

FLASH

Physik und Technik - Stand und Perspektiven

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg

FLASH – DESYs Freier-Elektronen-Laser

Überblick

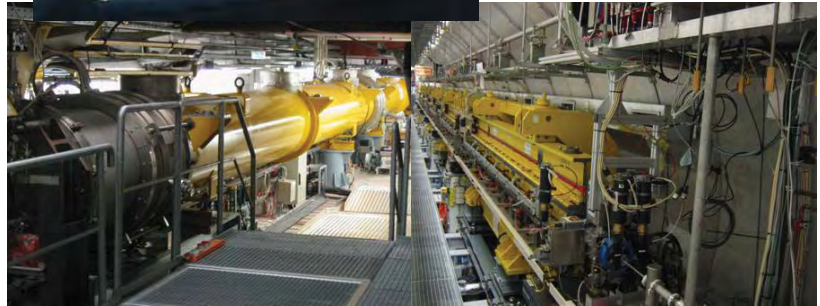
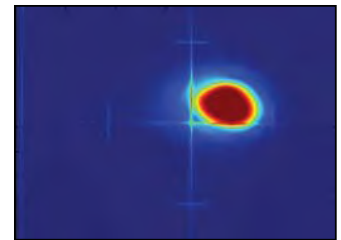
SASE

Komponenten

Ausbau

Siegfried Schreiber

Technisches Seminar
DESY/Zeuthen
19. Januar 2010



FLASH bei DESY in Hamburg

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg





FLASH

- > FLASH ist ein Freier-Elektronen-Laser
- > Supraleitende Beschleunigungstechnologie
- > Nutzerbetrieb seit Sommer 2005
- > Hohe Laserverstärkung nach dem SASE Prinzip
 - SASE = Selbst-Verstärkende Spontane Emission
- > FLASH ist bisher der einzige FEL im weichen Röntgenbereich
 - Jan 2005 – 32 nm
 - Apr 2006 – 13 nm
 - Okt 2007 – 6.5 nm
 - ab Mai 2010 < 5 nm
- > FLASH erzeugt extrem kurze femtosekunden Laserpulse mit hoher Brillanz
- > FLASH ist auch ein Testbett für den European XFEL und den ILC



Röntgenstrahlungsquellen

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg



Eine „Sternstunde der Deutschen“

Röntgenröhre



1895 Röntgenstrahlen entdeckt

Per Zufall entdeckt Wilhelm Conrad Röntgen bei einem Experiment Strahlen, die durch das menschliche Gewebe dringen, nicht aber durch die Knochen. Seine Entdeckung bringt Röntgen den Nobelpreis ein.

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



Röntgenstrahlungsquellen

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg



Röntgenröhre



Dreharbeiten im FLASH-Tunnel für
„Die Sternstunden der Deutschen“
sternstunden.zdf.de

Dunja Hayali
Die Sternstunden der
Deutschen (4) ZDF 12/2009

Röntgenröhre



Synchrotron-
Strahlungsquellen



ESRF Grenoble

Freie-Elektronen-
Laser

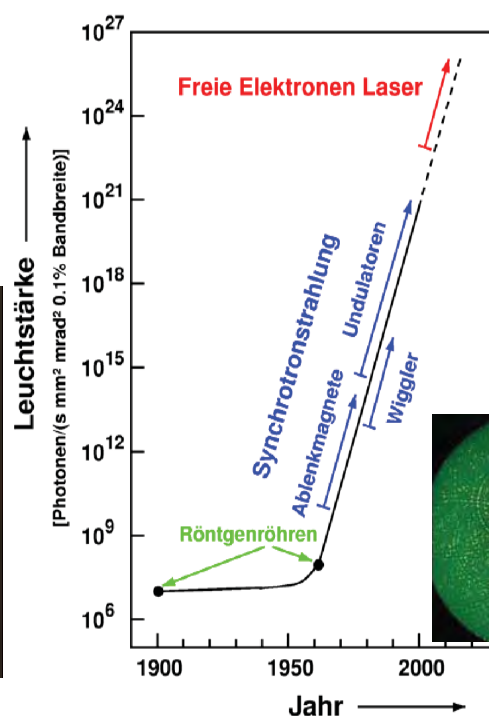


European XFEL

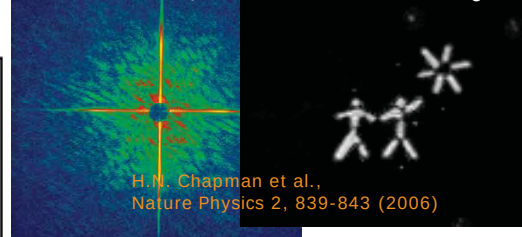


Brillanz oder Leuchtstärke

klassisches
Röntgen

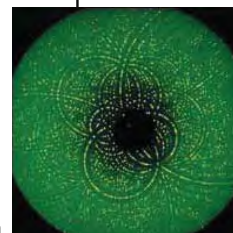


1st shot at full power Reconstructed Image



H.W. Chapman et al.,
Nature Physics 2, 839-843 (2006)

Informationen über
Dynamik auf
Femtosekunden-
Zeitskala



Kristallstruktur-
bestimmung mit
atomarer
Auflösung

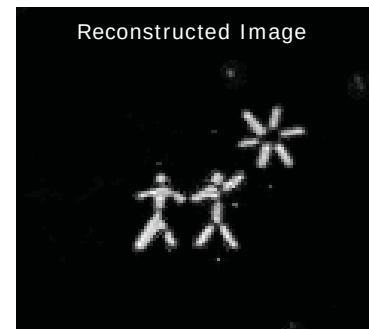
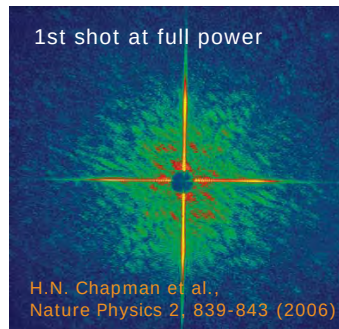


- > Im Unterschied zu ringbasierten Synchrotron-Strahlungsquellen wie PETRA III ist FLASH ein Ultrakurzpuls-Laser im weichen Röntgenbereich
- > voll kohärente Strahlung mit Pulslängen unter 50 fs
- > Wellenlängen von 5 bis 50 nm, einstellbar

Aufnahme mit einem einzigen fs-Laserpuls



Dauerstrich-Laser



Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010

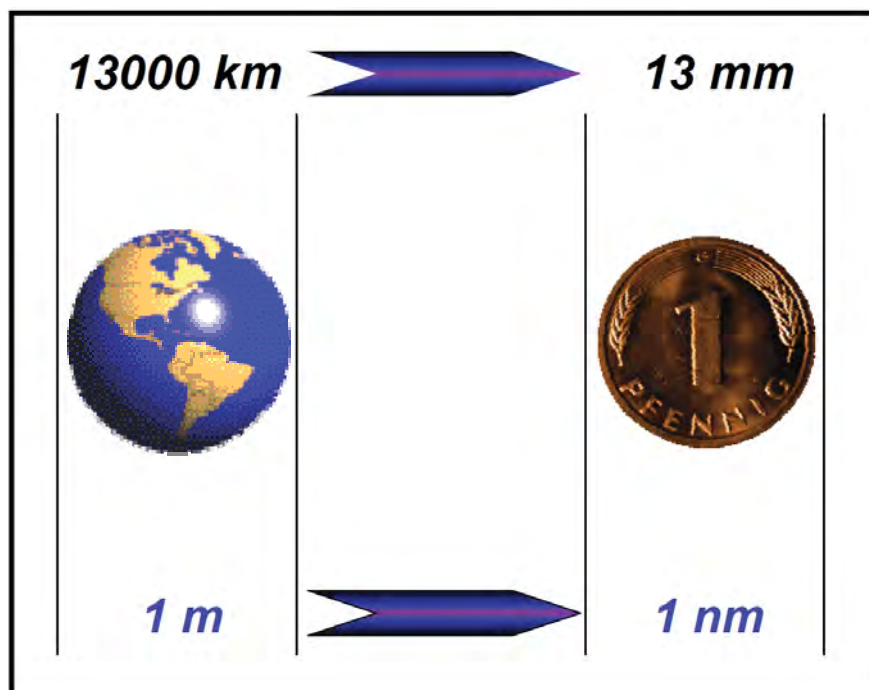


Wie kurz sind 100 fs?





100 fs (Femtosekunden)
entsprechen einer Distanz von
30 μm bei Lichtgeschwindigkeit
($\approx 300.000 \text{ km/s}$), d.h. der Breite
eines Haares !!



SASE

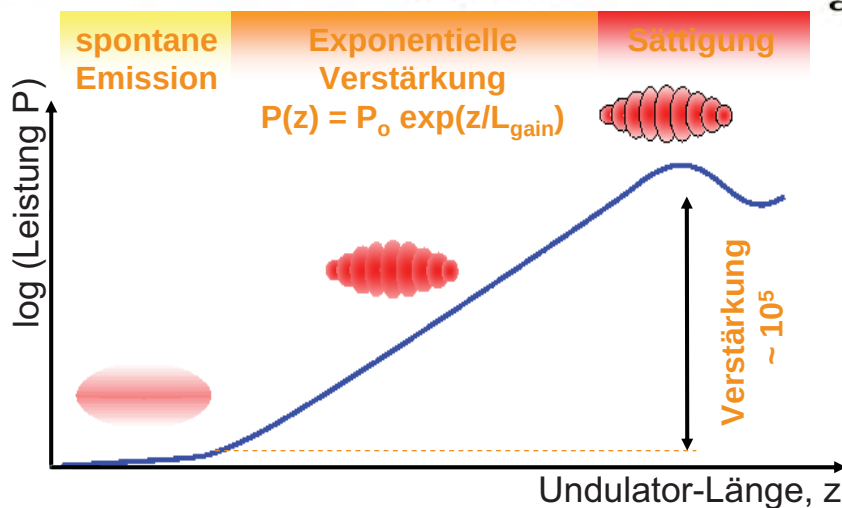
Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



Das SASE Prinzip

> Hohe Verstärkung in einem Durchgang durch den Undulator

- SASE: selbst-verstärkende spontane Emission von Photonen



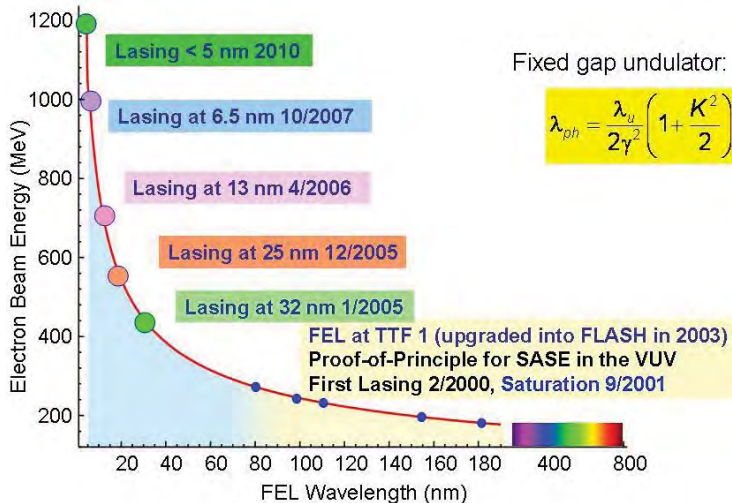
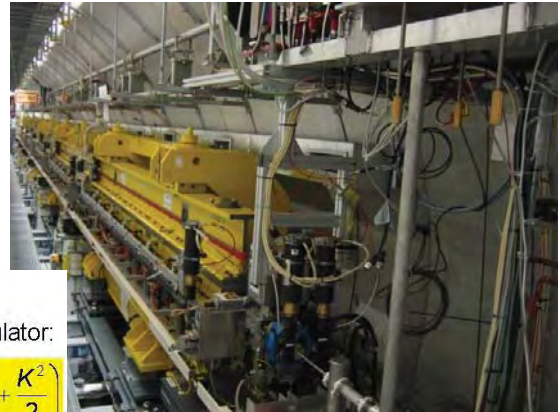
- > Elektronenbunche wechselwirken mit dem Undulatorfeld
- > Mikrostruktur entwickelt sich
- > kohärente Emission
- > $\sim N^2$ mit $N \sim 10^6$

Zeuthen | 19 Januar 2010



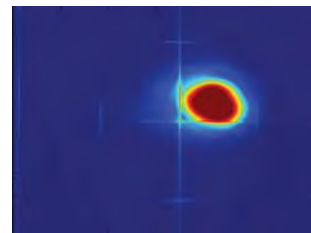
> FLASH hat 6 Undulatoren

- Gesamtlänge 27.3 m
- permanente NdFeB Magnete
- Fester Magnetabstand von 12 mm



Fixed gap undulator:

$$\lambda_{ph} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$



Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010

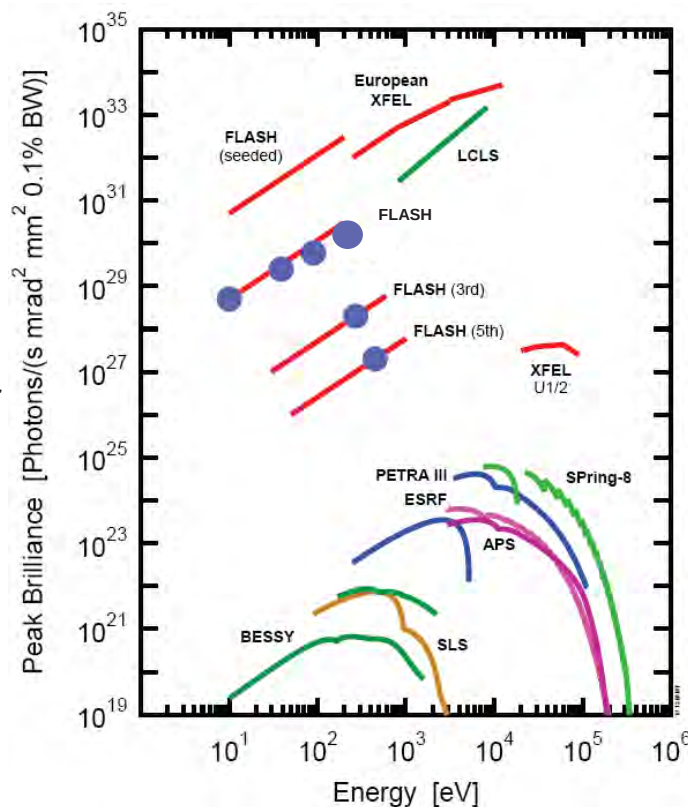


Spitzen-Leuchtstärke

Einheit:

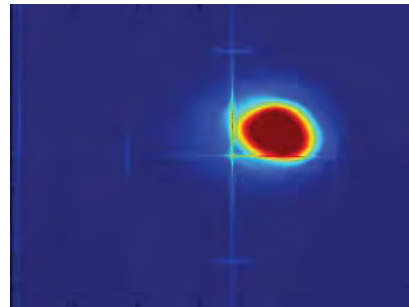
Zahl der Photonen
pro Zeit
pro Raumwinkel
pro Fläche
pro 0.1% Bandbreite der
Wellenlänge

photonen/s/mrad²/mm²/
0.1%bw



Normale Betriebsparameter

> Wellenlänge	7 - 47 nm
> Mittlere Einzelpulsenergie	10 - 50 μJ
> Pulslänge	10 - 50 fs
> Pulsleistung	1 - 5 GW
> Mittlere Leistung (500 Pulse/s)	$\sim 15 \text{ mW}$
> Spektrale Breite	$\sim 1 \%$
> Brillanz	$10^{29} - 10^{30} \text{ B}$

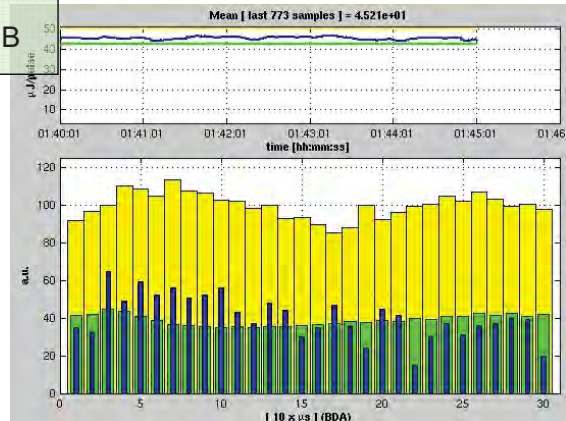


"Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window"
Nature photonics 1 (2007) 336

$B = \text{photons/s/mrad}^2/\text{mm}^2/0.1\% \text{bw}$

Multibunch
SASE signal (μJ)

- max
- single
- average



Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



Was braucht man um SASE im Röntgenbereich zu erzeugen?

1. einen sehr guten Elektronenstrahl
2. einen langen, präzise gebauten Undulator

Etwas genauer:

1. Die Verstärkung entsteht durch die Wechselwirkung des Elektronenstrahls mit dem elektromagnetischen Feld des Undulators
2. Damit das richtig funktioniert braucht man **über die gesamte Länge**:
 - einen Überlapp der Elektronen mit den erzeugten Photonen
 - eine hohe Anzahl von Elektronen in einem kleinen Raumgebiet
→ hoher Strom ($\sim \text{kA}$), kleine Emittanz ($\sim 1 \mu\text{m}$), richtigen Energie
3. Die Elektronenquelle muss einen Strahl mit hinreichend kleiner Emittanz erzeugen → **PITZ**
4. Der Strahl wird beschleunigt und komprimiert

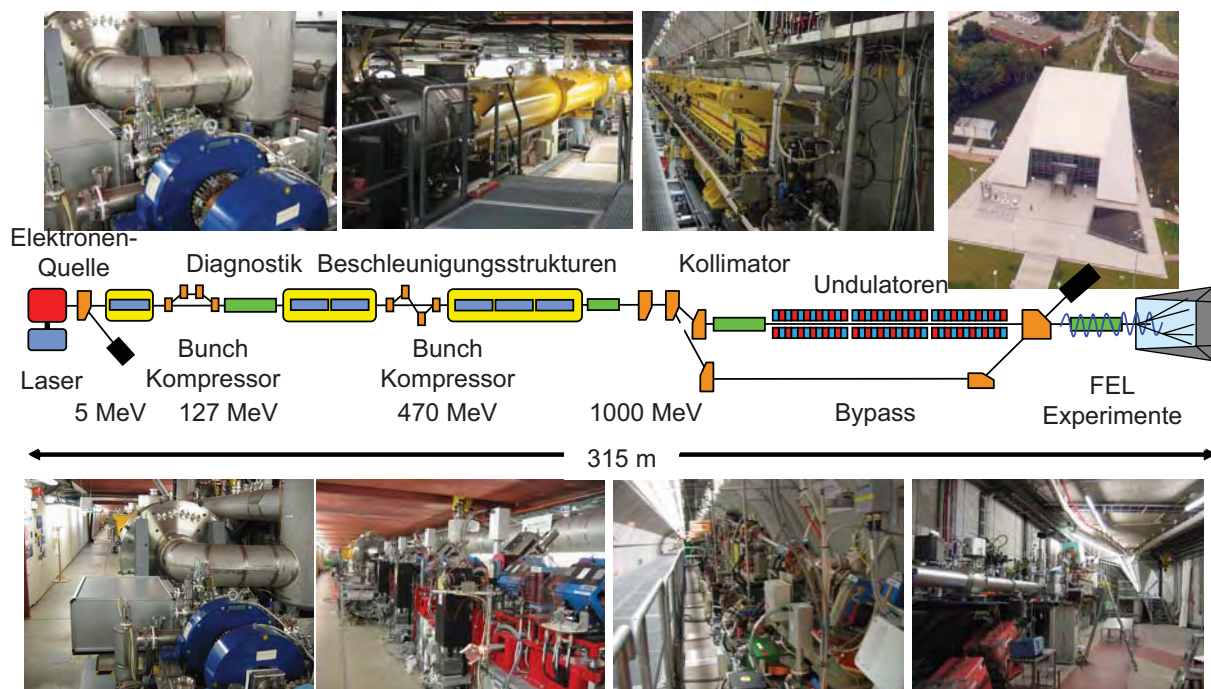


Komponenten

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



FLASH Übersicht – vor dem Ausbau



Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010

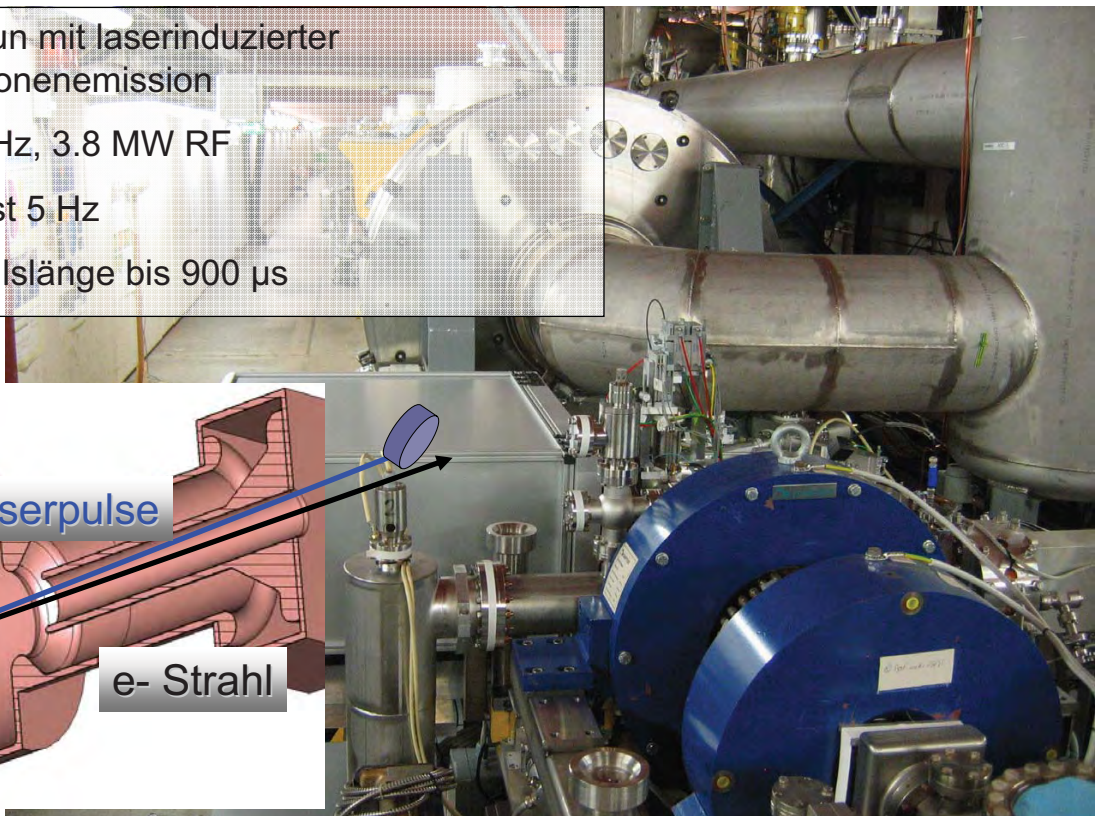
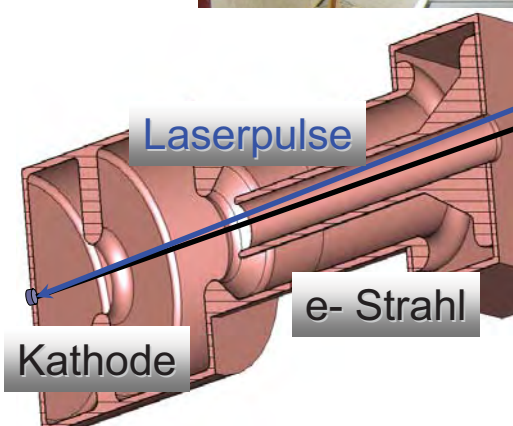


- > Jeder Schuss eine neue Herausforderung

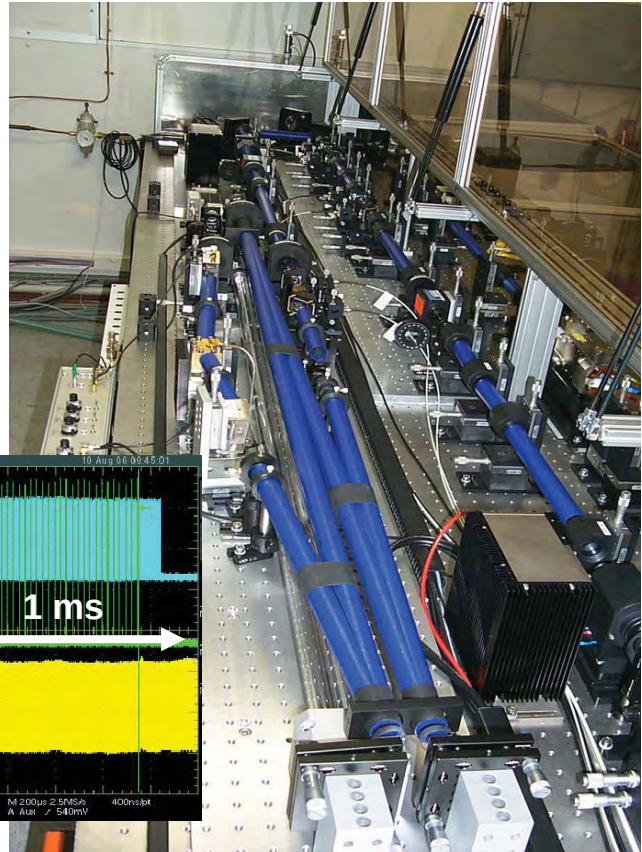
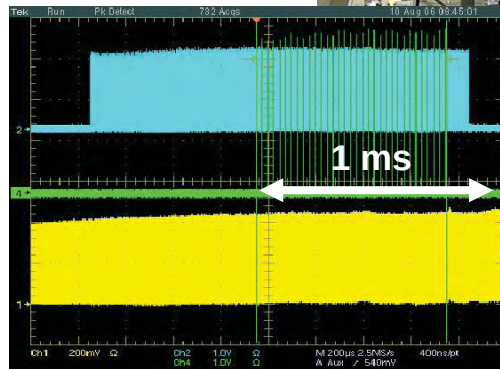


Elektronenquelle: Photoinjektor

- > RF-Gun mit laserinduzierter Elektronenemission
- > 1.3 GHz, 3.8 MW RF
- > gepulst 5 Hz
- > RF Pulslänge bis 900 μs

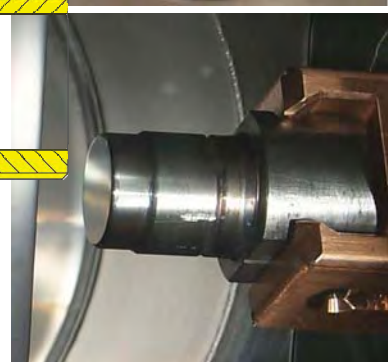
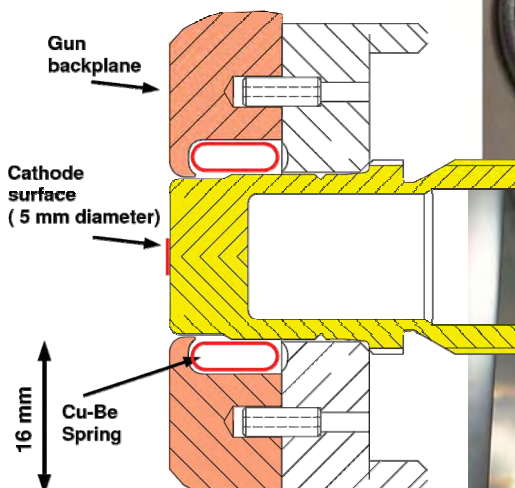


- > Lasermaterial Nd:YLF
 - Wellenlänge 1047 nm
 - Konversion → 262 nm
- > für lange Pulszüge
 - bis zu 800 μ s @ 10 Hz
- > Zahl und Abstand der Pulse einstellbar
 - 1 μ s oder 1 MHz, 100 kHz etc
- > moderate Energie der Einzelpulse: nur einige μ J
- > Zweites Lasersystem mit 3 MHz Option bei 5 Hz

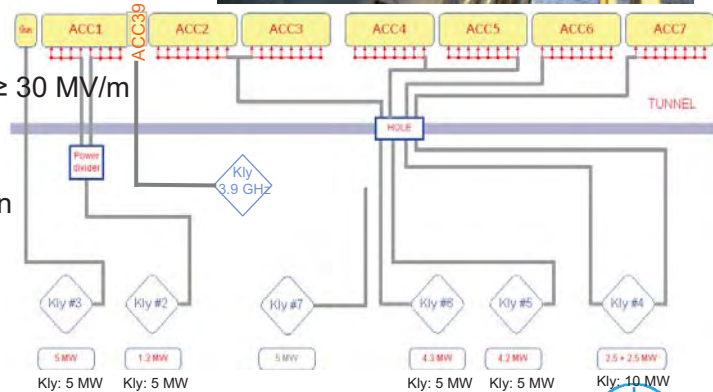


Cs₂Te Kathoden

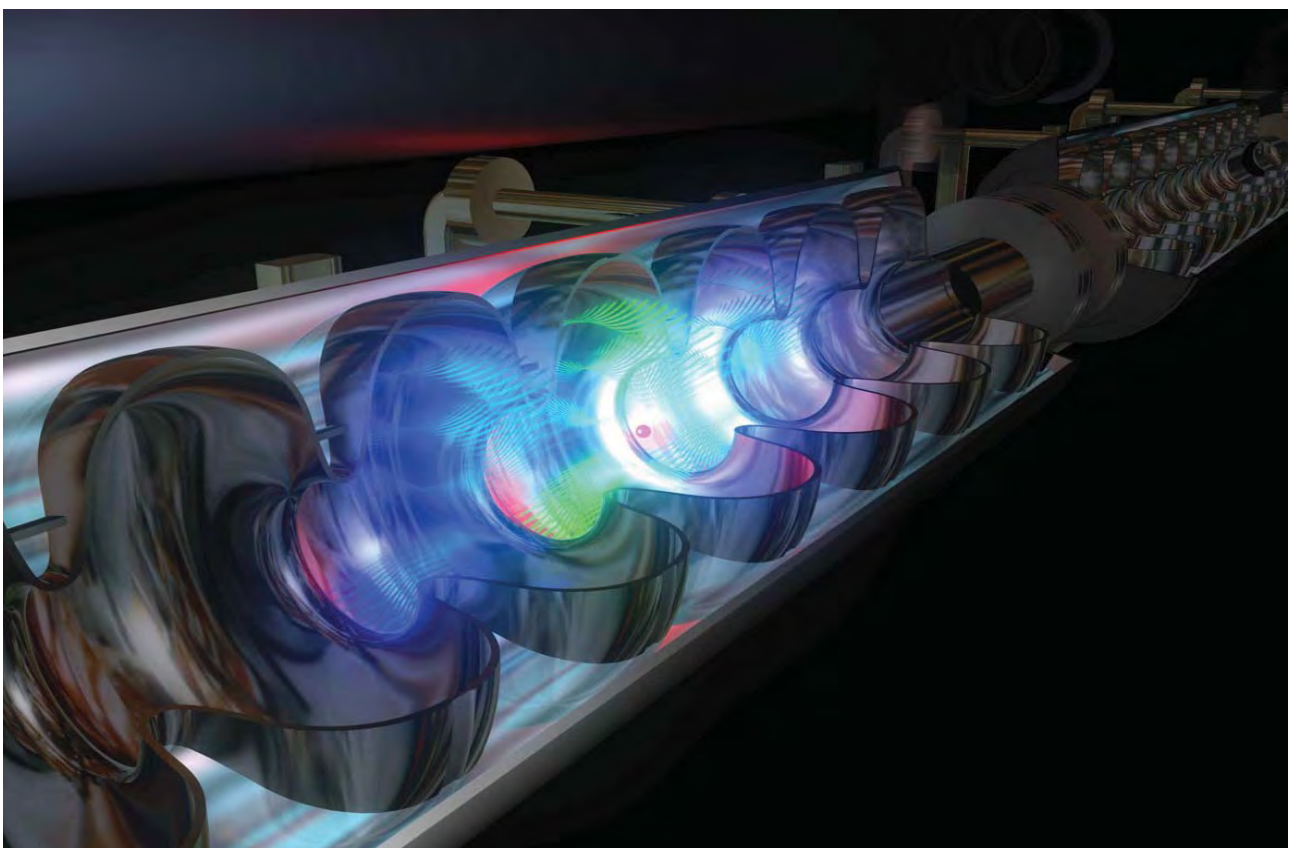
- > Hohe Quanteneffizienz (QE) bei hohen Stromstärken
- > Unsere Wahl: Cs₂Te
- > QE = Elektronen / Photonen
- > Typische Wert: QE = 5 %
- > Lebensdauer etwa 1 bis 2 Monate, manchmal auch länger
- > Je besser das Vakuum, desto länger die Lebensdauer
- > Austausch von Zeit zu Zeit nötig



- > 6 TESLA und 1 XFEL-Typ Beschleunigungsmodule
 - jedes mit acht 9-zell supraleitenden Niobium Cavities, HF-Frequenz 1.3 GHz
- > Energie bis 1.2 GeV
 - Alle neuen Module mit außerordentlich guter Leistung
 - ≥ 25 MV/m im Mittel
 - einige Cavities in Modul 6 und 7 ≥ 30 MV/m
- > 6 HF Stationen
 - 4 mit 5 MW, 1 mit 10 MW Klystron
 - 1 für 3.9 GHz

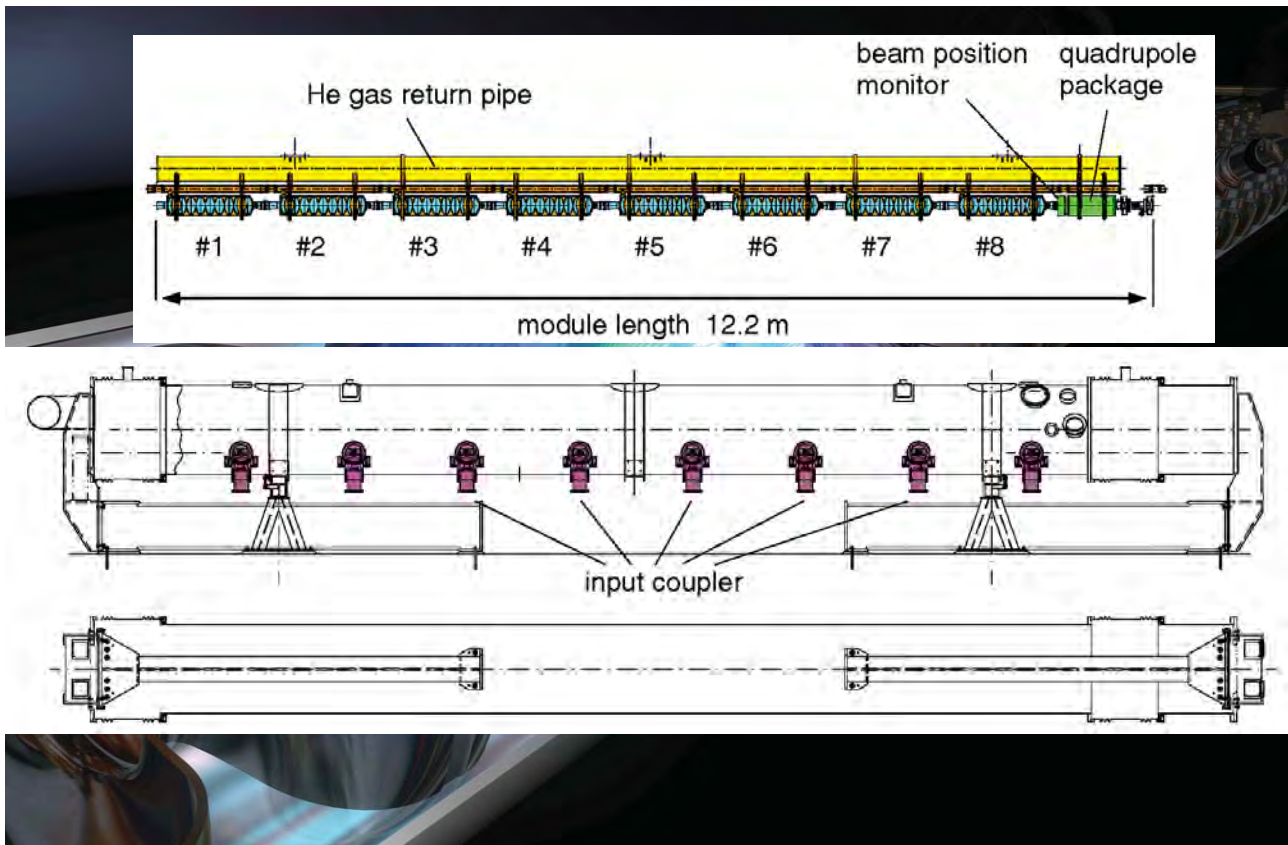


Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



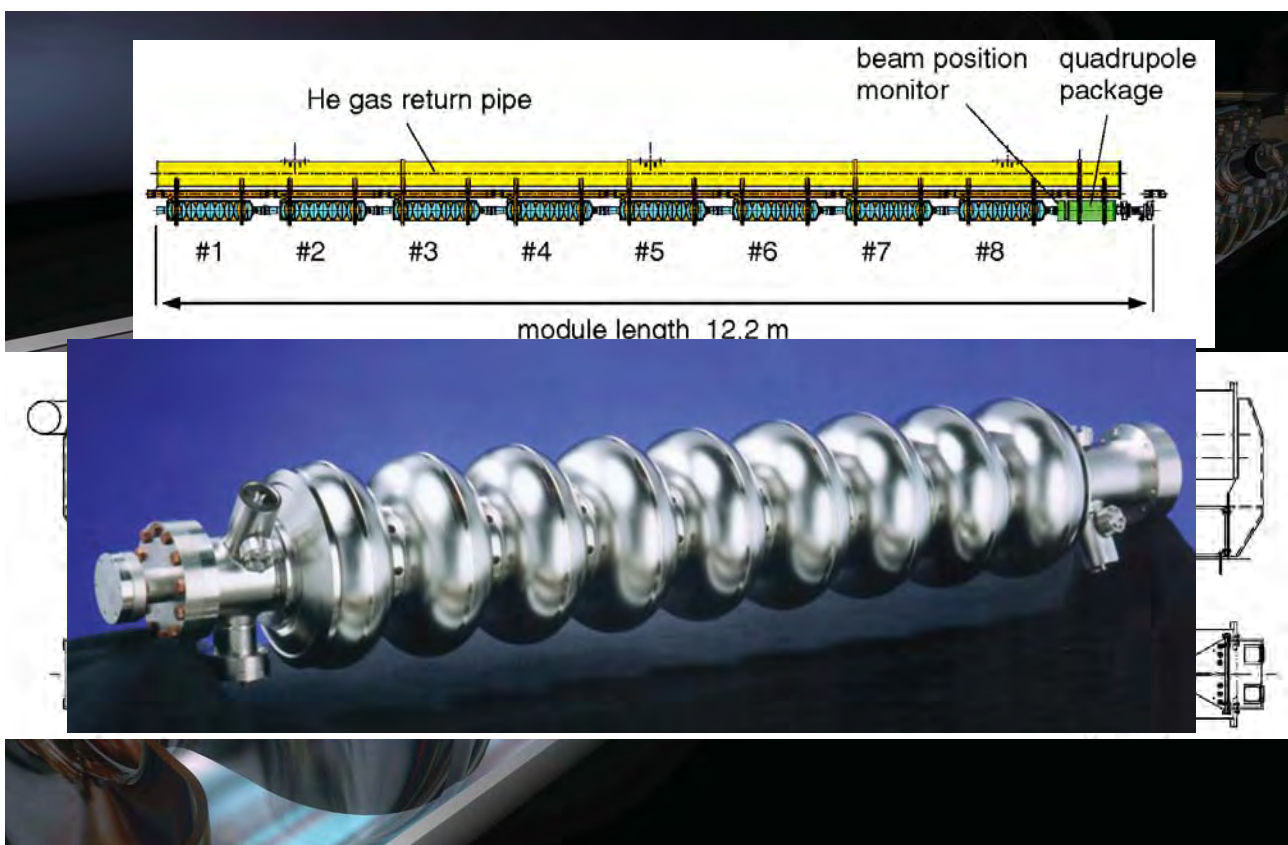
FLASH beschleunigt mit TESLA Technologie

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg



FLASH beschleunigt mit TESLA Technologie

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg



Installation Module 6

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg



Installation Module 6

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg



Installation Module 6

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg

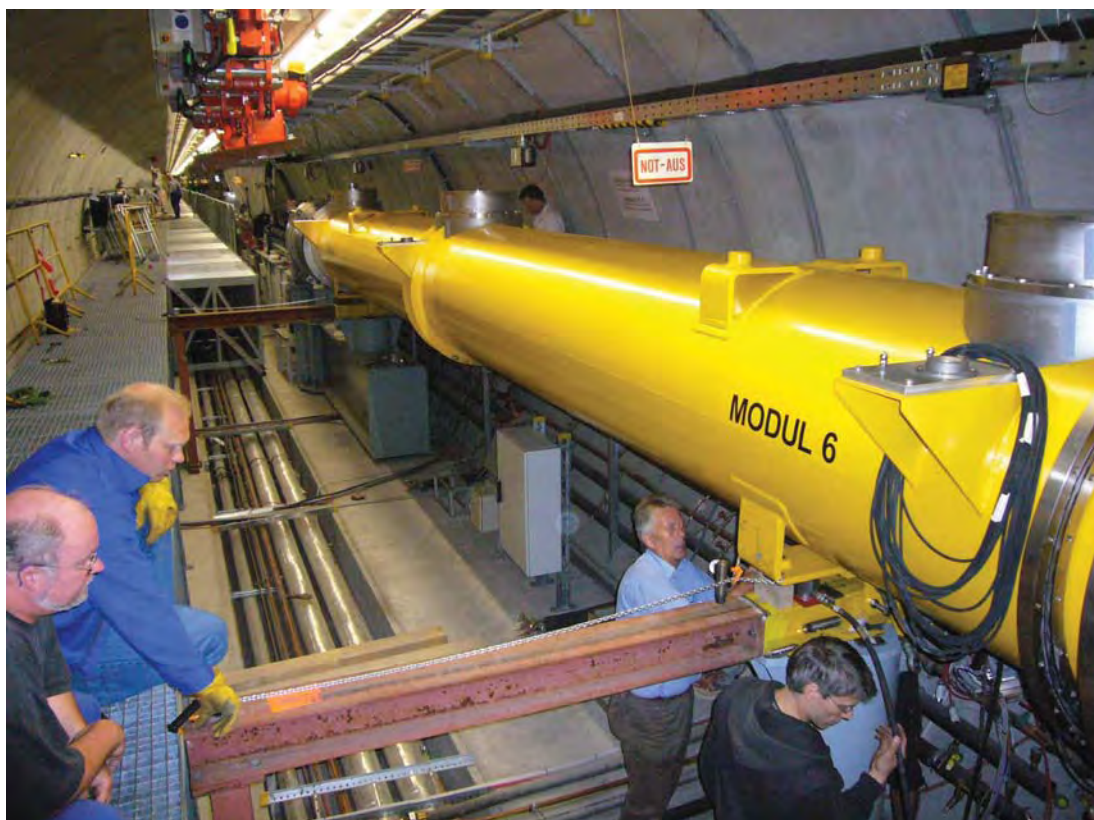


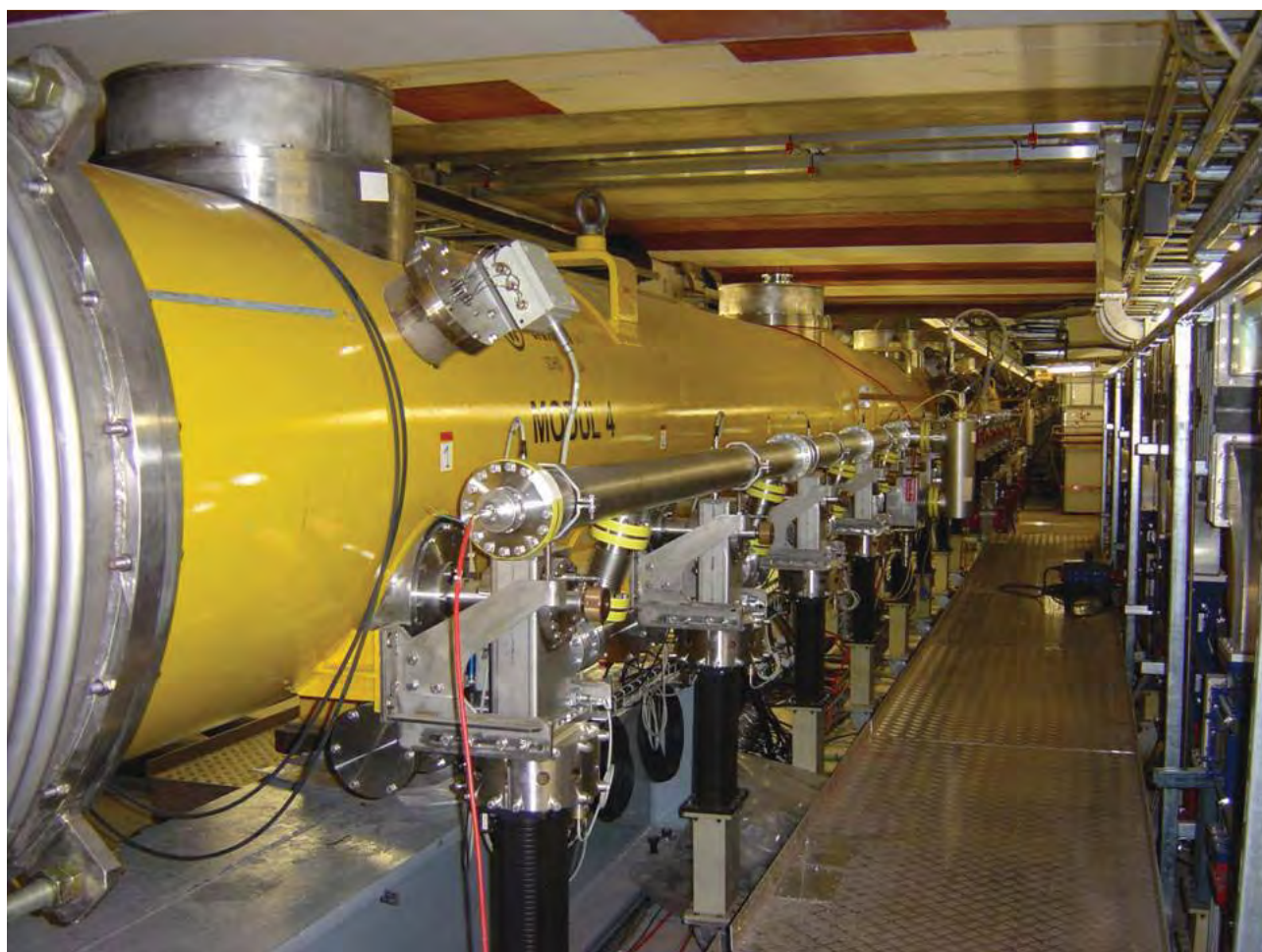
uar 2010

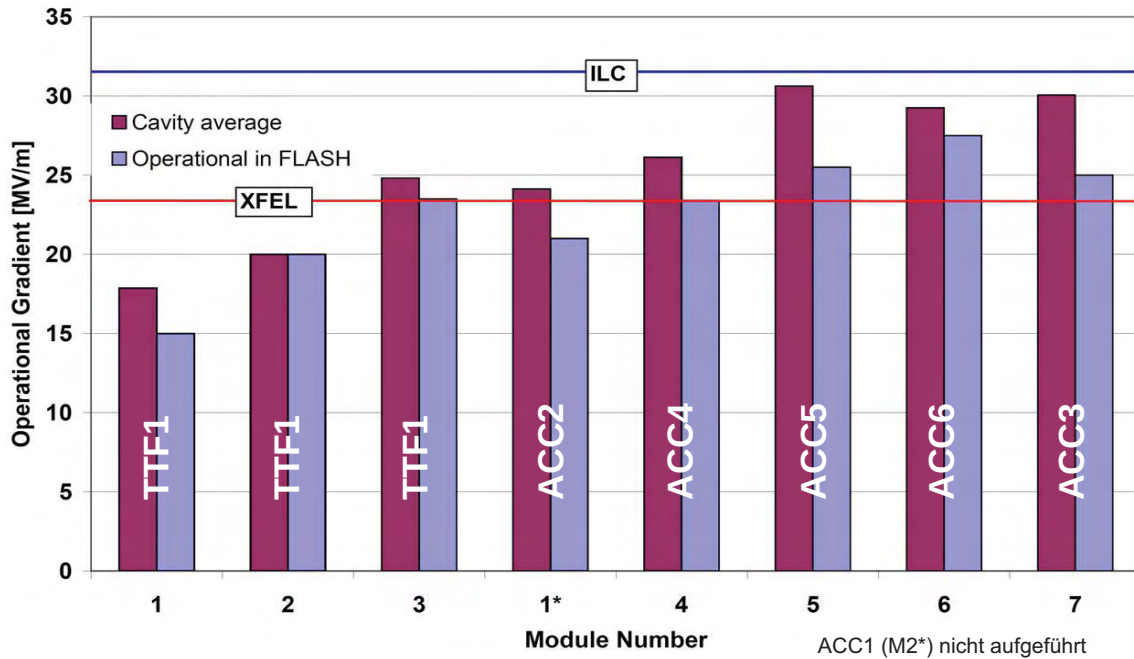


Installation Module 6

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg







Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



FLASH Designziel erreicht

**Elektronenstrahlenergie
1 GeV**

Lasen bei 6.5 nm

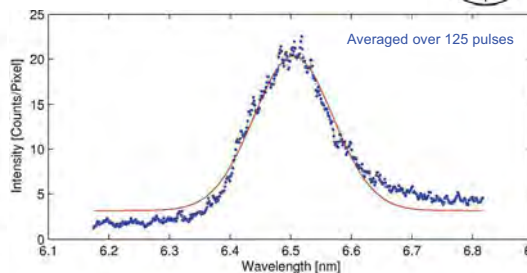


**DES Y
TELEGRAMM**
21. September 2007

Design-Strahlenergie für FLASH erreicht!
Elektronenstrahl mit 6 Modulen erstmals auf 1 GeV beschleunigt
FLASH Reaches Design Beam Energy!
Electron beam accelerated to 1 GeV with 6 modules for the first time

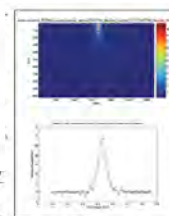


At usual, the breakthrough was achieved during a night shift, to be precise, on September 21 at 0:31 a.m. This time, the aim was to reach the planned maximum beam energy. "Goal: Operation to maximum energy – Achievement: 1 GeV! Spectrum of spontaneous emission measured: ~ 6.3 nm."



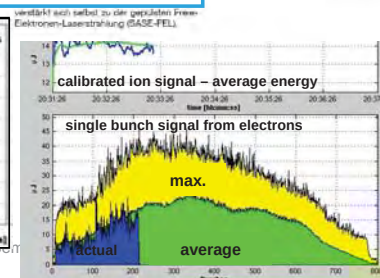
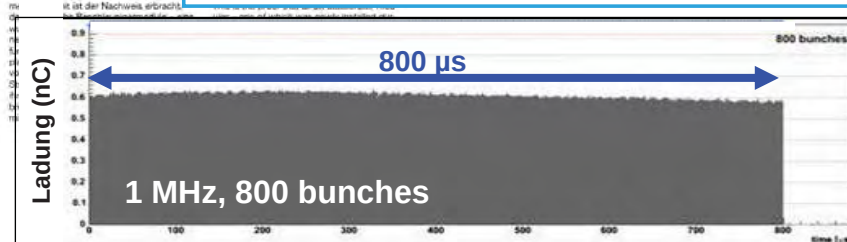
**DES Y
TELEGRAMM**
8. Oktober 2007

Weltrekord bei FLASH: 6.5 Nanometer!
Der Designwert für die Laserlänge erzielt
World Record at FLASH: 6.5 Nanometers!
Design value for laser flashes reached



On the evening of October 4, we observed laser at a wavelength of 7 nanometers, the first time. "On the evening of October 4, we observed laser at a wavelength of 7 nanometers, the first time."

Lasen mit einem Pulszug von 800 Bunchen @ 13.4 nm



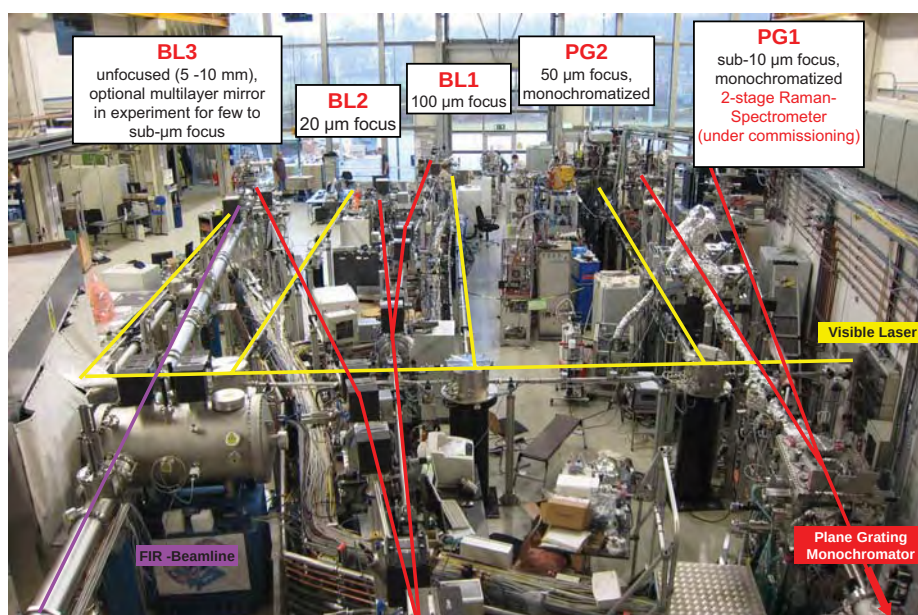
Nutzerbetrieb

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



FLASH Experimentier-Halle

> bis dato 68 Publikationen (plus ~10 eingereicht) in vielen wichtigen Zeitschriften

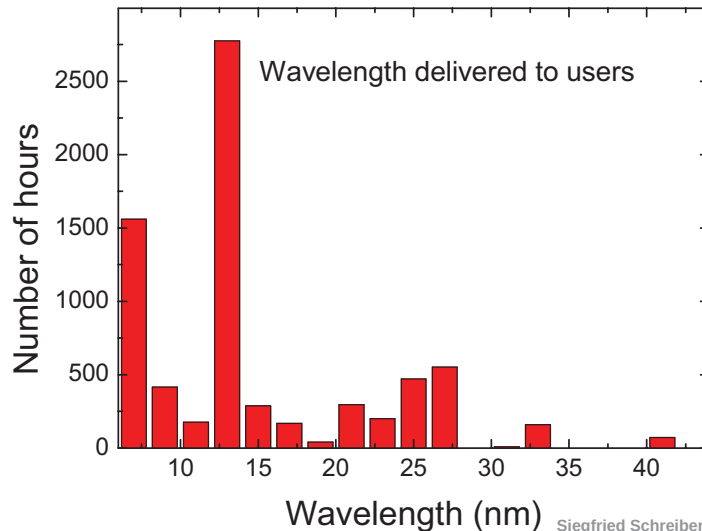


http://hasylab.desy.de/facilities/flash/publications/selected_publications/

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



- > Mehr als 140 Mal wurde die Wellenlänge umgestellt
- > Mehr als 30 verschiedene Wellenlängen zwischen 6.8 nm und 40.5 nm wurden eingestellt
- > Die Favoriten:
 - 7 nm – so klein wie möglich
 - 13.5 nm – viele Experimente haben Spiegel für diese Wellenlänge

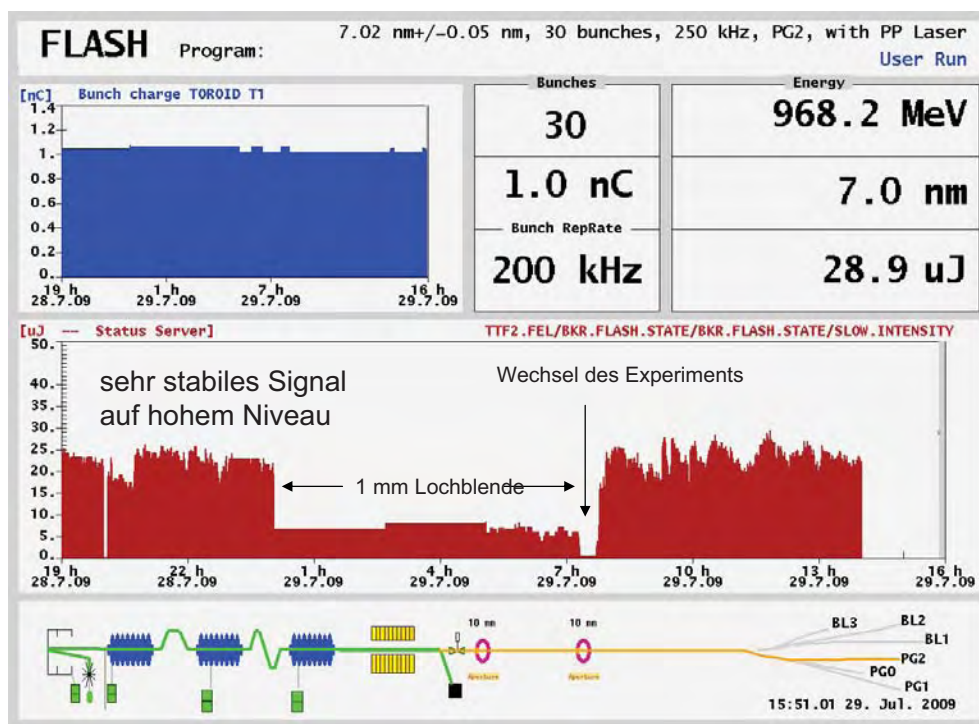


- > Einige Experimente nutzten auch die höheren Harmonischen
 - 3. Harmonische von 7 nm
 - 5. Harmonische von 8 nm
 - 3. Harmonische von 40.5 nm
- > Die kleinste Wellenlänge, die für ein Experiment genutzt wurde
 - 1.59 nm

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



3 Wochen mit 7 nm im Sommer 2009



Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



- > Transparent Aluminium (B. Nagler et al.)
- > FIR – XUV pump probe / “THz Streak Camera” (U. Fröhling et al.)
- > He₂ + autoionization (Moshhammer et al.)
- > Single shot diffraction imaging (H. Chapman, J. Hajdu et al.)
- > Coherent & magnetic scattering (DESY, BESSY, U HD, FH Remagen)
- > Pump-probe experiment on CO₂ alignment (AMOLF Amsterdam)
- > Femtosecond X-ray/Optical cross-correlator (FU Berlin, U HH, DESY)
- > Soft X-ray Autocorrelators (“Split & Delay Units”) (1. U Münster, BESSY & 2. U HH)

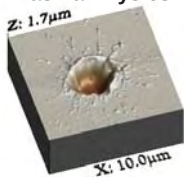


Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010

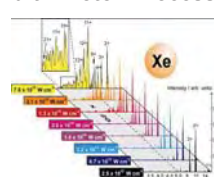


Experimente

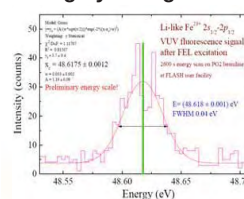
Plasma Physics



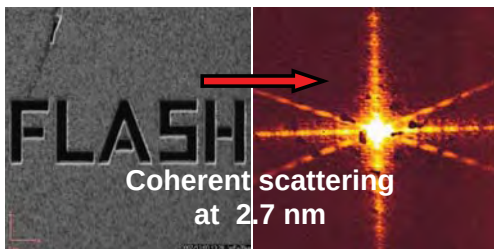
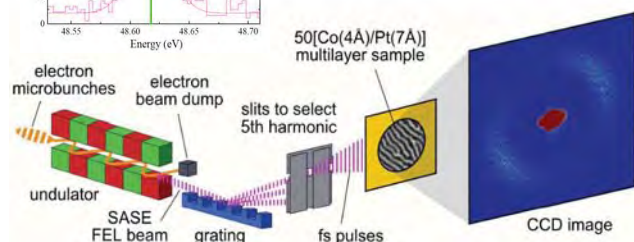
Multi-Photon Processes



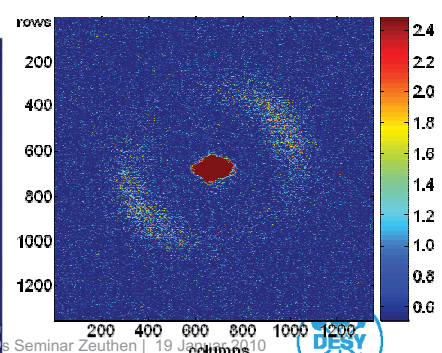
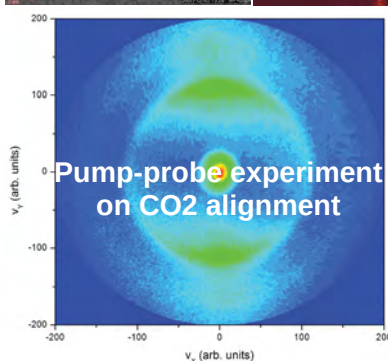
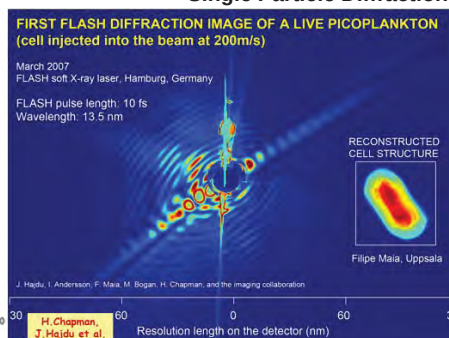
Spectroscopy on Highly Charged Ions



Resonant magnetic scattering with fs-pulses at 1.59 nm



Single Particle Diffraction



Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



Image Reconstructed from an Ultra-Fast (25 fs) FEL Diffraction Pattern at *FLASH*



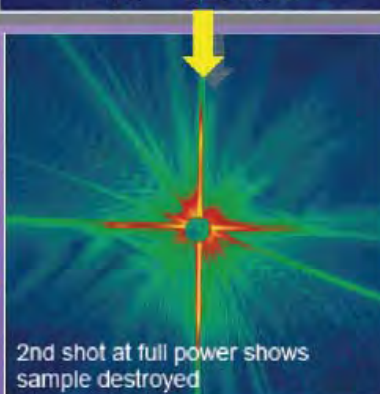
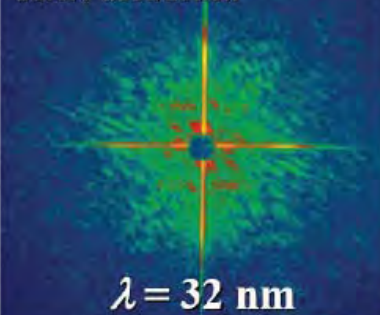
Starting Image
(etched into silicon nitride film)



H. Chapman, J. Hajdu

Reconstruction by
A. Barty, Feb. '06

1st shot diffraction pattern
before destruction



Reconstructed Image

The 20- μm -wide square film was destroyed by the laser pulse, but a computer algorithm reconstructed the original image from the diffraction pattern.

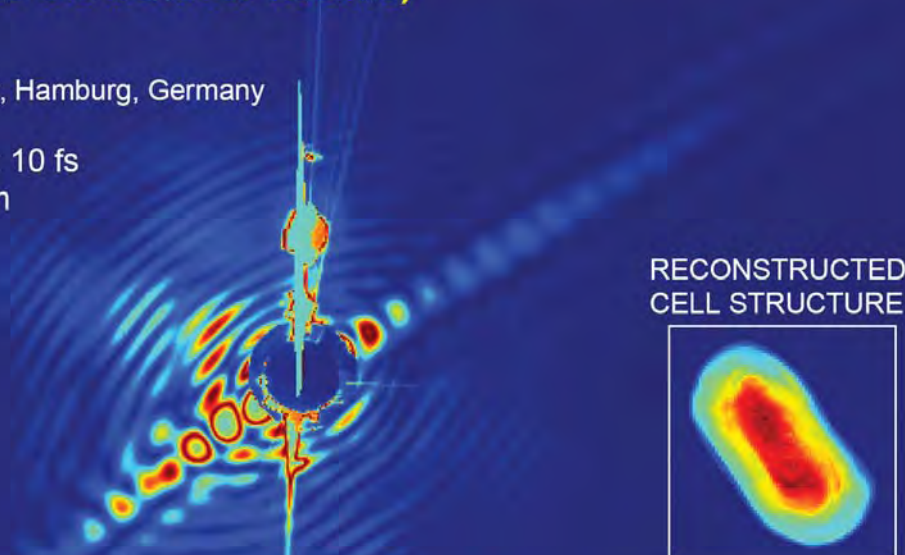
FIRST FLASH DIFFRACTION IMAGE OF A LIVE PICOPLANKTON (cell injected into the beam at 200m/s)

March 2007

FLASH soft X-ray laser, Hamburg, Germany

FLASH pulse length: 10 fs

Wavelength: 13.5 nm



Filipe Maia, Uppsala

J. Hajdu, I. Andersson, F. Maia, M. Bogan, H. Chapman, and the imaging collaboration

30

H. Chapman,
J. Hajdu et al.

60

Resolution length on the detector (nm)

0

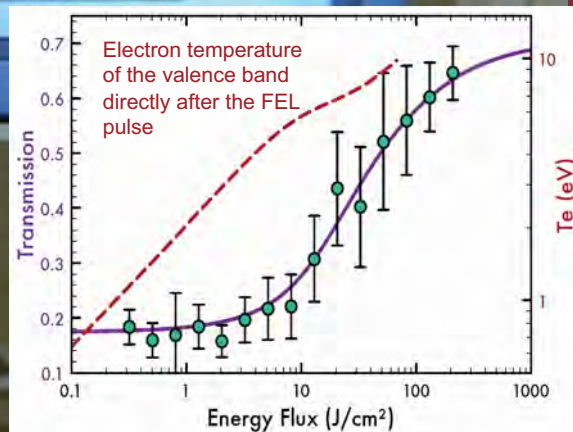
60

30

Transparentes Aluminium

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg

FLASH
erzeugt
transparentes
Aluminium



B. Nagler et al., Nature Physics 5, 693 (2009)

Transparentes Aluminium

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg

FLASH
erzeugt
transparentes
Aluminium

Google new state of matter Search Advanced Search

Web Show options... Results 1 - 10 of about 83,900,000 for new state of matter. (0.27 seconds)

Transparent Aluminum Is 'New State Of Matter'
27 Jul 2009 ... Scientists have created a transparent form of aluminum by bombarding the metal with the world's most powerful soft X-ray laser.
www.sciencedaily.com/releases/2009/07/090727130814.htm - [Cached](#) - [Similar](#)

Scientists Claim New State of Matter Created | LiveScience
28 Jul 2009 ... Scientists claim to have created a form of aluminum that's a new state of matter.
www.livescience.com/.../090728-new-state-matter.html - [Cached](#) - [Similar](#)

Transparent aluminium is 'new state of matter'
27 Jul 2009 ... (PhysOrg.com) -- Oxford scientists have created a transparent form of aluminum by bombarding the metal with the world's most powerful soft ...
www.physorg.com/news167925273.html - [Cached](#)

State of matter - Wikipedia, the free encyclopedia
2003-10-10, Science Daily: Metallic Phase For Bosons Implies New State Of Matter - 2004-01-15, ScienceDaily: Probable Discovery Of A New, Supersolid, ...
en.wikipedia.org/wiki/State_of_matter - [Cached](#) - [Similar](#)

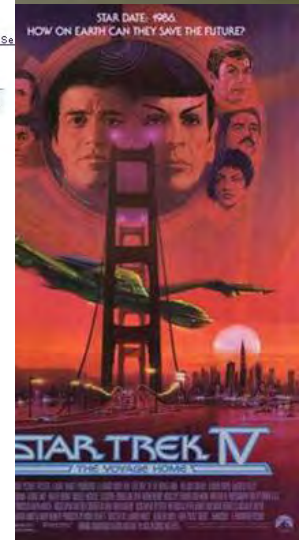
Slashdot Technology Story | Transparent Aluminum Is "New State of ...
28 Jul 2009 ... The new state of matter that is being boasted about is one where a non-valent ...
tech.slashdot.org/.../Transparent-Aluminum-Is-New-State-of-Matter?... - [Cached](#)

New states of matter
The study of new states of matter is of fundamental importance to physicists. We are all familiar with the three states of matter, solid, liquid and gas, ...
newton.ex.ac.uk/research/qsystems/usher/ - [Cached](#) - [Similar](#)

A New State of Matter
CERN, A New State Matter created at CERN Text only navigation: at bottom of the page.
Version française. For more information: Contact the ...
newstate-matter.web.cern.ch/ - [Cached](#) - [Similar](#)

Transparent aluminium is 'new state of matter' - University of Oxford
27 Jul 2009 ... 'What we have created is a completely new state of matter nobody has seen before,' said Professor Justin Wark of Oxford University's ...
www.ox.ac.uk/media/news_stories/2009/090727_2.html - [Cached](#) - [Similar](#)

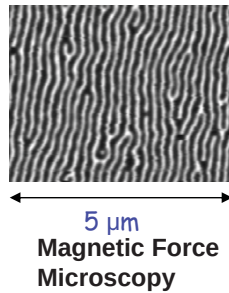
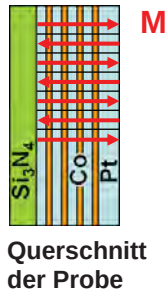
New State of Matter: Transparent Aluminum - Science News | Science ...
29 Jul 2009 ... New State of Matter: Transparent Aluminum, Scientists claim to have created



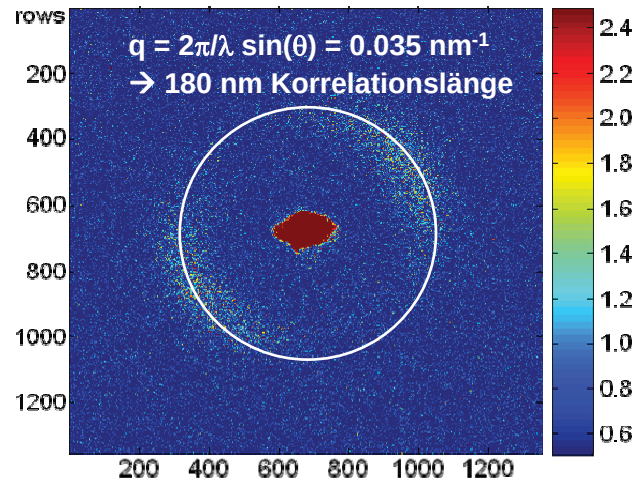
B. Nagler et al., Nature Physics 5, 693 (2009)

Proof-of-principle mit 1.59 nm Wellenlänge (Co L_3)

$E = 778.1 \text{ eV} \rightarrow$ in Resonanz



Co/Pt Multilagen bilden ein periodisches Muster von Domänen aus – mit magnetischen Momenten parallel und antiparallel zur Oberflächennormale



1000*100 Pulse mit 7000 Photonen/Pulse auf der Probe

- 1.) Einzelschuss-Experimente sind beim XFEL möglich sein
- 2.) etwa 4 Größenordnungen mehr Photonen wird bei FLASH mit der erhöhten Energie von 1.2 GeV und verbesserten Spiegeln möglich sein

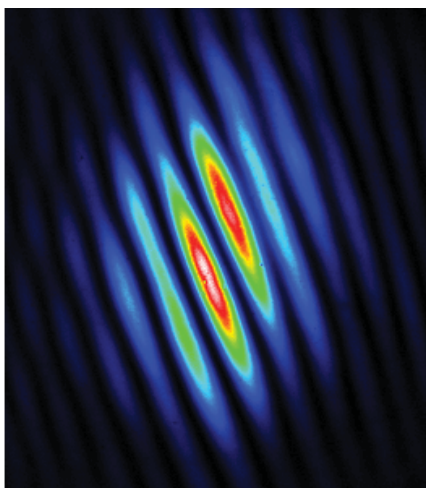
C.Gutt et al., PRB 79, 212406 (2009)

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010

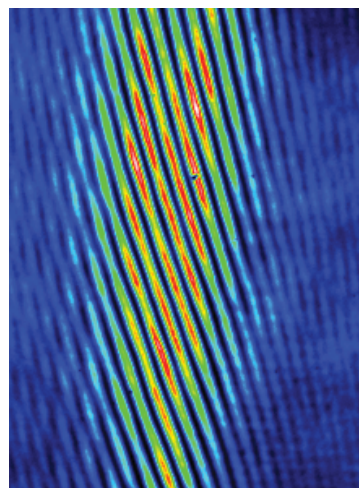


Die FLASH Laserstrahlung ist kohärent

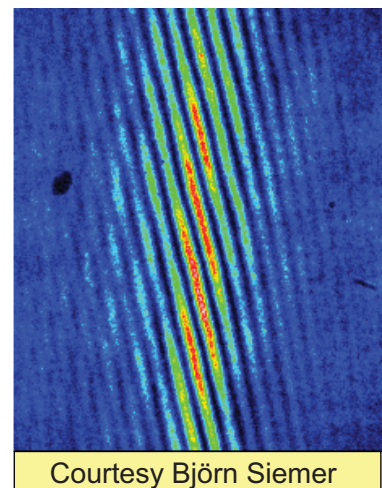
24 nm fundamental



8 nm fundamental



8 nm 3rd harmonic



Courtesy Björn Siemer

Kohärenzlänge bei 8 nm: ~10 fs (~7 fs für 3rd harm.)

Kohärenzlänge bei 24 nm: 5.1 fs rms

Pulslänge bei 24 nm: ~30 fs

U Münster (H. Zacharias), BESSY, DESY

R. Mitzner et al., Optics Express 16, 19909 (2008)

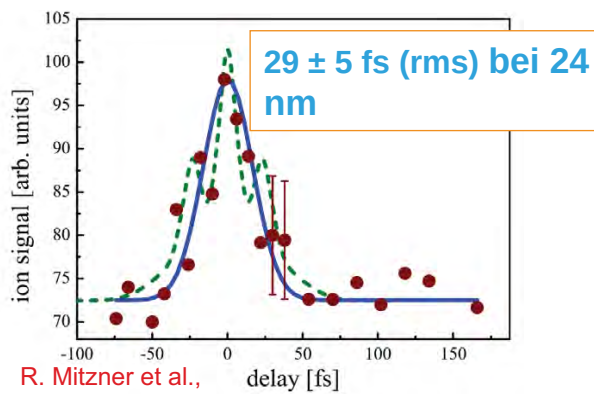
Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



Die FLASH Laserpulslängen sind unter 50 Femtosekunden

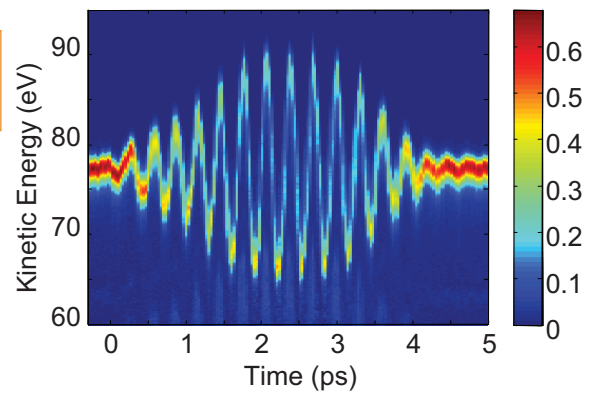
FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg

He²⁺ Autokorrelationsmessung



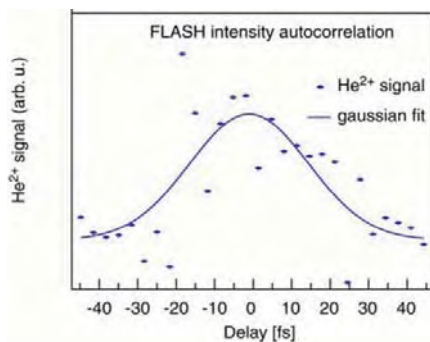
R. Mitzner et al.,
Physical Review A 80, 025402 (2009)

FIR/X Streak-Kamera



15 ± 3 fs (rms) bei 13.5 nm

U. Fröhling et al.,
Nature Photonics 3, 523-528 (2009)



Autokorrelator an PG2 (A. Föhlisch, W. Wurth)

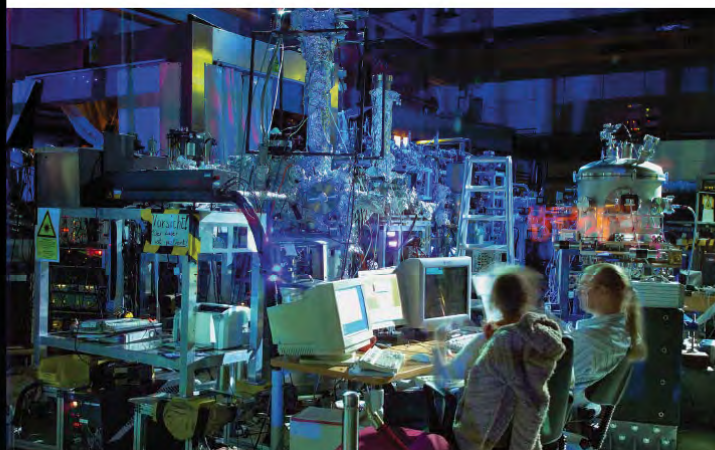
W. Schlöter et al., to be published

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



FLASH.

The Free-Electron Laser
in Hamburg



New technologies for new science. Soon X-ray free-electron lasers will enable us to probe ultrafast physical, chemical and biochemical processes at atomic resolution, opening new frontiers for science and technology. At long last we may see, and not just model, how molecular machines really work.

<http://flash.desy.de/>

Accelerators | Photon Science | Particle Physics
Deutsches Elektronen-Synchrotron
Member of the Helmholtz Association



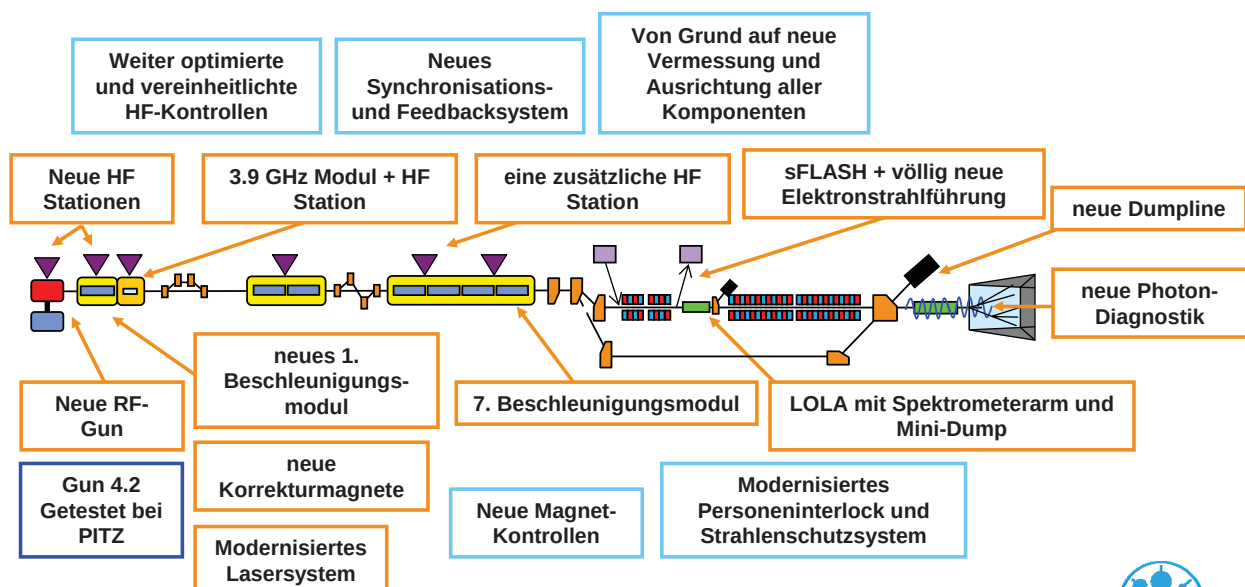
Ausbau

Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



Ausbau 2009/2010

- > 5 Monate dauernde Ausbaumaßnahme
- > Start war 21. Sept. 2009, Einfahren ab 15. Februar 2010
- > Erster Strahl wird Mitte April erwartet



Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



Injektor: Das neue Beschleunigungs-Modul und das 3.9 GHz Modul aus Fermilab sind installiert

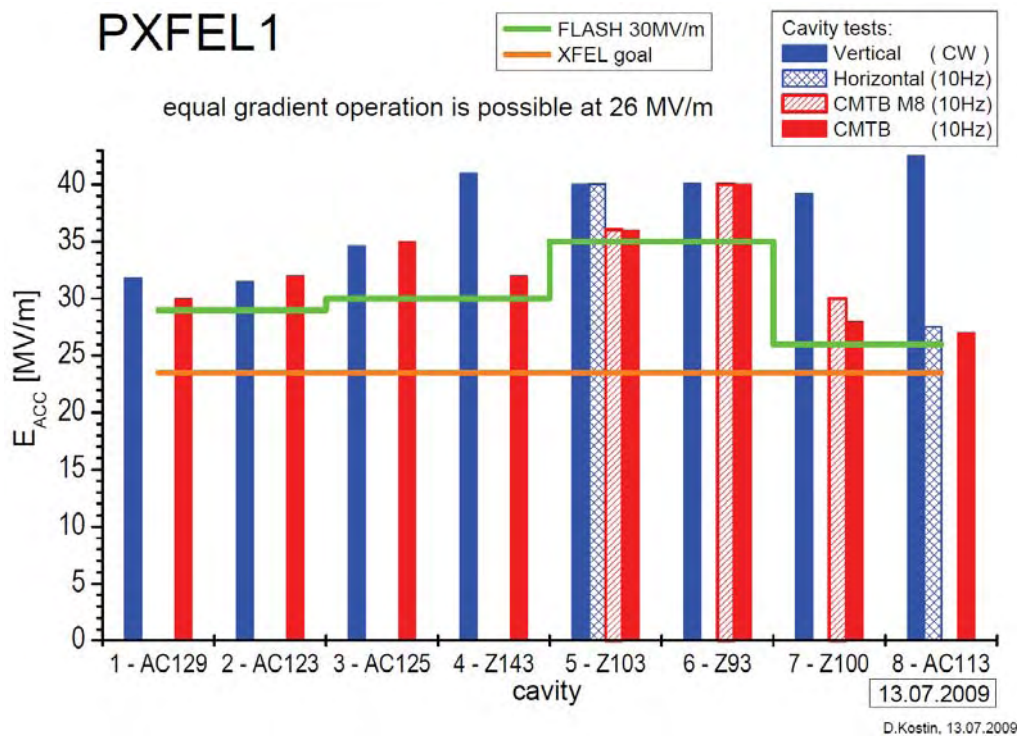


Das neue siebte Modul wird ausgerichtet

FLASH.
Free-Electron Laser
in Hamburg

- > Das neue Beschleunigungsmodul – eine XFEL Prototyp – verspricht einen Energiegewinn von deutlich mehr als 200 MeV
- > 1.0 GeV → 1.2 GeV



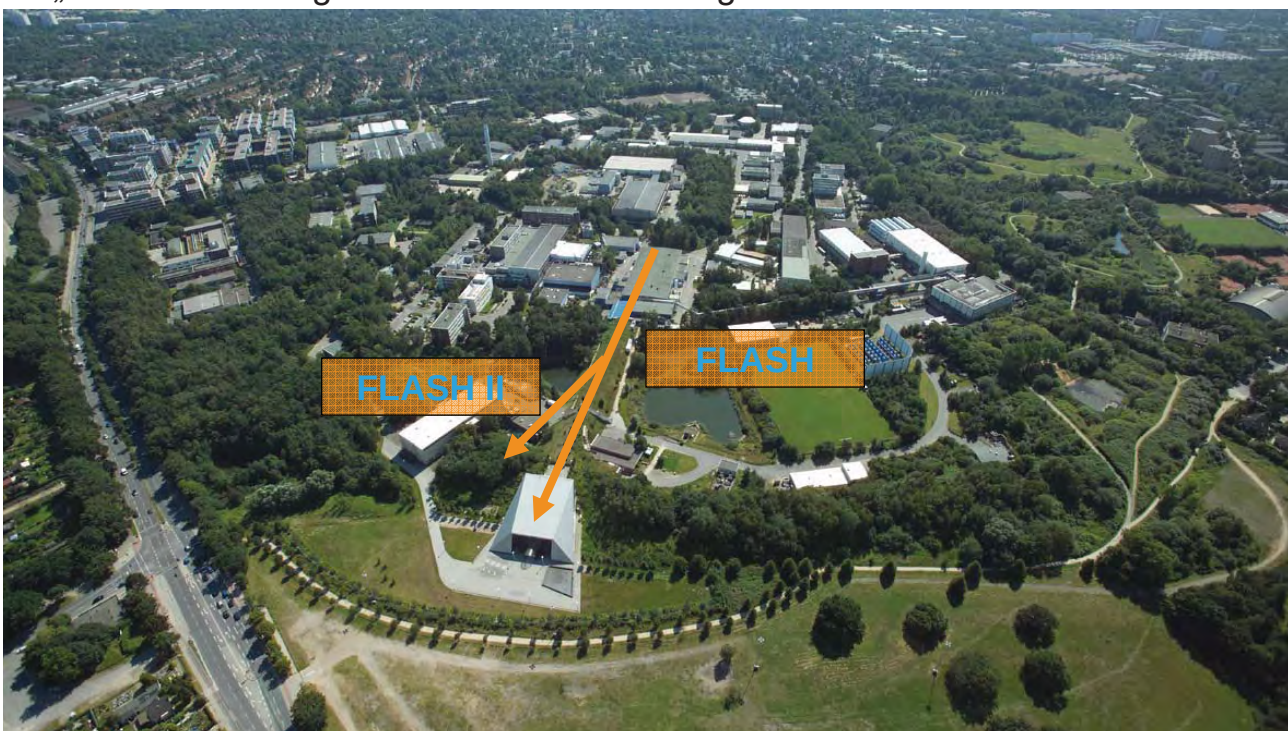


Siegfried Schreiber | Technisches Seminar Zeuthen | 19 Januar 2010



FLASH II – zweite Undulatorstrecke

- > Gemeinsamer Vorschlag DESY / HZB Berlin
- > „Kick-off“ Meeting 28-Jan-2010 in Hamburg



- > Im August 2009 endete die sehr erfolgreiche 2. Nutzerperiode
- > Strahlenergie bis 1 GeV mit Wellenlängen bis zu 6.9 nm
 - Höhere Harmonische bis 1.59 nm
- > 7600 Stunden Experimentierzeit
- > Wellenlängenfavorit: 7 nm und 13.5 nm
- > ~140 Mal ist die Wellenlänge geändert worden
- > 68 Publikationen (~10 weitere eingereicht) über Experimente bei FLASH
- > Der Ausbau wird FLASH weiter zuverlässiger machen und die Wellenlänge in die direkte Reichweite des Wasserfensters bringen
- > FLASH II Kick-off Meeting 28-Jan-2010