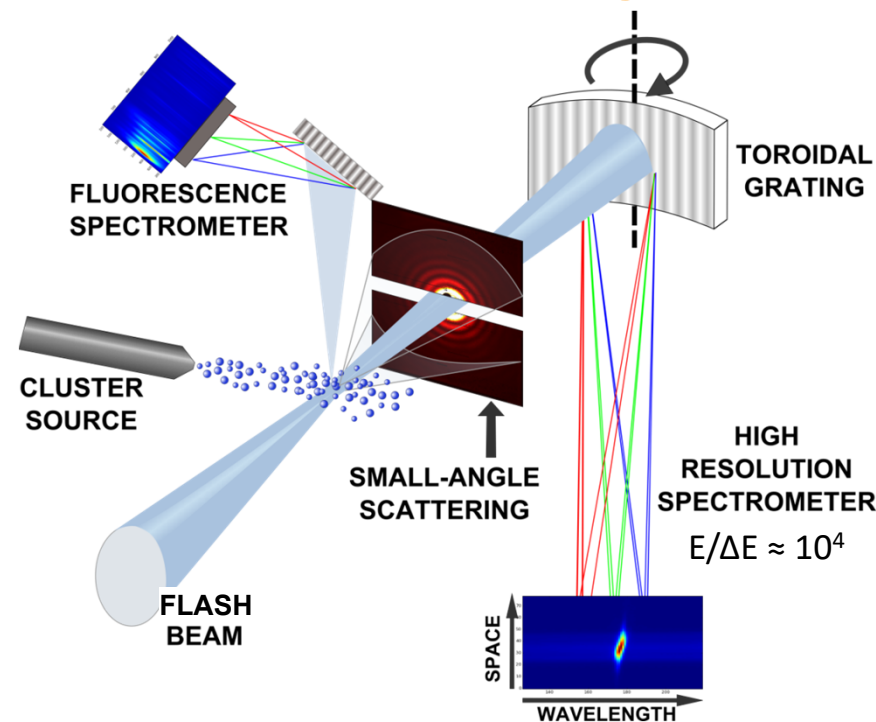
Fokus-Größe: $\sim 5 \times 6 \mu\text{m}^2$
Max. Puls-Energie: $150 \mu\text{J}$
Pulsdauer: $50\text{-}100 \text{ fs}$
Max. Intensität: $6 \times 10^{15} \text{ W cm}^{-2}$

2. Experiment (rechte Abbildung):

**Cluster-Quelle eingebaut in
in CAMP**

Benutzte FLASH Photonen-Energien: 72 eV, 92 eV, 100 eV, 136 eV

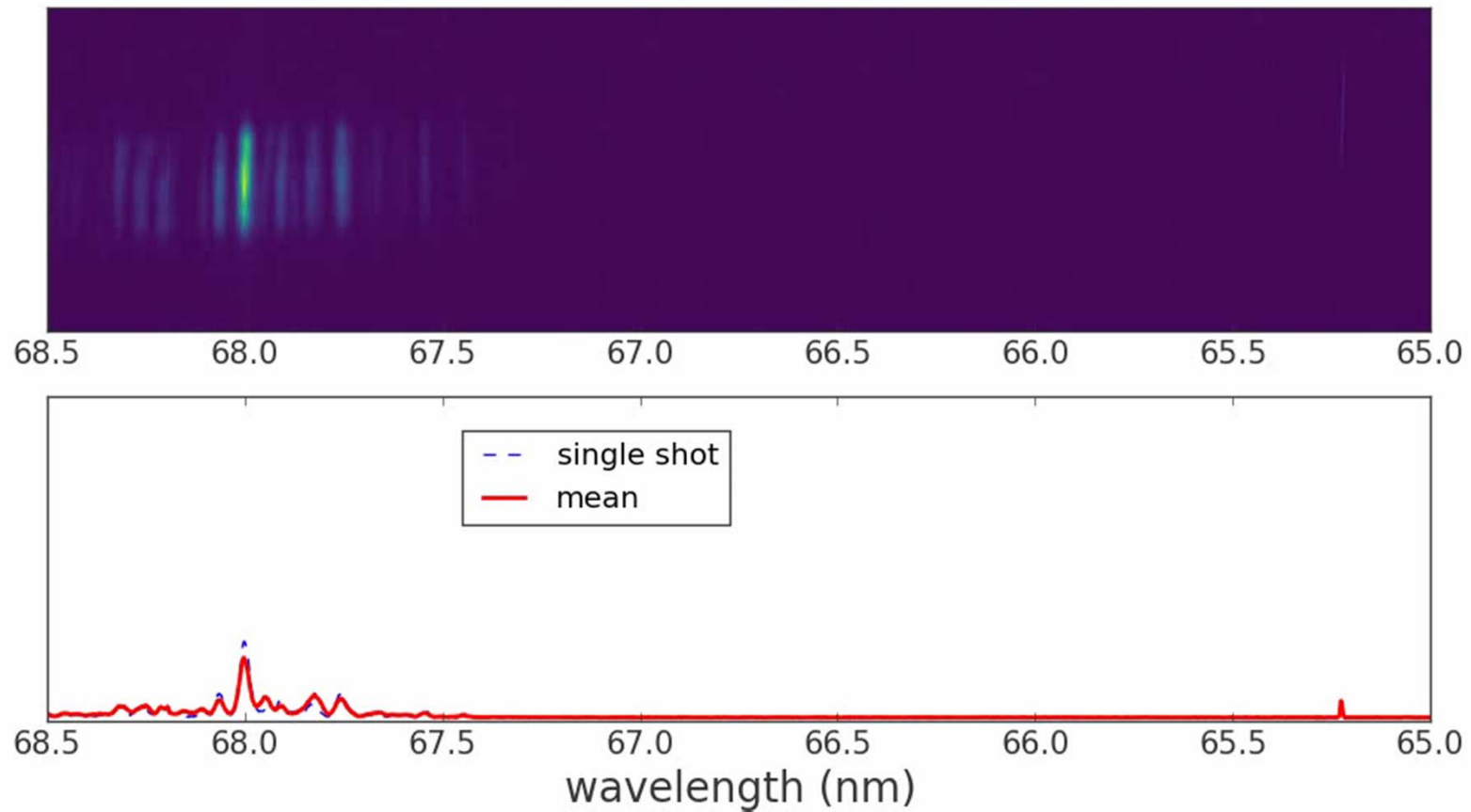
Stimulierte Emissions-Linien: Xe^{2+} 65 nm, 68 nm, 109 nm
 Kr^{2+} 54 nm, 90 nm



L. Mercadier et al.,
Phys. Rev. Lett. 123, 023201 (2019)

Kollektive spontane Emission in Xe Gas

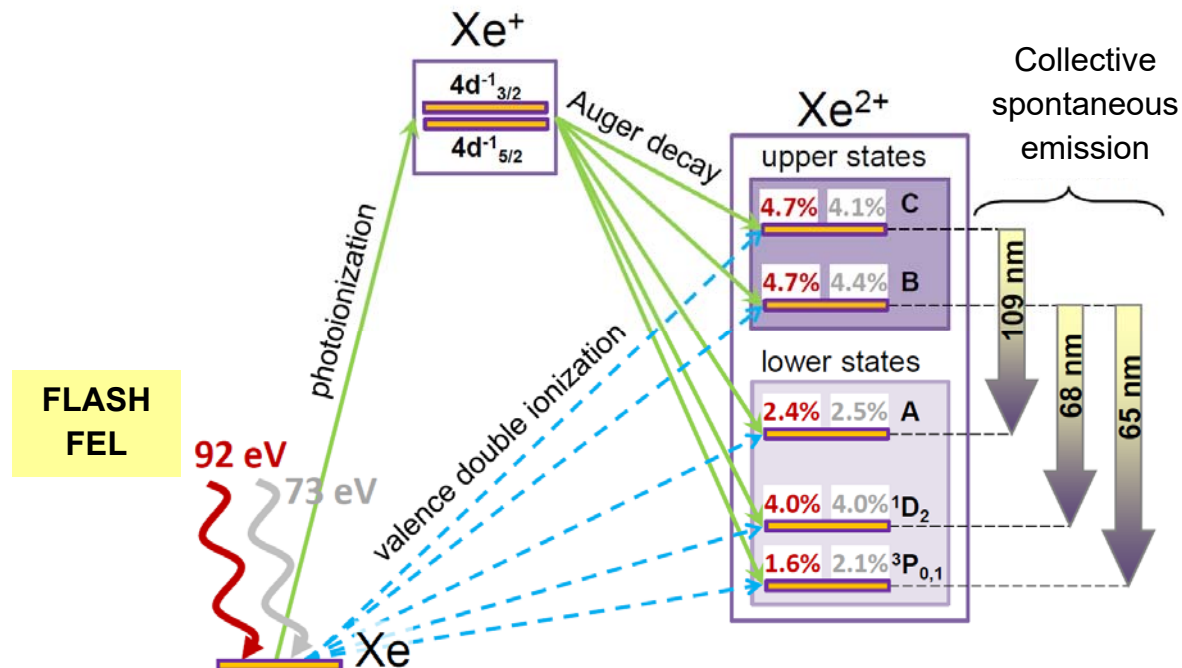
Xe 7 mbar, $h\nu=72$ eV (17.2nm) , 50 – 100 fs, SASE in 4.Gitter-Ordnung



Energie-Diagramm der Xe-Emission

- Auger-gepumptes Schema
- Nanosekunden Lebensdauer des „upper state“

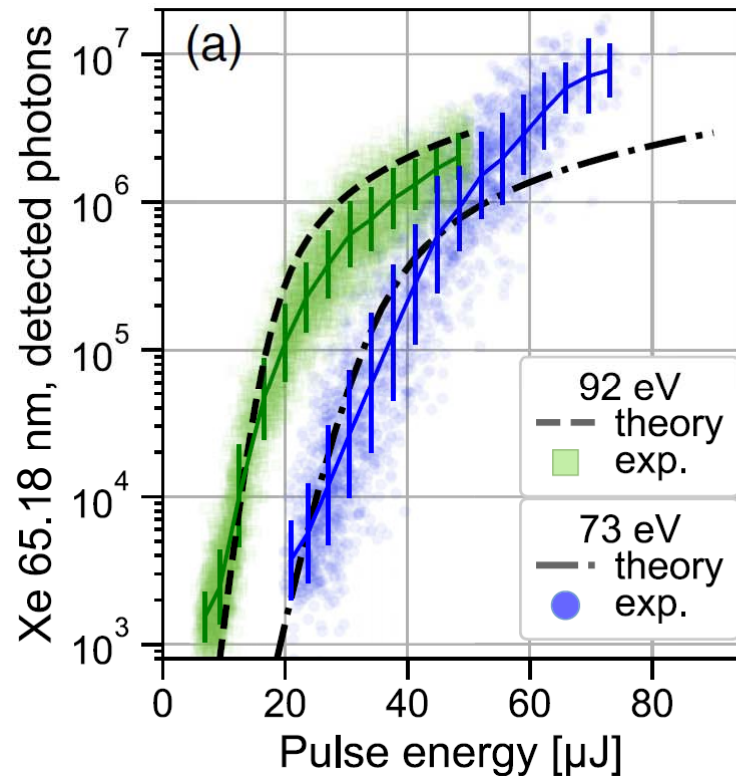
Emission bei 109 nm erstmalig beobachtet von
H. C. Kapteyn, R. W. Lee, and R. W. Falcone,
Phys. Rev. Lett. 57, 2939 (1986)



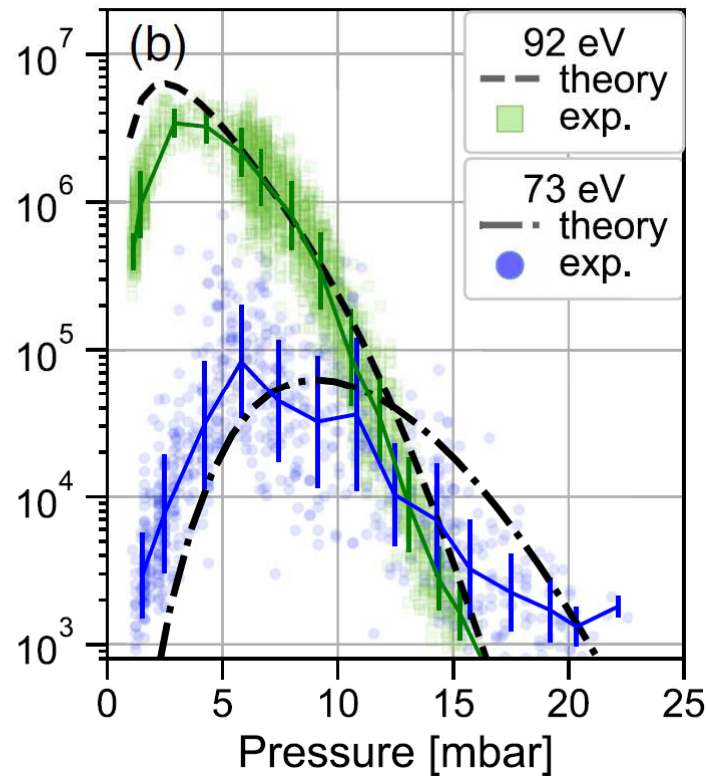
**quasi-instantane
Besetzungs-Inversion**
über 4d-Schalen Ionisation
in der „Riesen-Resonanz“
gefolgt von Auger-Zerfall

Energie- und Druckabhängigkeit der Fluoreszenz-Intensität

Puls-Energie-Abhängigkeit



Druck-Abhängigkeit



Zusammenfassung

- Beobachtung von **zwei Superfluoreszenz-Linien** in Xenon Gas (und Clustern): XUV Emission bei **68.14 nm** und **65.18 nm**
- In **Gas-Phase**: **exponentielle Zunahme** der Fluoreszenz um 10^4 von 10 bis 80 μJ FEL Puls-Intensität (Phys. Rev. Lett. vorne)
- In **Clustern**: **lineare Zunahme** der Fluoreszenzlinien-Intensität (Manuskript fast fertig)



Danke für Eure Aufmerksamkeit



**Nicht nur die Anlagen:
auch ein einzigartiges Team!**

