

# FLASH – 2. Nutzerperiode

**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg

FLASH Überblick

Komponenten

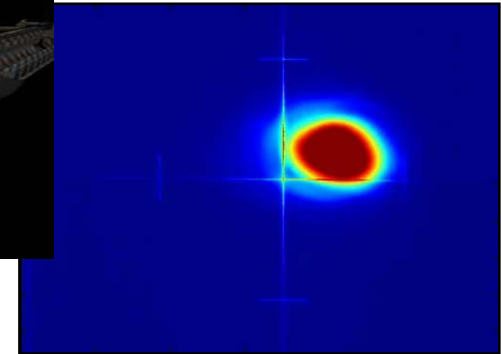
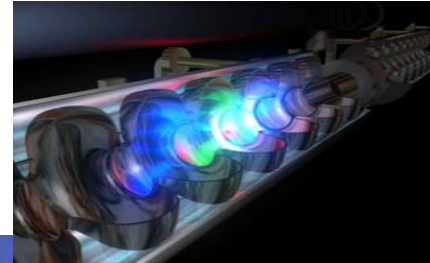
Nutzerbetrieb

Ausblick

Siegfried Schreiber

Beschleuniger-  
Betriebsseminar  
Grömitz

21. – 25. März 2010



# FLASH mit PETRA und XFEL

**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg



- > 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 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



Eine „Sternstunde der Deutschen“



## Röntgenröhre



# Röntgenstrahlungsquellen

**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg



**Dreharbeiten im FLASH-Tunnel für  
„Die Sternstunden der Deutschen“**  
[sternstunden.zdf.de](http://sternstunden.zdf.de)

Röntgenröhre



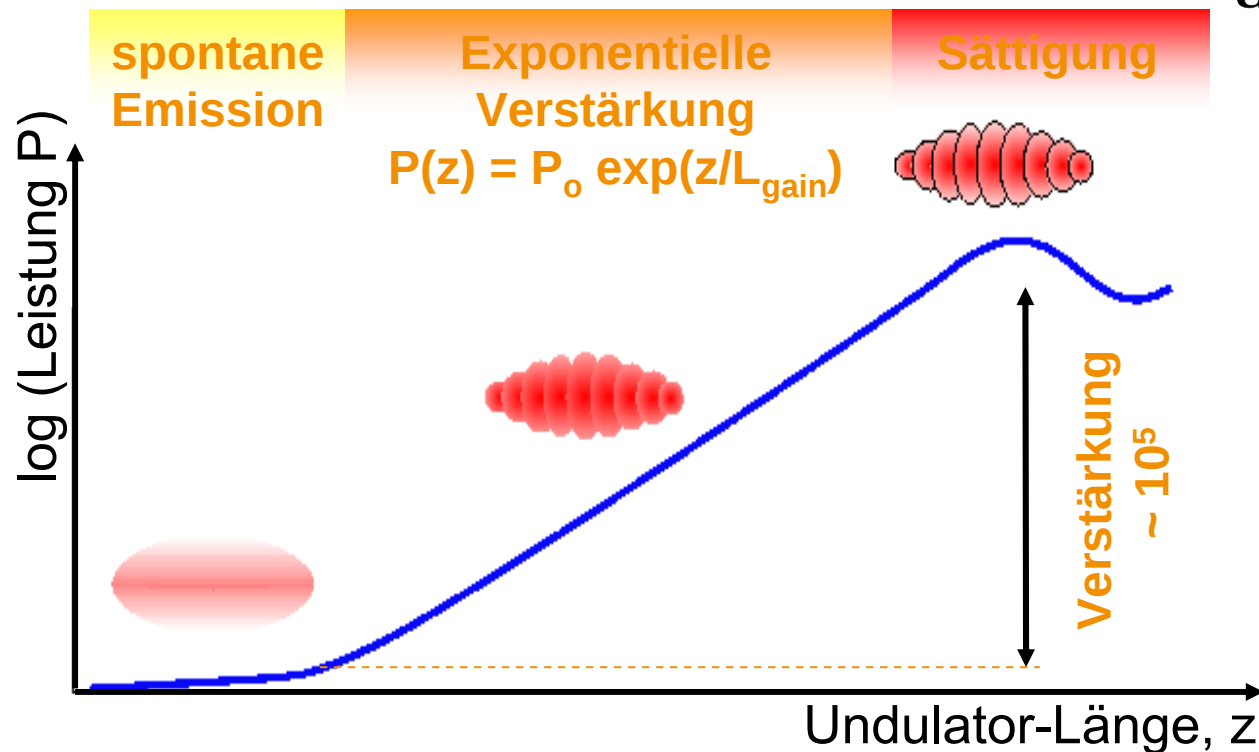
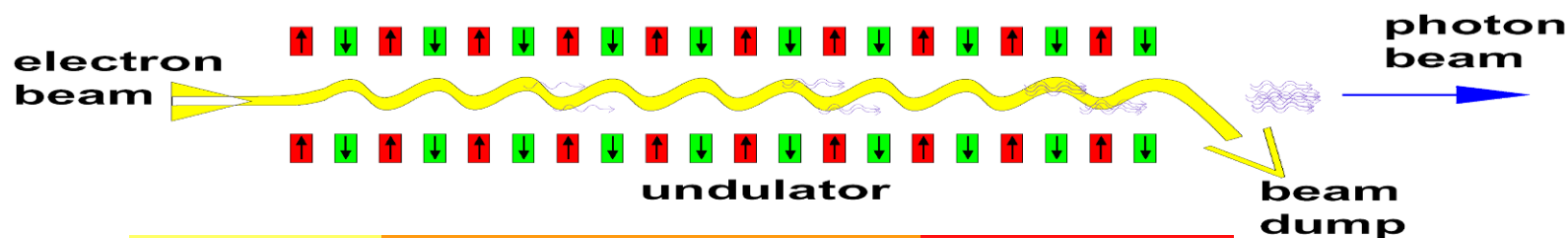
Dunja Hayali

Die Sternstunden der  
Deutschen (4) ZDF 12/2009

# SASE

## > Hohe Verstärkung in einem Durchgang durch den Undulator

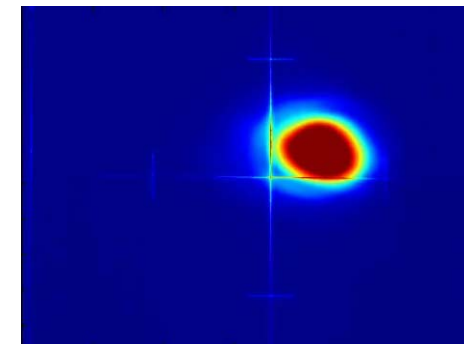
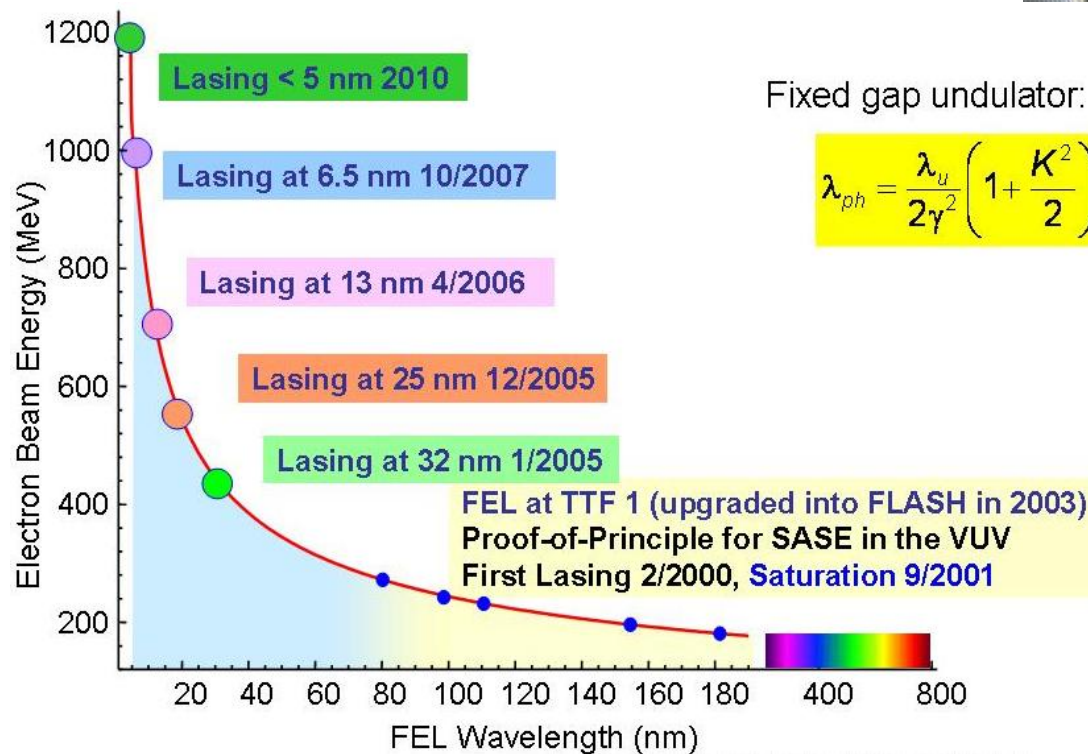
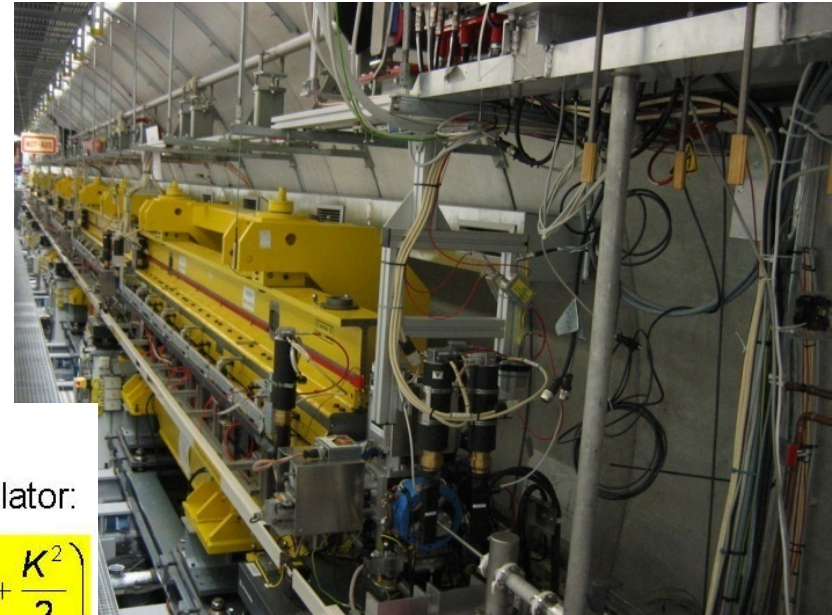
- SASE: selbst-verstärkende spontane Emission von Photonen



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

## > FLASH hat 6 Undulatoren

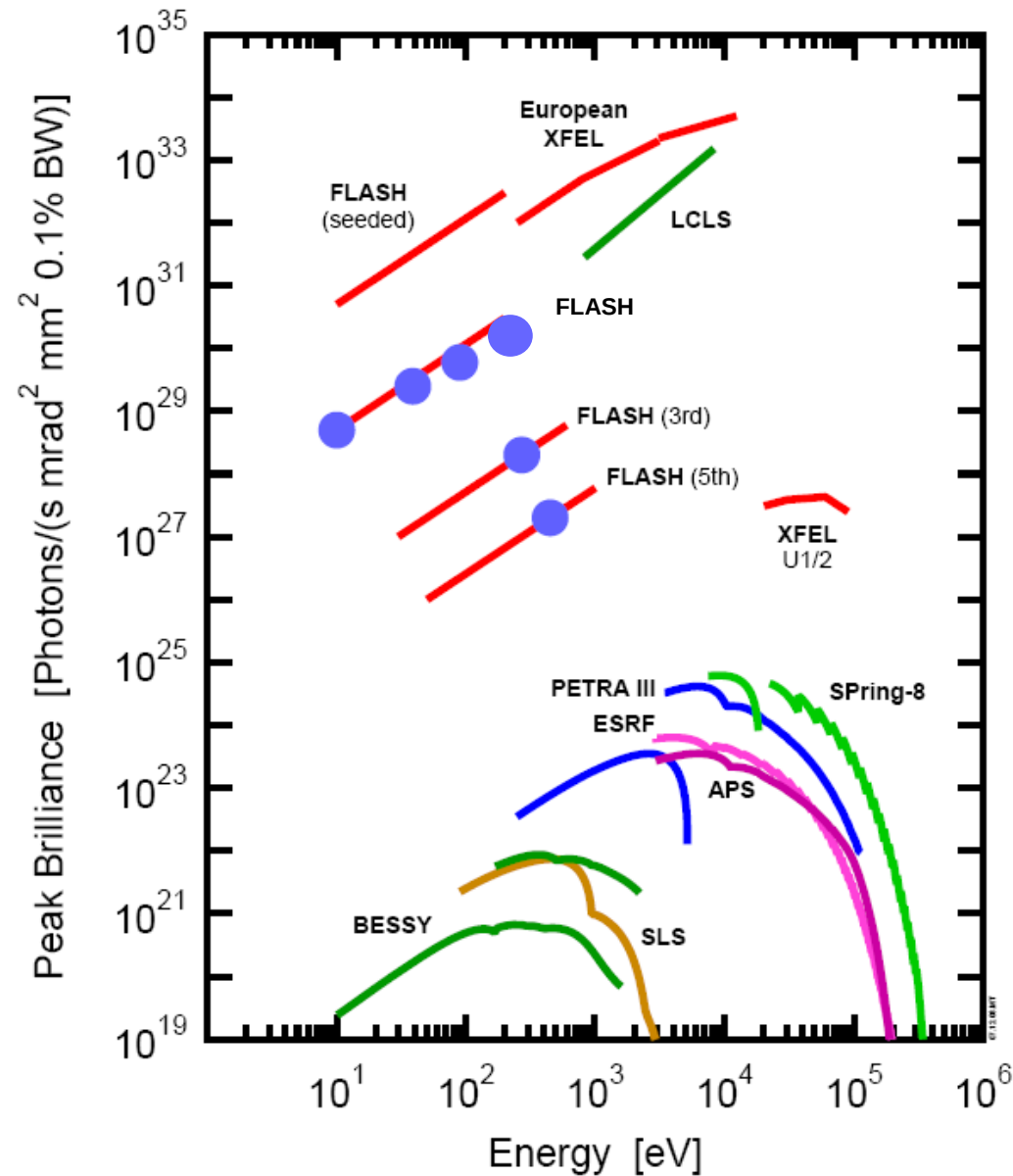
- Gesamtlänge 27.3 m
- permanente NdFeB Magnete
- Fester Magnetabstand von 12 mm



Einheit:

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

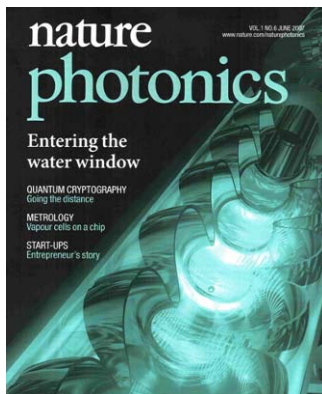
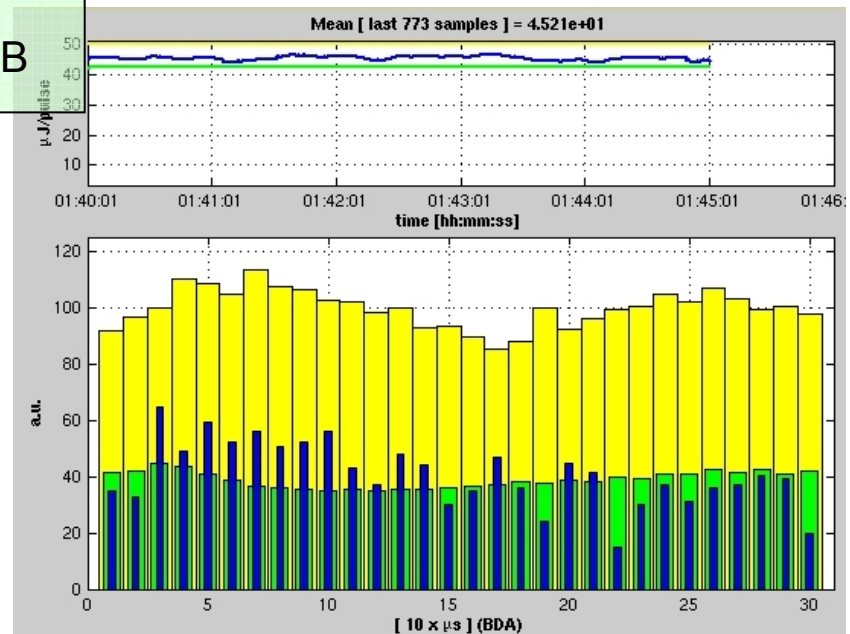
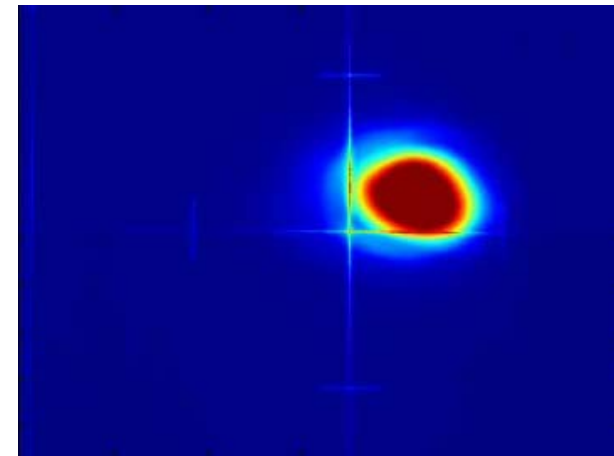
photonen/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/  
0.1%bw



# SASE Parameter

## Normale Betriebsparameter

- > Wellenlänge 7 - 47 nm
- > Mittlere Einzelpulsenergie 10 - 50  $\mu\text{J}$
- > 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

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

# Was braucht man um SASE im Röntgenbereich zu erzeugen?

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

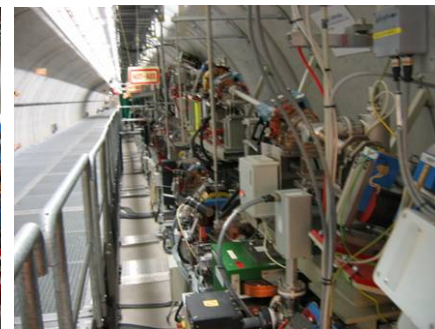
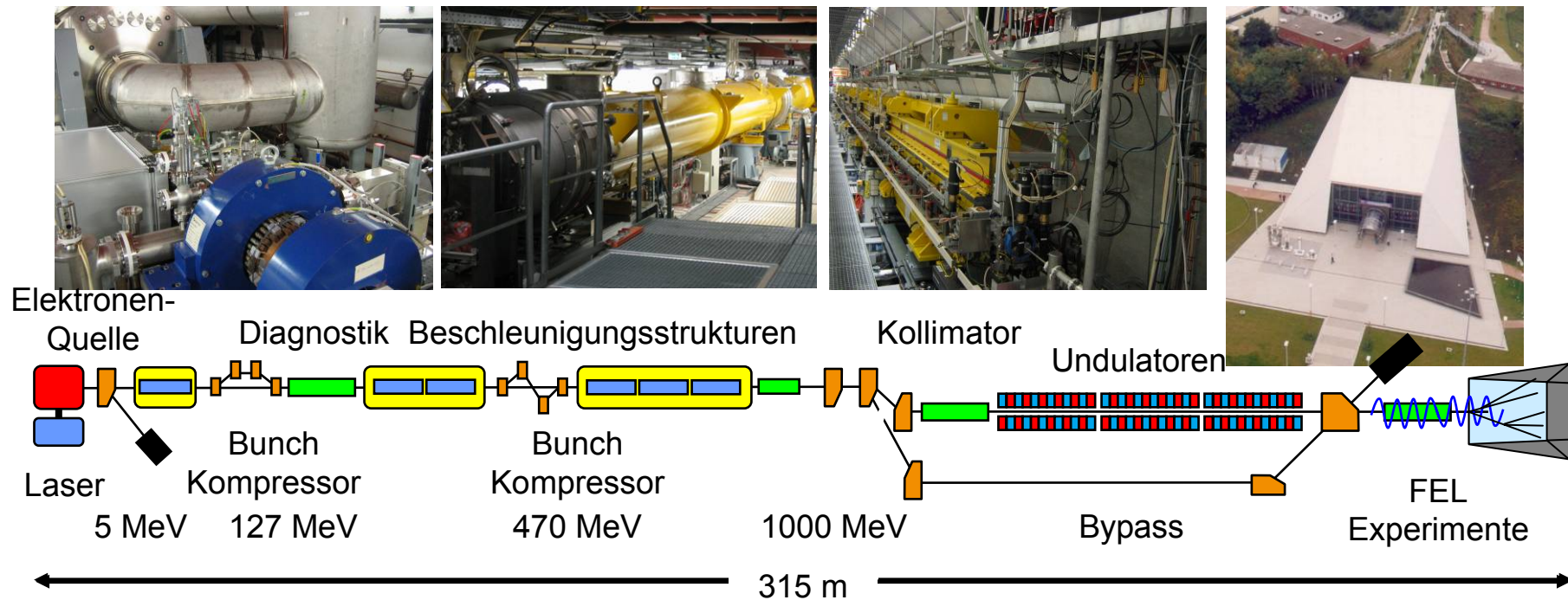
Etwas genauer:

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 Raum-Zeitgebiet  
→ hoher Strom ( $\sim$ 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

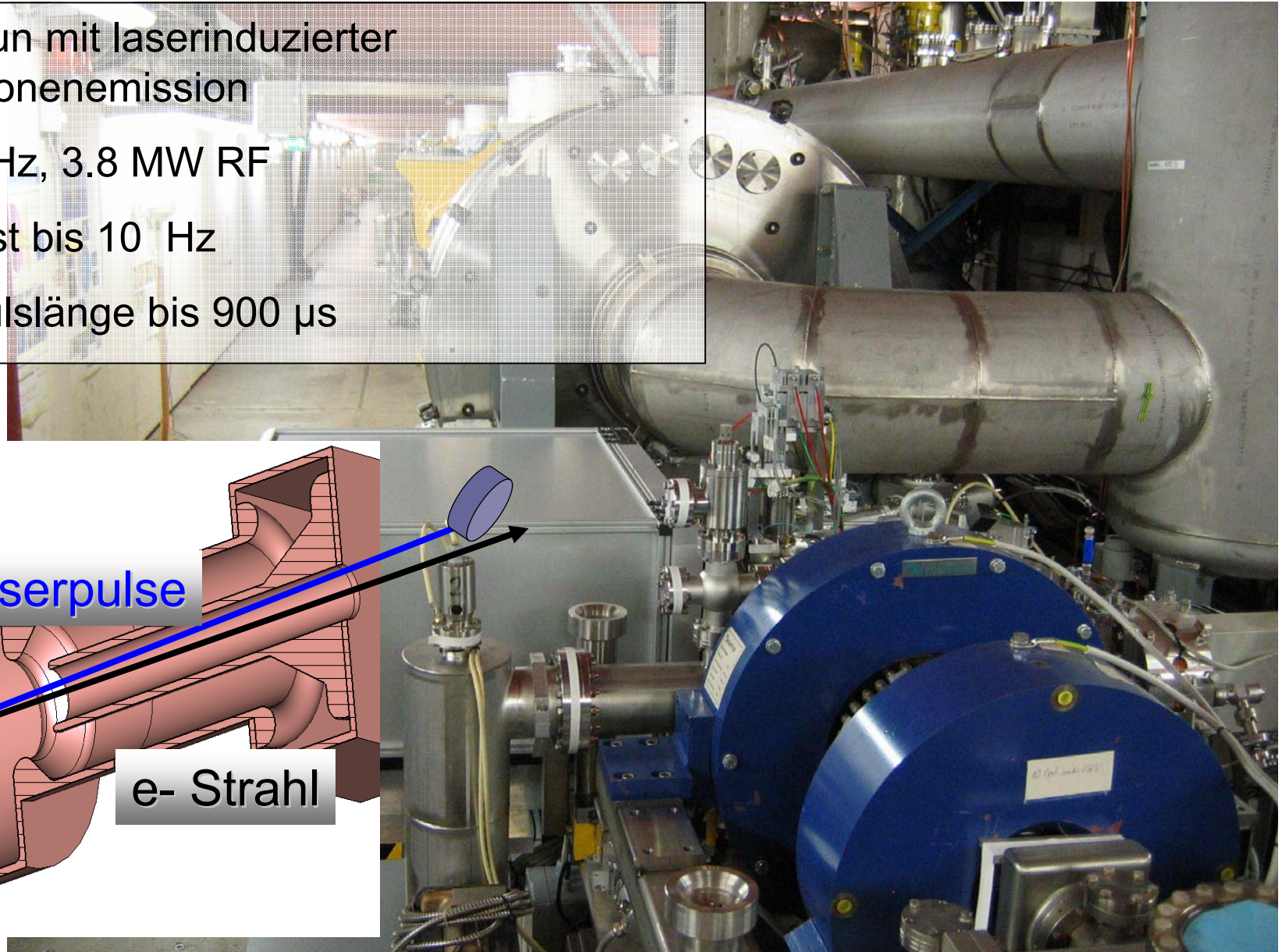
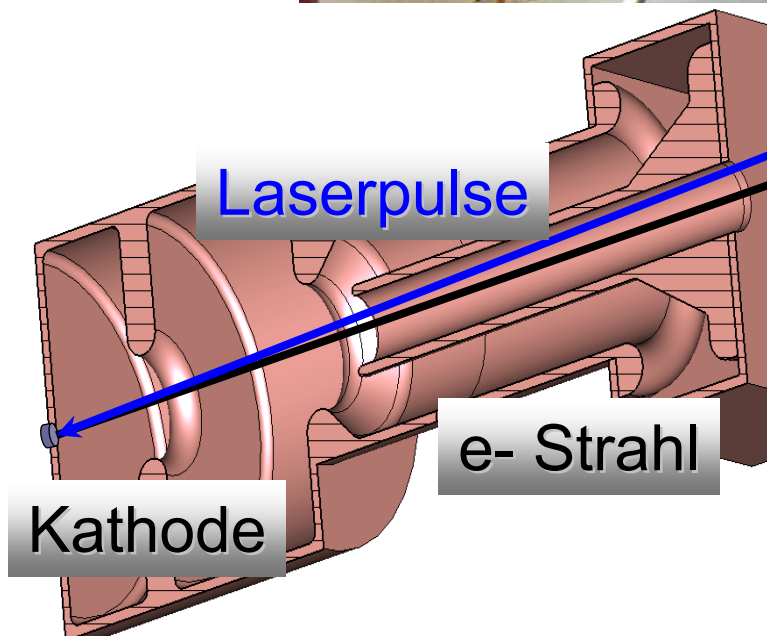
# FLASH Übersicht – vor dem Ausbau

**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg



# Elektronenquelle: Photoinjektor

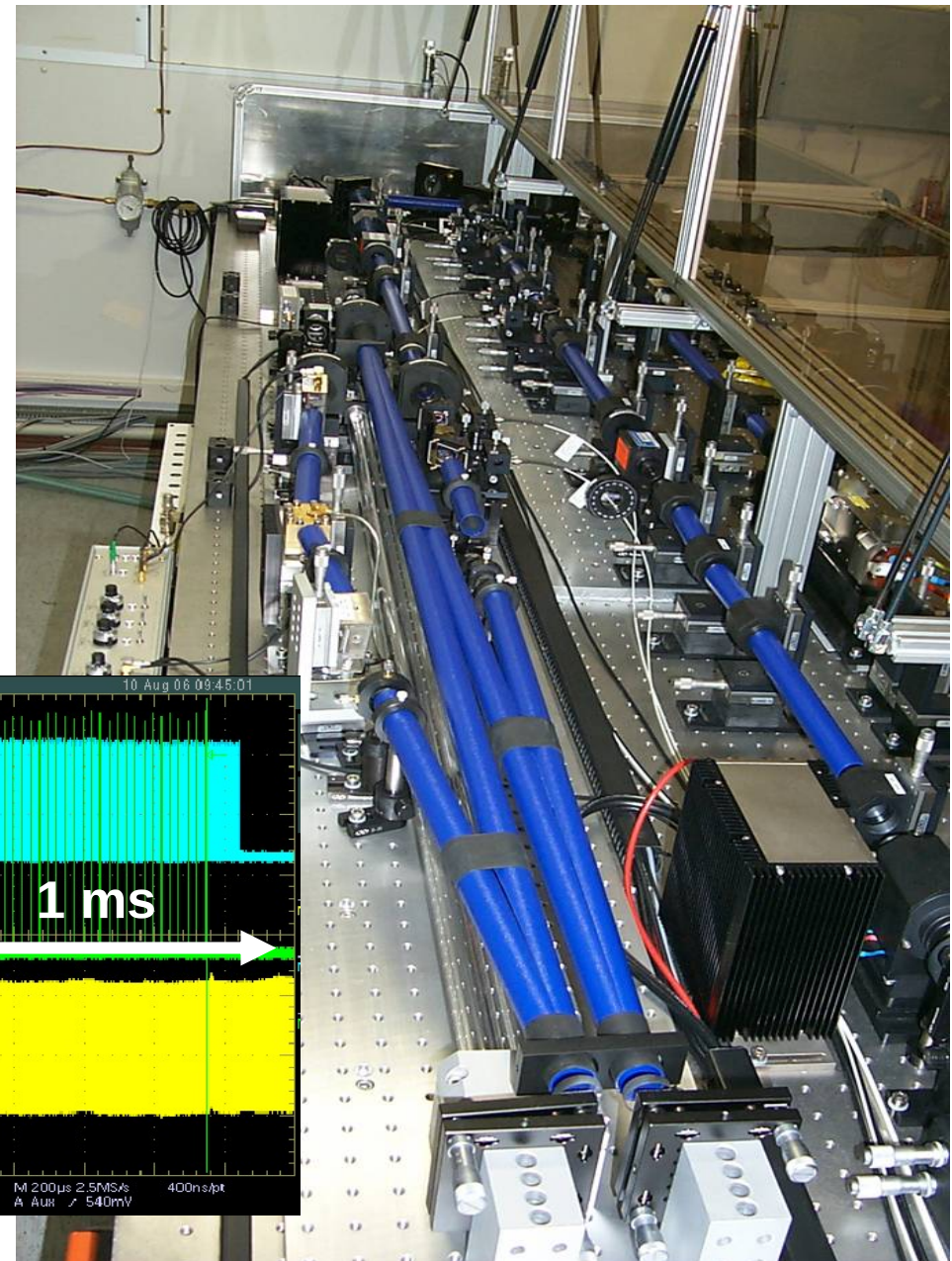
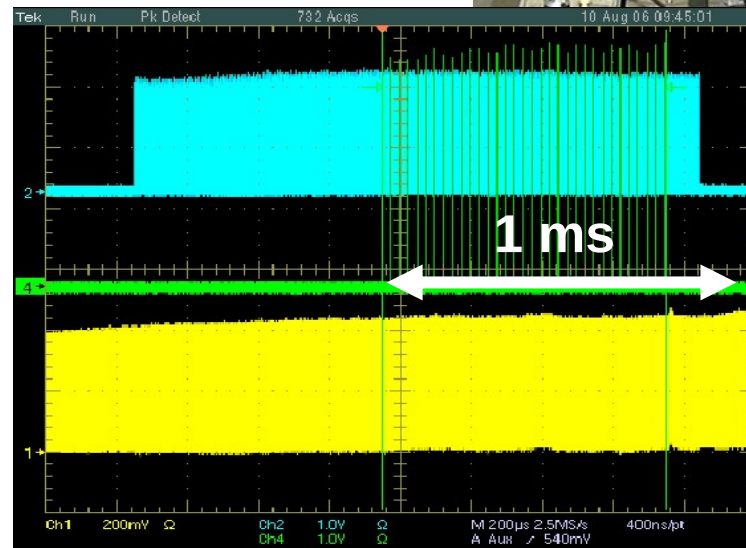
- > RF-Gun mit laserinduzierter Elektronenemission
- > 1.3 GHz, 3.8 MW RF
- > gepulst bis 10 Hz
- > RF Pulslänge bis 900  $\mu\text{s}$



# Photoinjektor-Laser

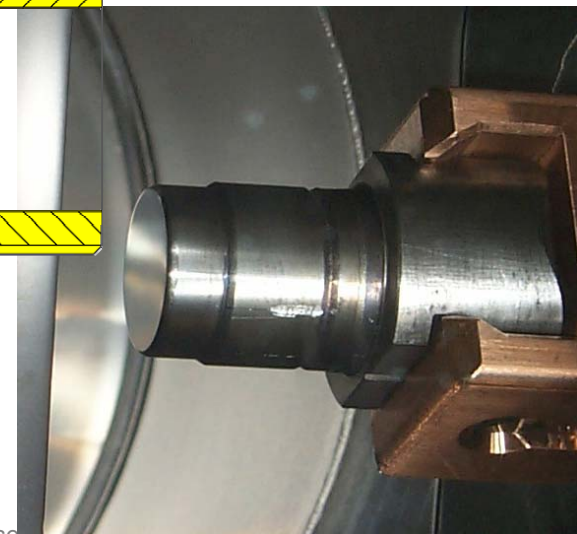
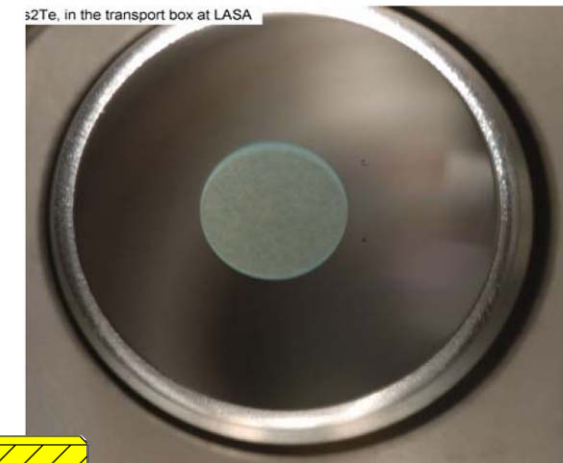
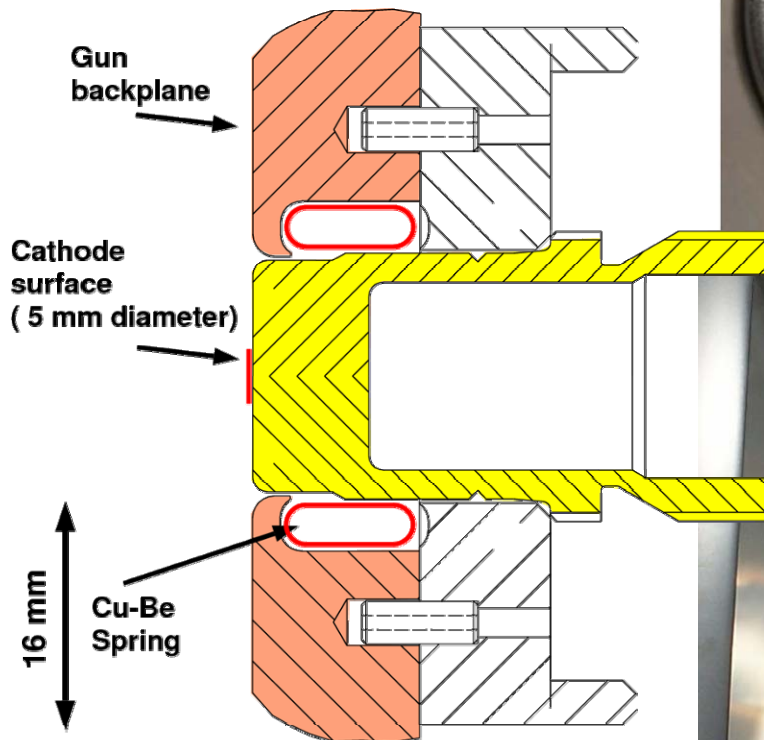
**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg

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

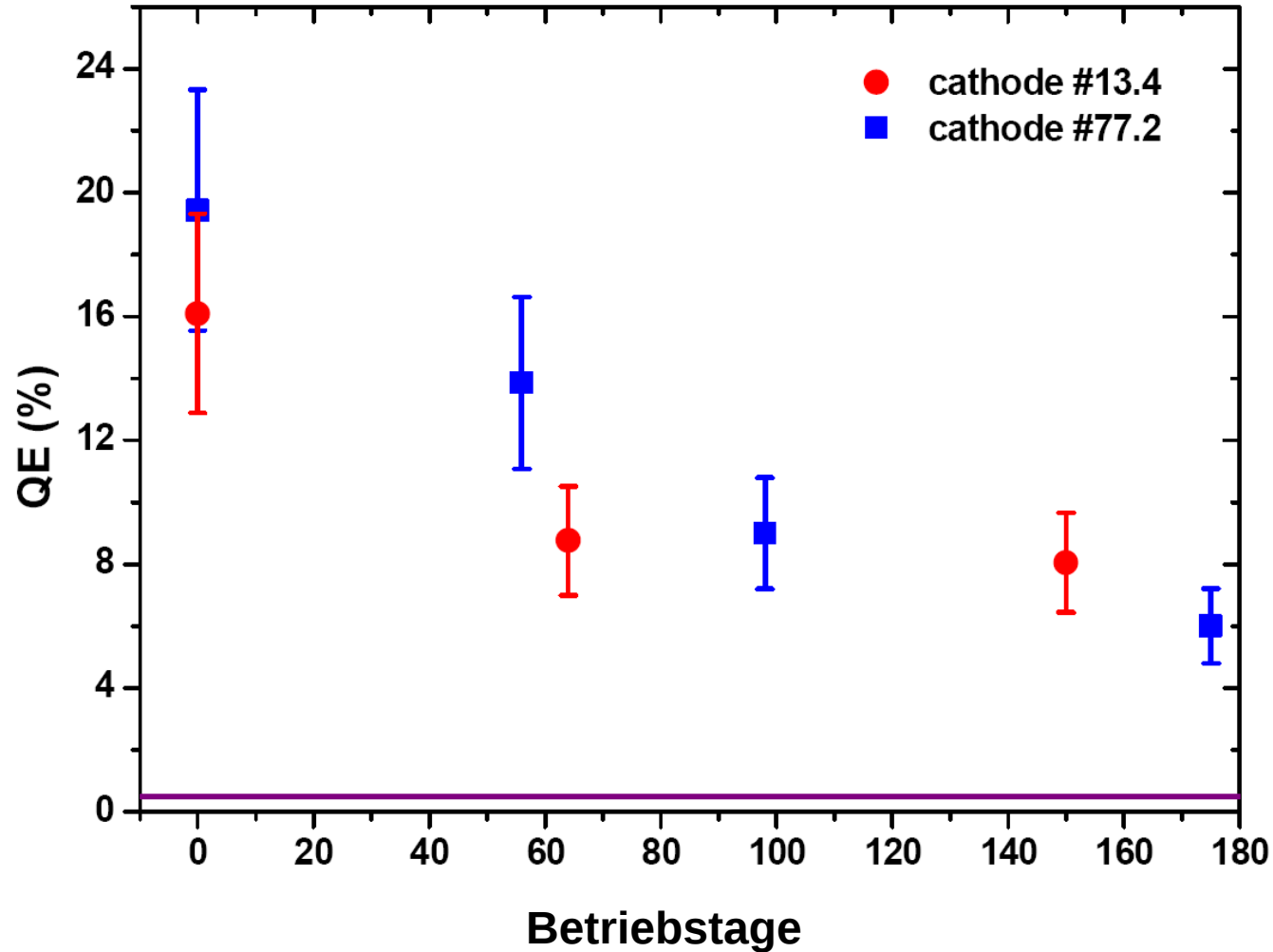


# Cs<sub>2</sub>Te Kathoden

- > Hohe Quanteneffizienz (QE) bei hohen Stromstärken
- > Unsere Wahl: Cs<sub>2</sub>Te
- > 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

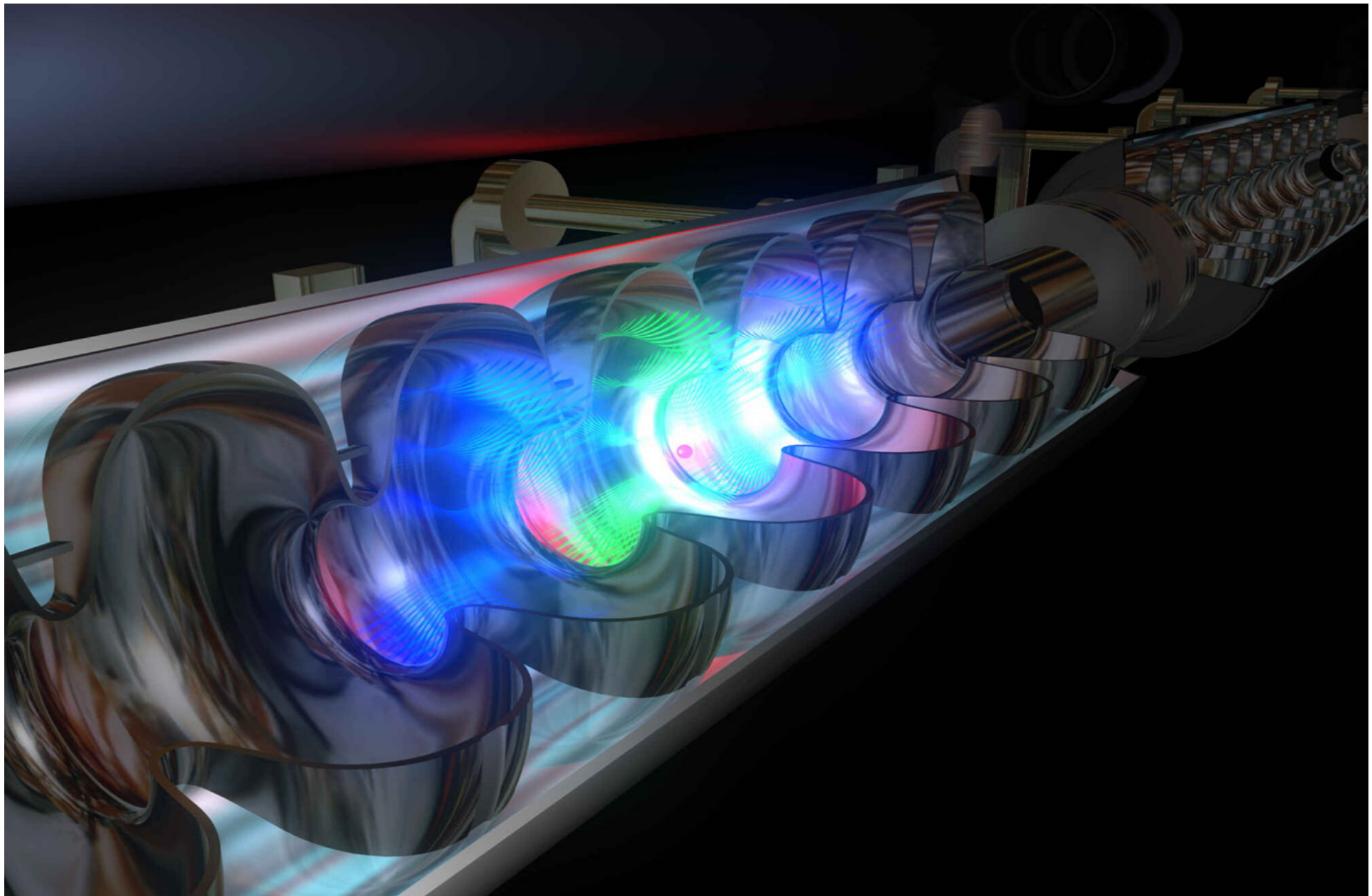


- > Quantenausbeute während der Betriebszeit für zwei ausgewählte Kathoden



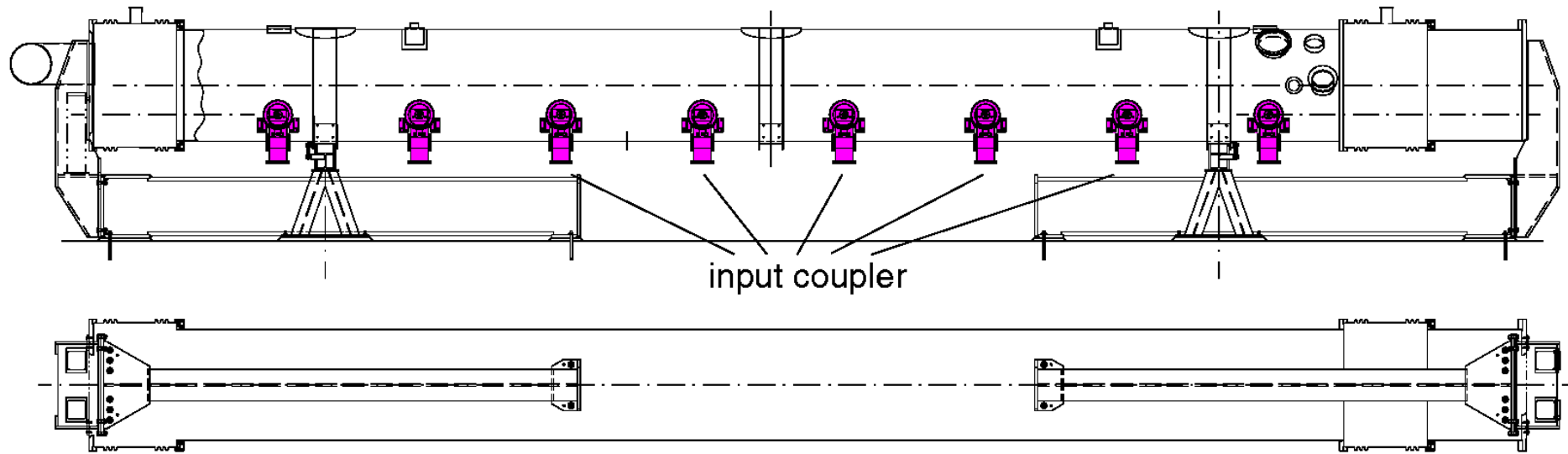
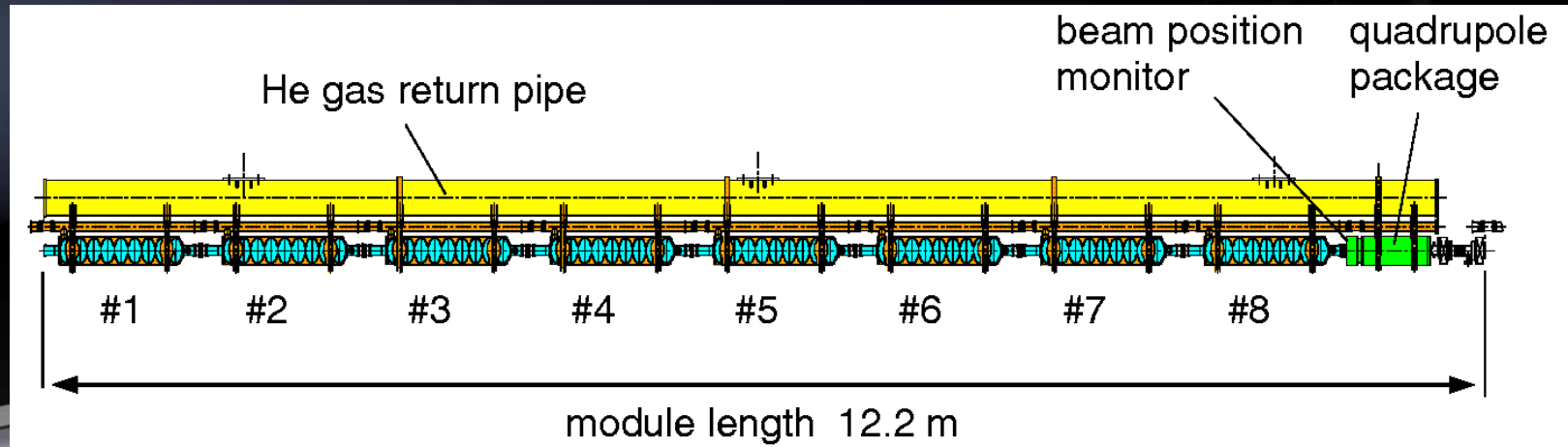
# FLASH beschleunigt mit TESLA Technologie

**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg



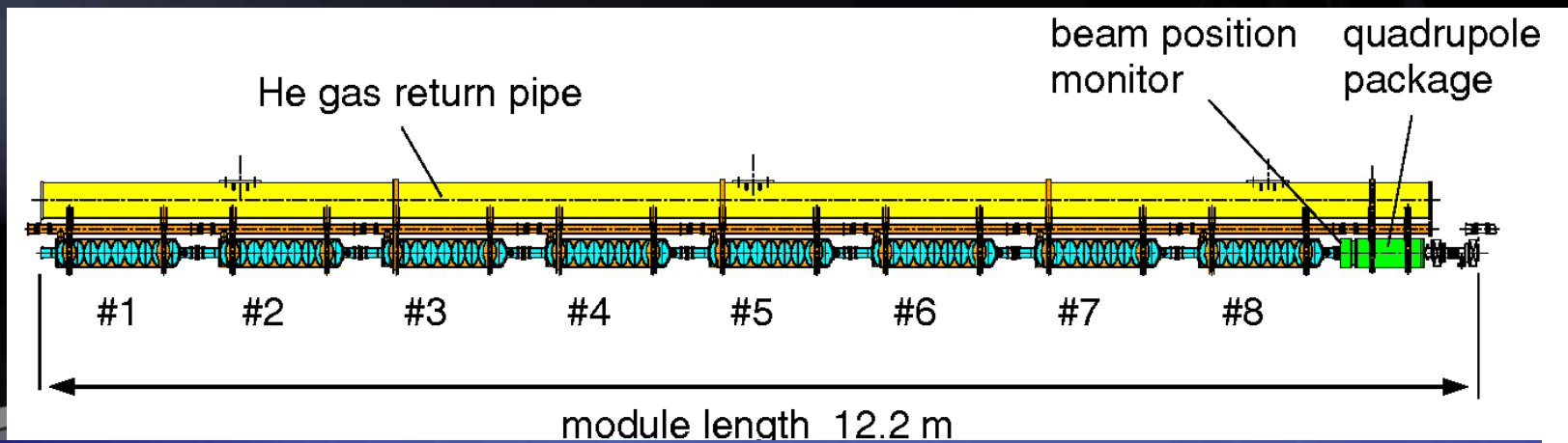
# FLASH beschleunigt mit TESLA Technologie

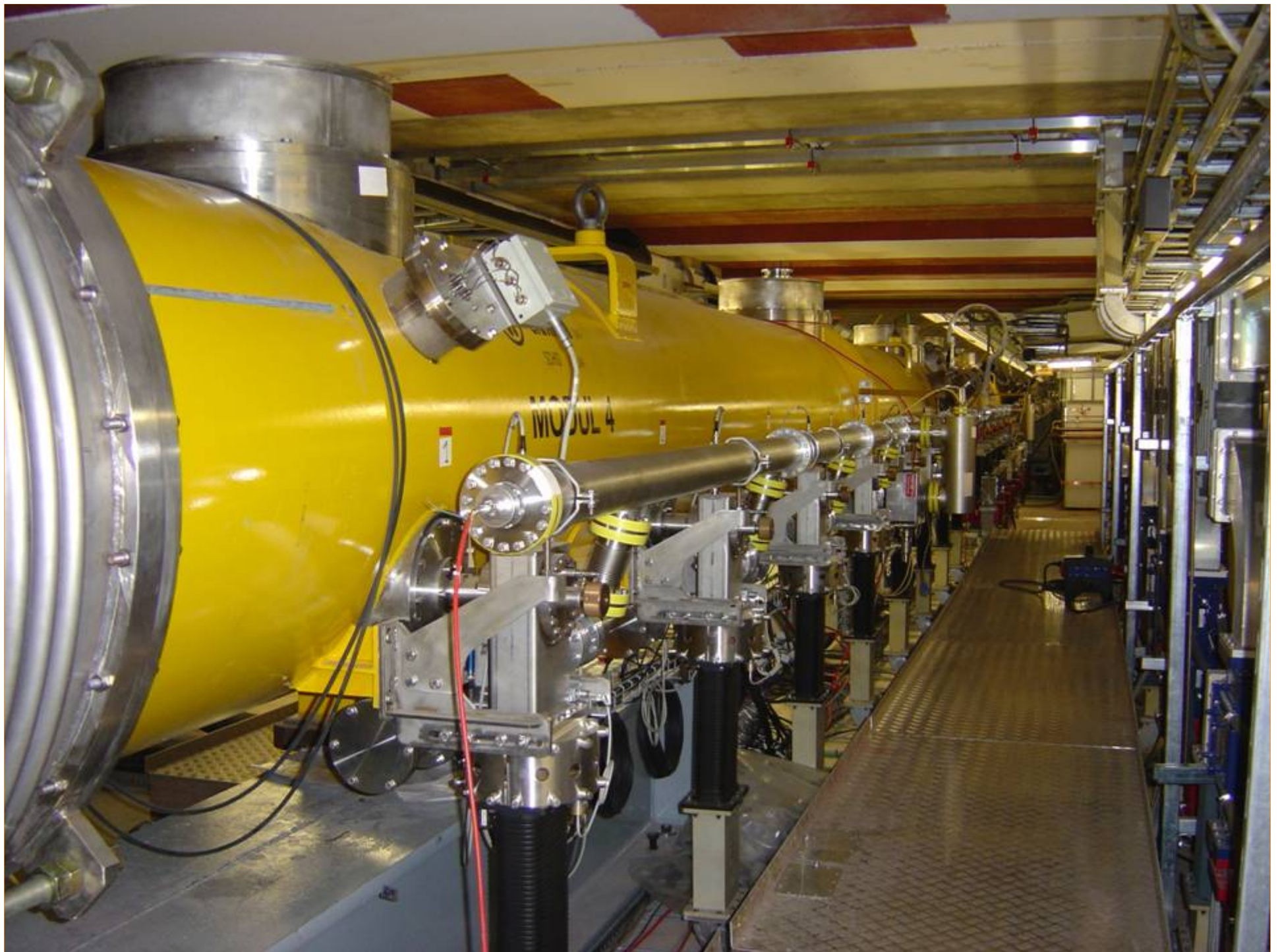
**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg



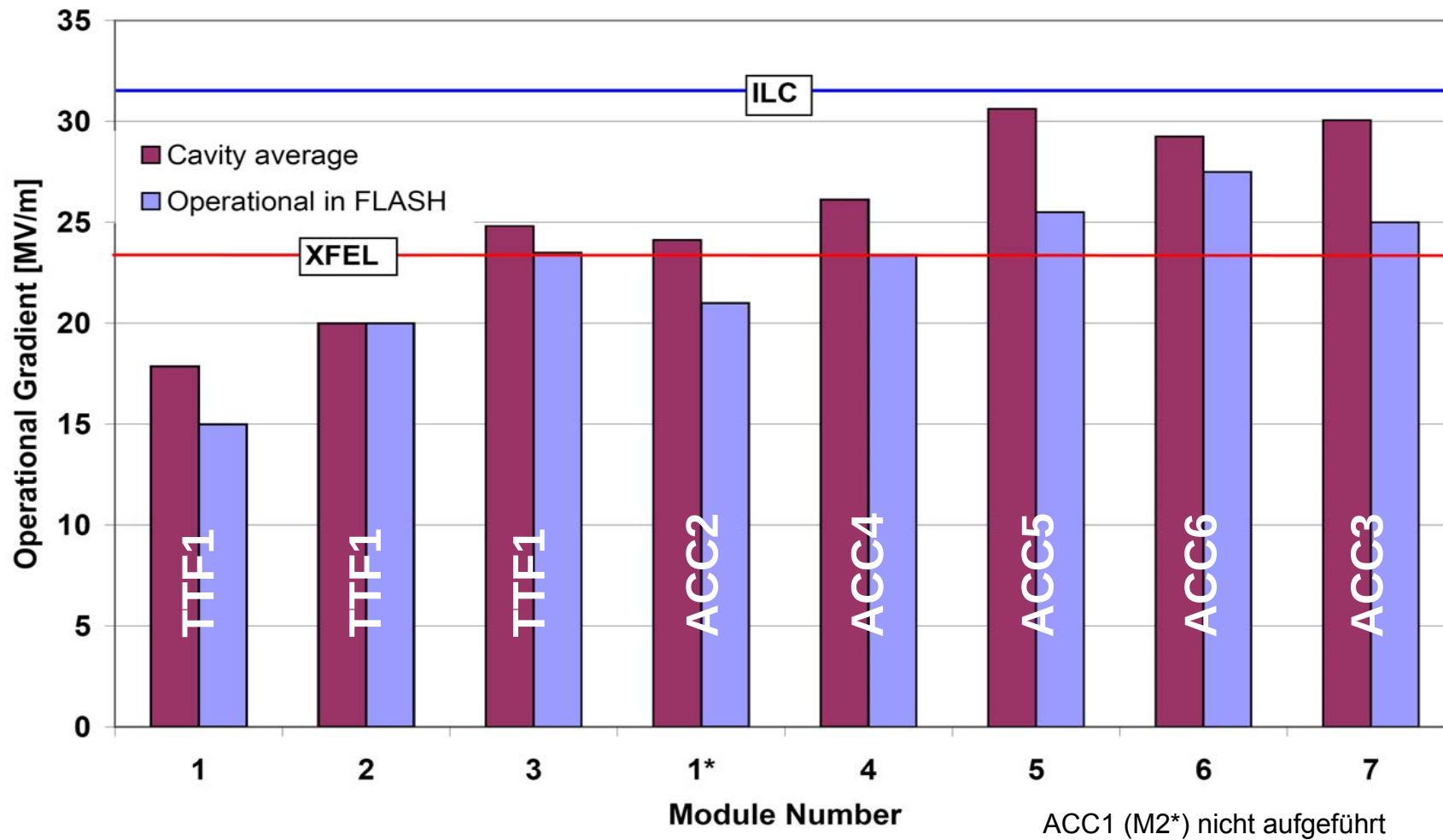
# FLASH beschleunigt mit TESLA Technologie

**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg



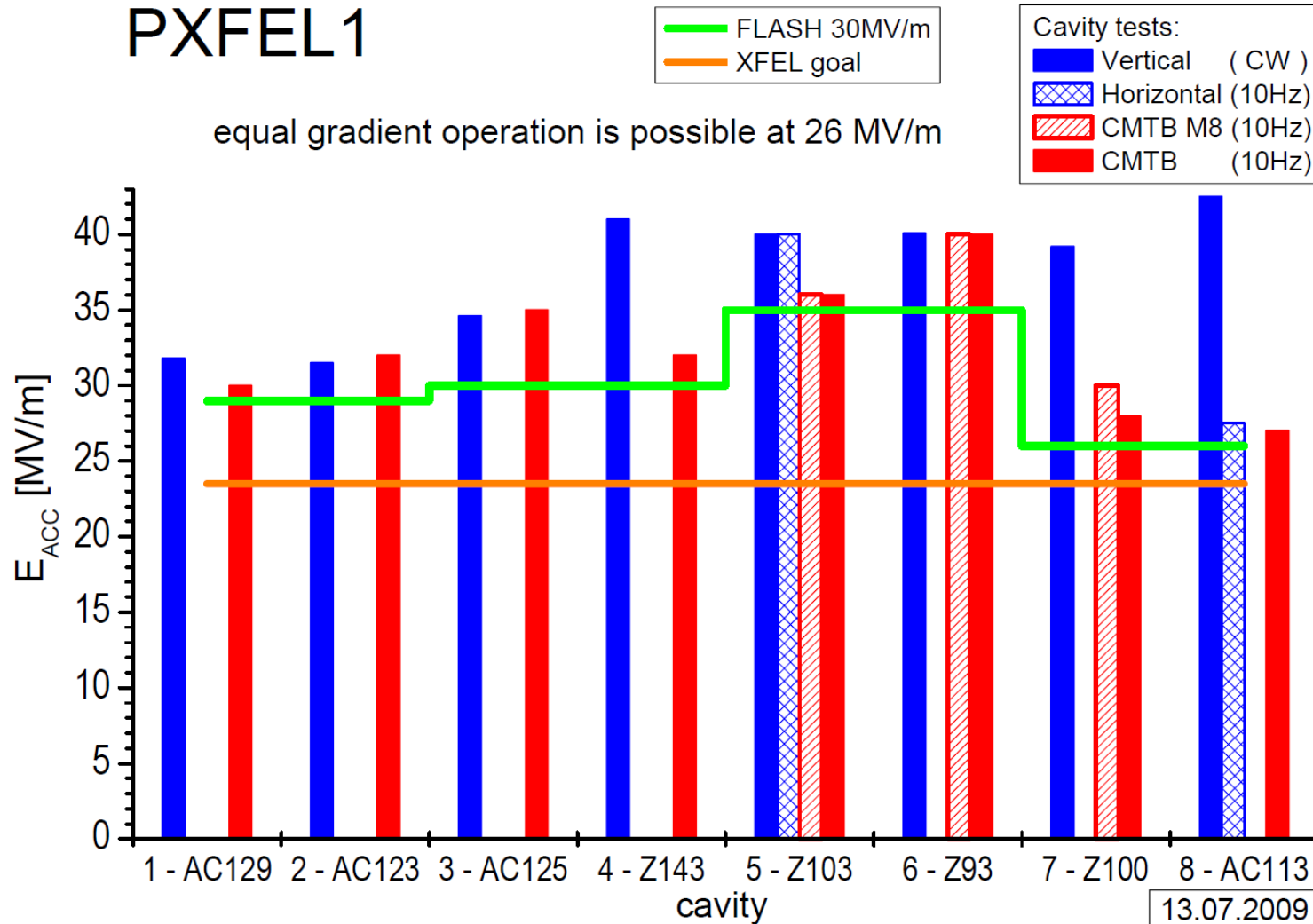


# Beschleunigungsgradient



## PXFEL1

equal gradient operation is possible at 26 MV/m



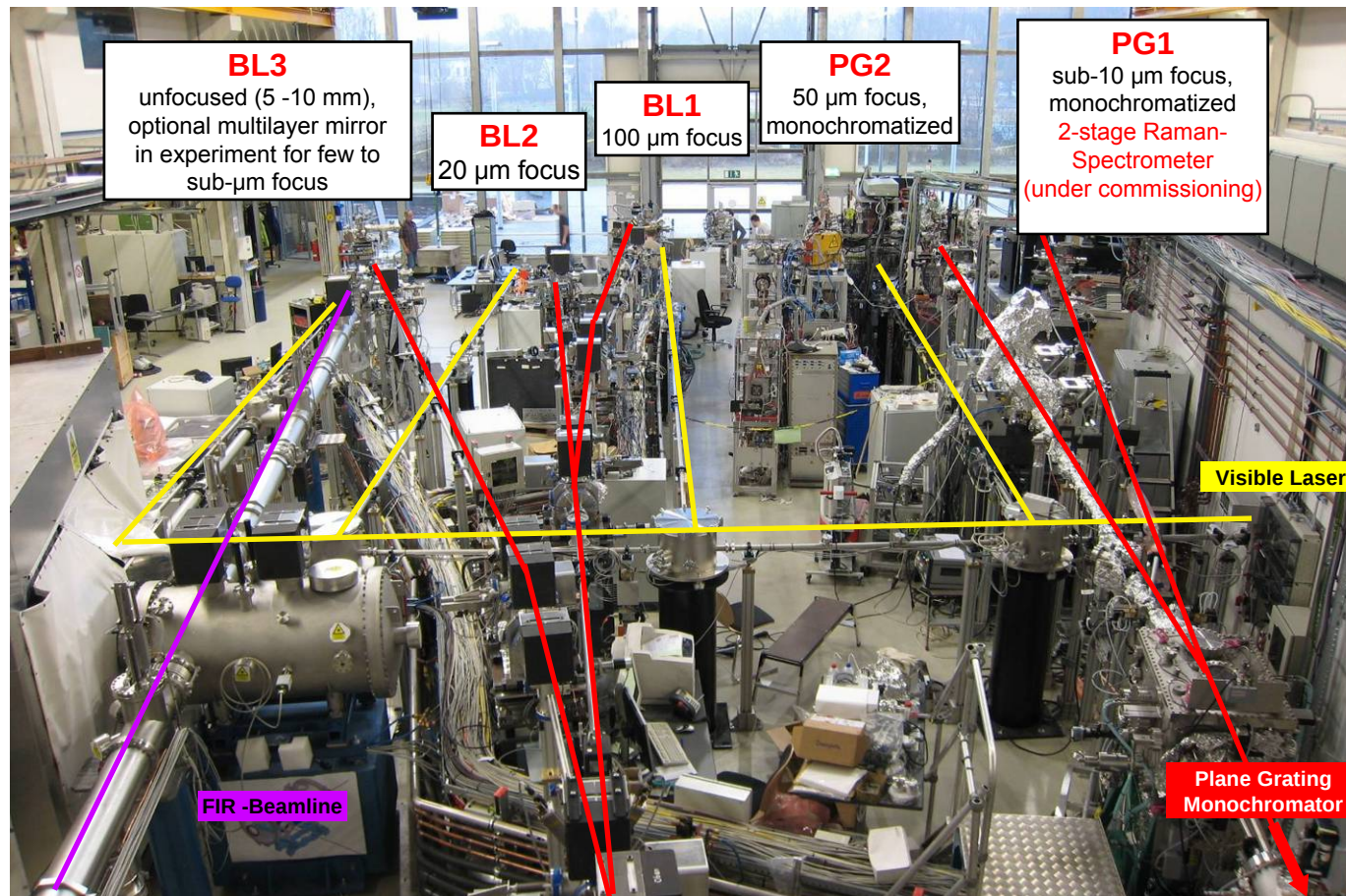
D.Kostin, 13.07.2009

# Nutzerbetrieb

# FLASH Experimentierhalle

**FLASH.**  
Free-Electron Laser  
in Hamburg

- > bis dato 95 Publikationen in vielen wichtigen Zeitschriften
- > mehr als 50 pro Jahr über technische Entwicklungen



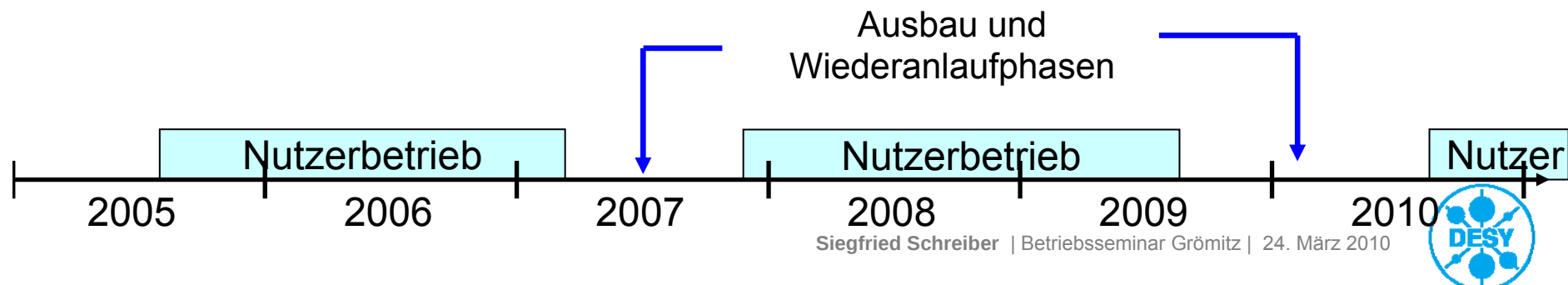
[http://hasylab.desy.de/facilities/flash/publications/selected\\_publications/](http://hasylab.desy.de/facilities/flash/publications/selected_publications/)

Siegfried Schreiber | Betriebsseminar Grömitz | 24. März 2010



- > Die Strahlzeit ist in Blöcken organisiert
- > Ein Nutzerblock hat 4 Wochen
- > Zwischen Nutzerblocks  
Studienwochen und Vorbereitung des  
Nutzerblocks
  - FEL-Physik Studien
  - Verbesserung von FLASH
  - Vorbereitung der Experimente insb. FEL-  
Strahlführung
- > Einige Blöcke für allgemeine  
Beschleunigerstudien (XFEL, ILC, ...)

|          |    |                 |   |                     |
|----------|----|-----------------|---|---------------------|
|          | 52 | 24.Dec - 30.Dec | 5 | Maintenance         |
| January  | 1  | 31.Dec - 6.Jan  | 5 |                     |
| 2008     | 2  | 7.Jan - 13.Jan  | 4 | Accelerator studies |
|          | 3  | 14.Jan - 20.Jan | 4 |                     |
|          | 4  | 21.Jan - 27.Jan | 2 | FEL studies         |
| February | 5  | 28.Jan - 3.Feb  | 2 |                     |
|          | 6  | 4.Feb - 10.Feb  | 3 |                     |
|          | 7  | 11.Feb - 17.Feb | 1 | User Run            |
|          | 8  | 18.Feb - 24.Feb | 1 |                     |
|          | 9  | 25.Feb - 2.Mar  | 1 |                     |
| March    | 10 | 3.Mar - 9.Mar   | 1 |                     |
|          | 11 | 10.Mar - 16.Mar | 2 | FEL studies         |
|          | 12 | 17.Mar - 23.Mar | 2 |                     |
|          | 13 | 24.Mar - 31.Mar | 3 |                     |
| April    | 14 | 31.Mar - 6.Apr  | 1 | User Run            |
|          | 15 | 7.Apr - 13.Apr  | 1 |                     |
|          | 16 | 14.Apr - 20.Apr | 1 |                     |
|          | 17 | 21.Apr - 27.Apr | 1 |                     |



## > Nutzerperioden:

- 1. Periode: Jul 2005 – Mär 2007
- 2. Periode: Nov 2007 – Aug 2009
- 3. Periode ab Sommer 2010

## > Bisher insgesamt 14000 Stunden Strahlzeit

## > 1. → 2. Periode:

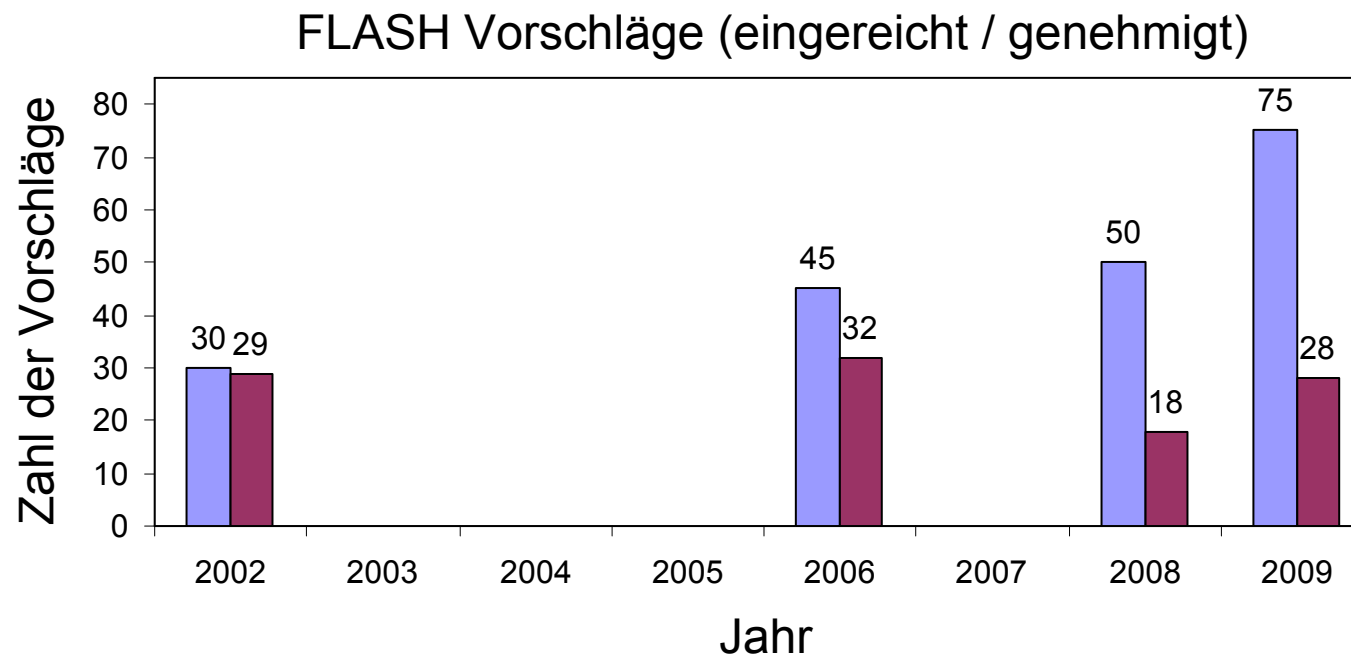
- Uptime 87 % → 93 %
- 45 % → 49 % Strahlzeit für Nutzer (innerhalb der Nutzerperioden)
- 30 % → 33 % der gesamten Zeit

## > Experimente

- 3 mal mehr eingereichte Vorschläge für Experimente als akzeptiert werden können
- Nutzer bilden Kollaborationen um die knappe Strahlzeit besser zu nutzen
- Im Mittel ist ein Experiment für nur 11.6 12Std-Schichten eingeteilt

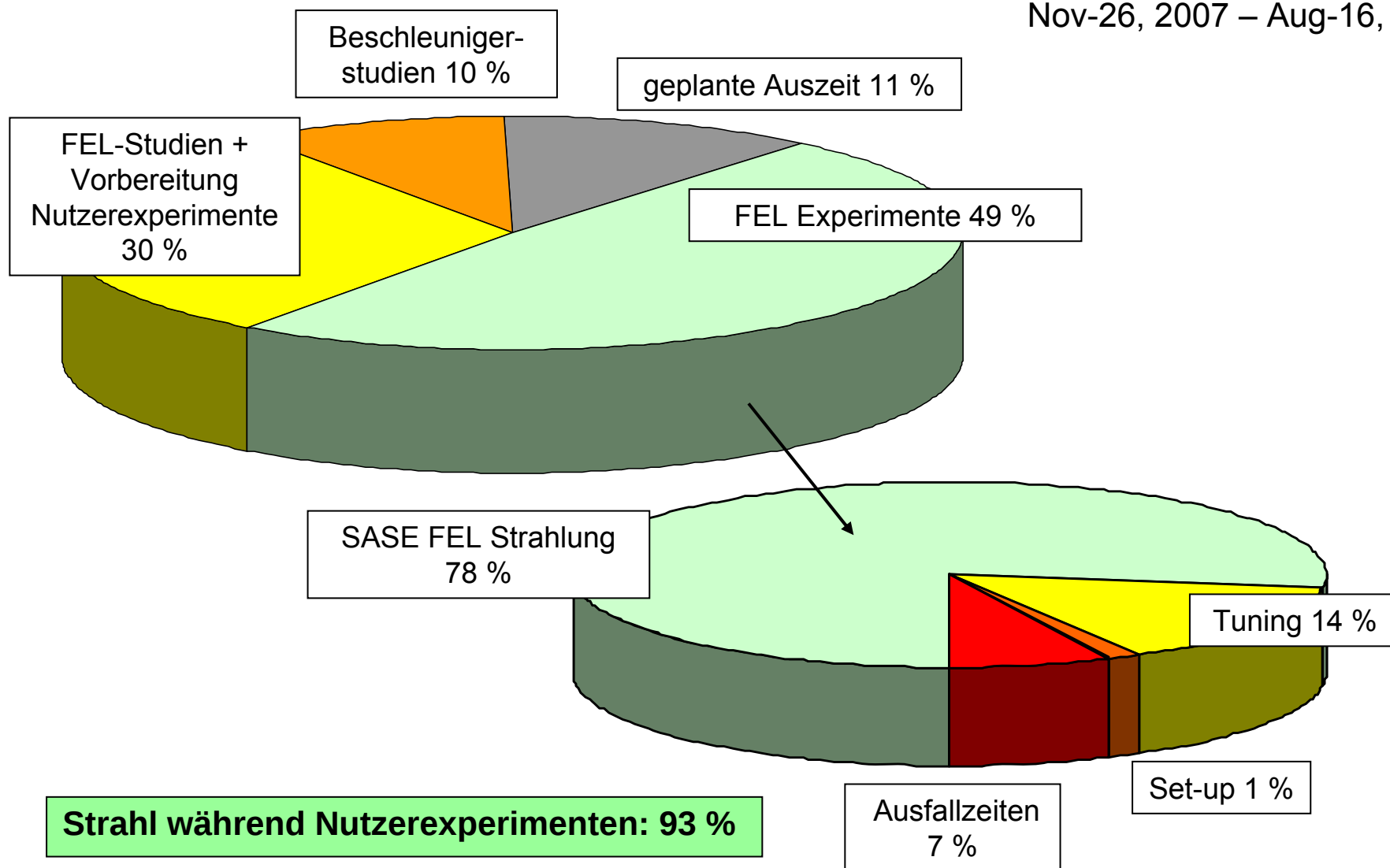
→ Großer Druck auf die Experimente und die Maschine um in kurzer Zeit Erfolg zu haben

- > Bisher 4 Ausschreibungen (Pilotexperimente TTF + 3 Nutzerperioden)
- > Etwa mehr als 300 12Std-Schichten pro Periode stehen zur Verfügung
- > 3. Nutzerperiode: 324 Schichten für 28 Experimente von 75 Vorschlägen



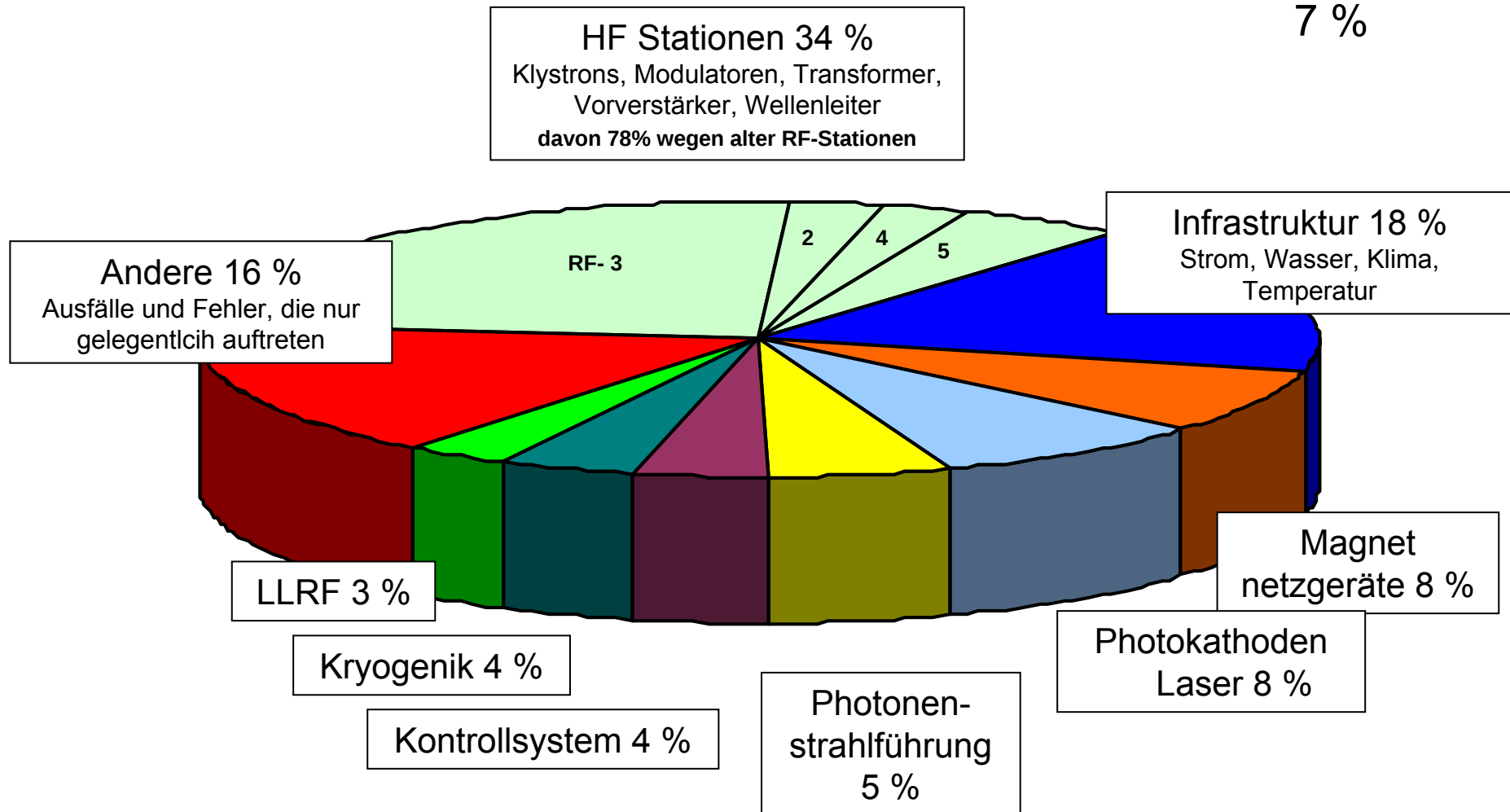
# Strahlzeitverteilung 2. Nutzerperiode

Nov-26, 2007 – Aug-16, 2009

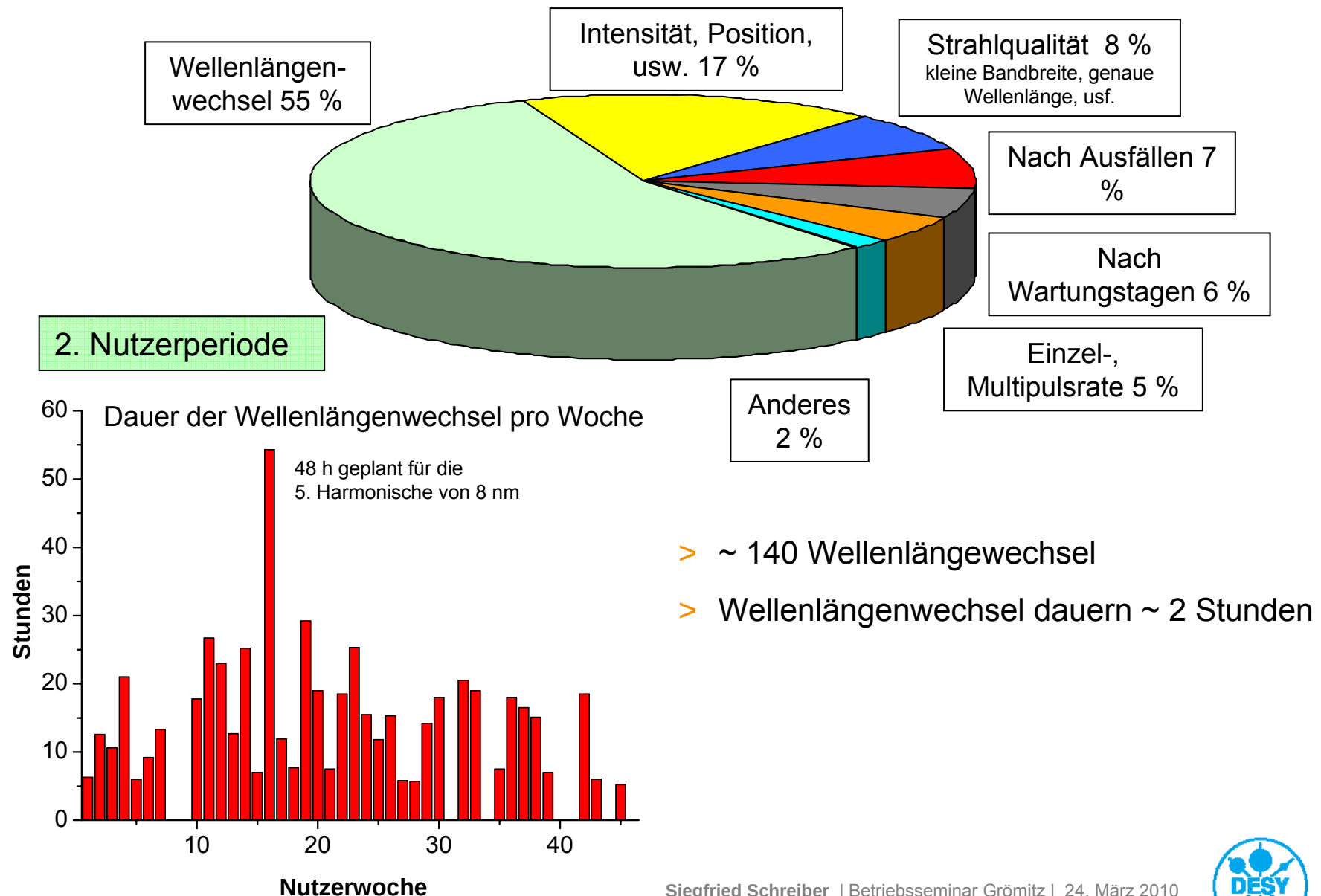


# Ausfallzeit während des Nutzerbetriebs

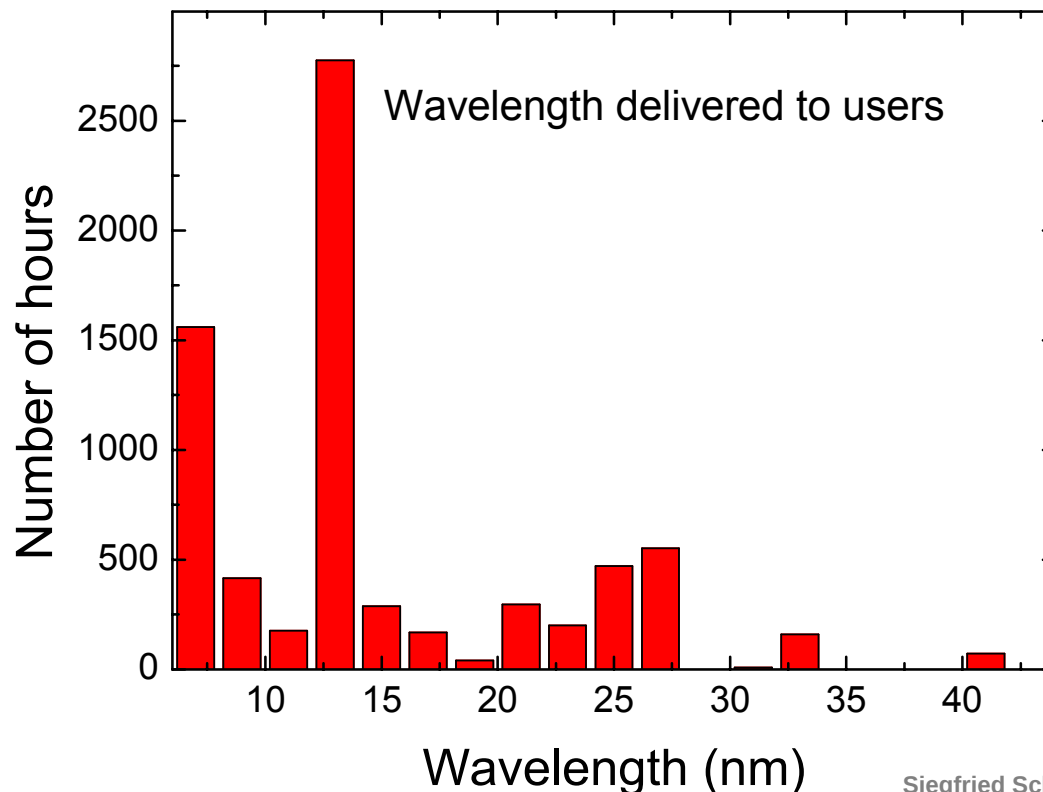
Gesamt Ausfallzeit  
7 %



# SASE Tuning für Experimente

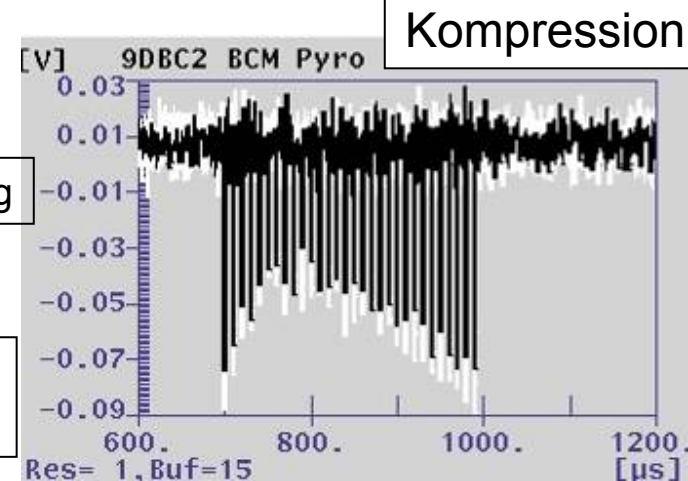
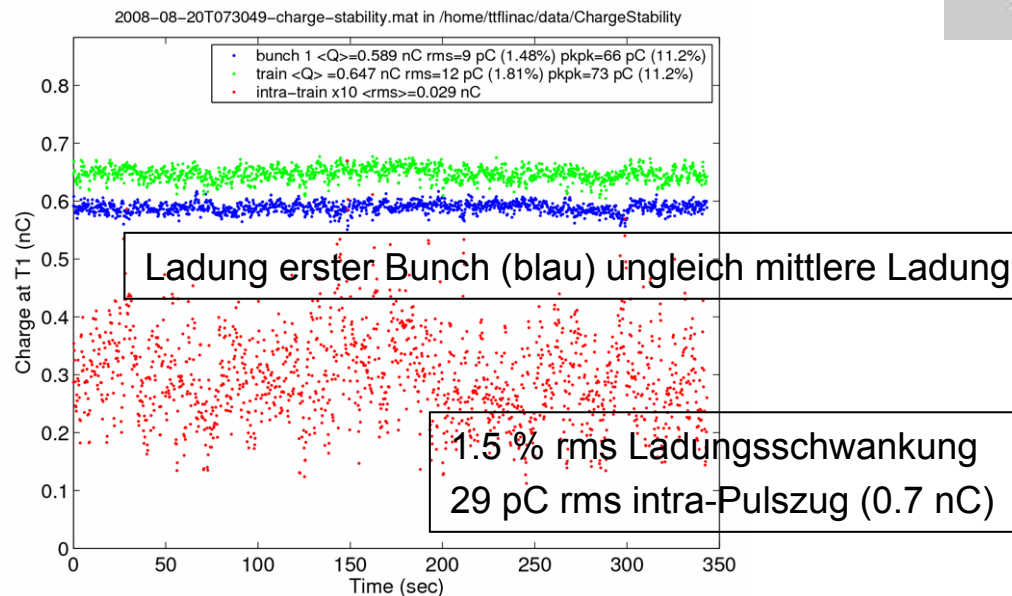
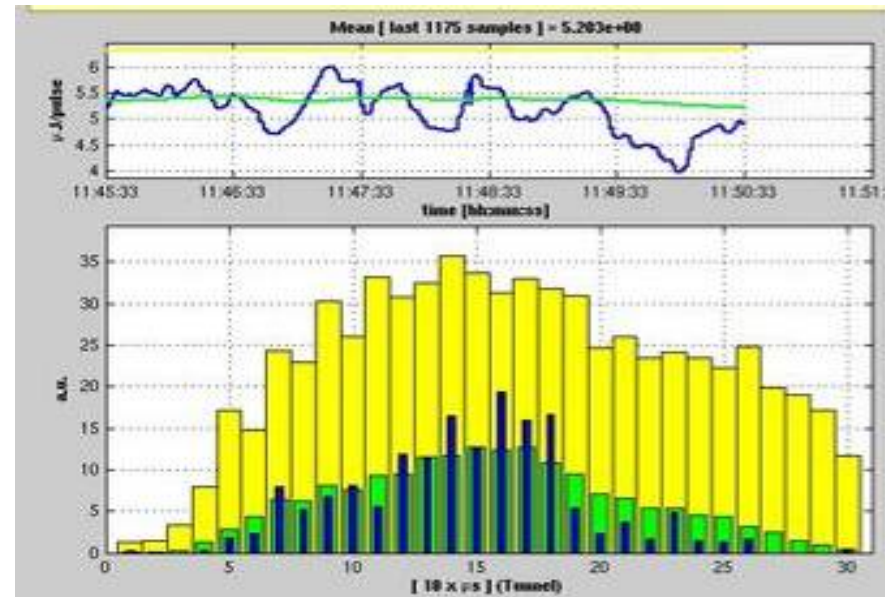
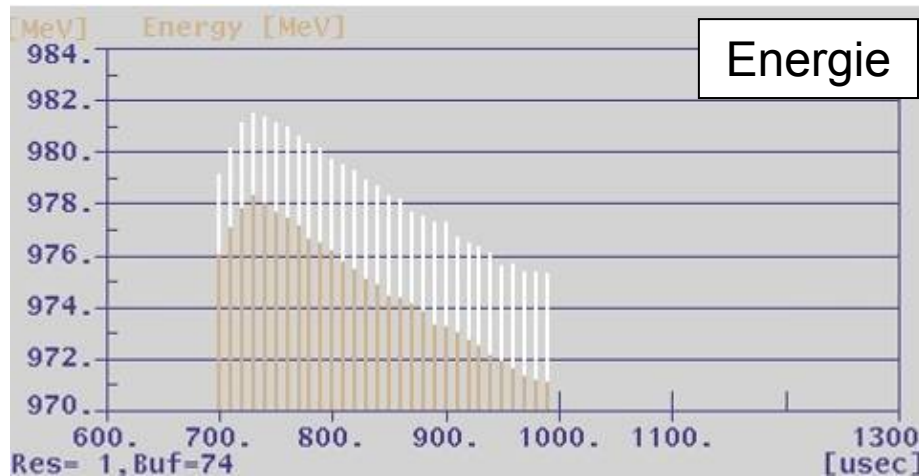


- > Mehr als 30 verschiedene Wellenlängen zwischen 6.8 nm und 40.5 nm
- > Die Favoriten:
  - 7 nm – so klein wie möglich
  - 13.5 nm – viele Experimente haben Spiegel für diese Wellenlänge

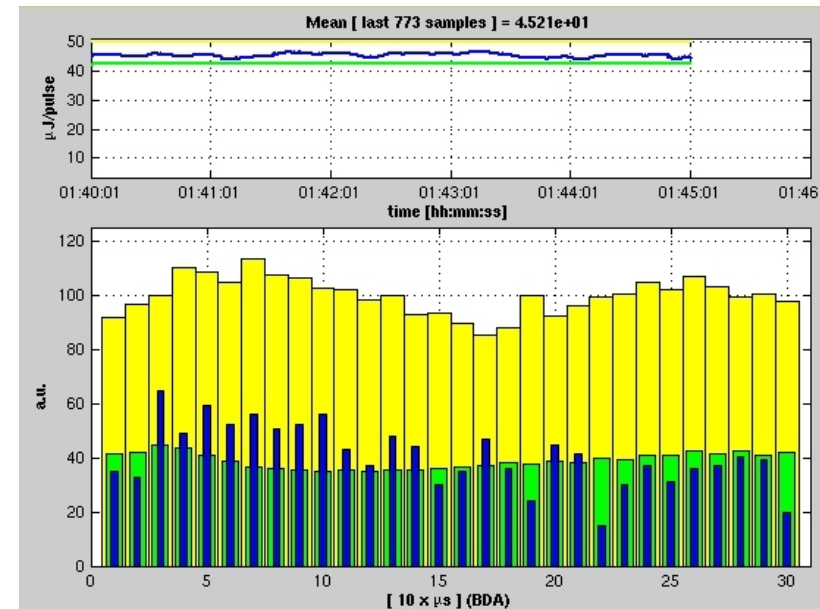
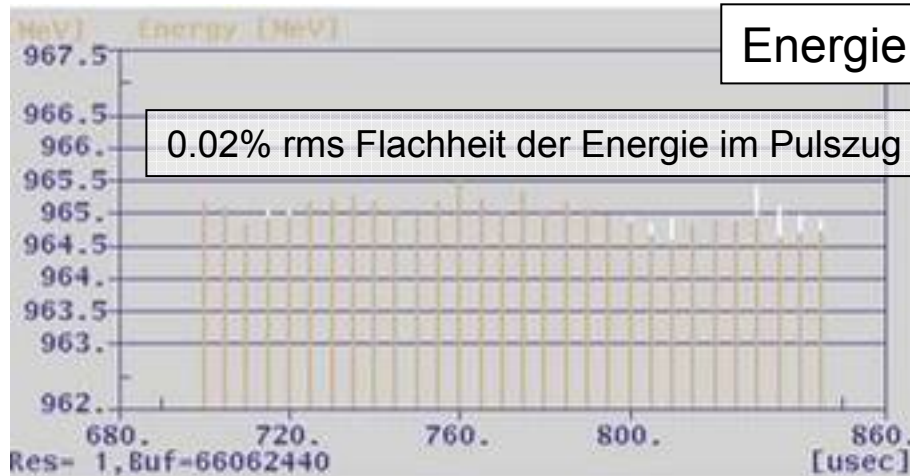


- > Einige Experimente nutzten auch die höheren Harmonischen
  - 3. Harmonische von 7 nm
  - 5. Harmonische von 8 nm
  - 3. Harmonische von 40.5 nm
- > Die kleinste Wellenlänge, die für ein Experiment genutzt wurde
  - 1.59 nm

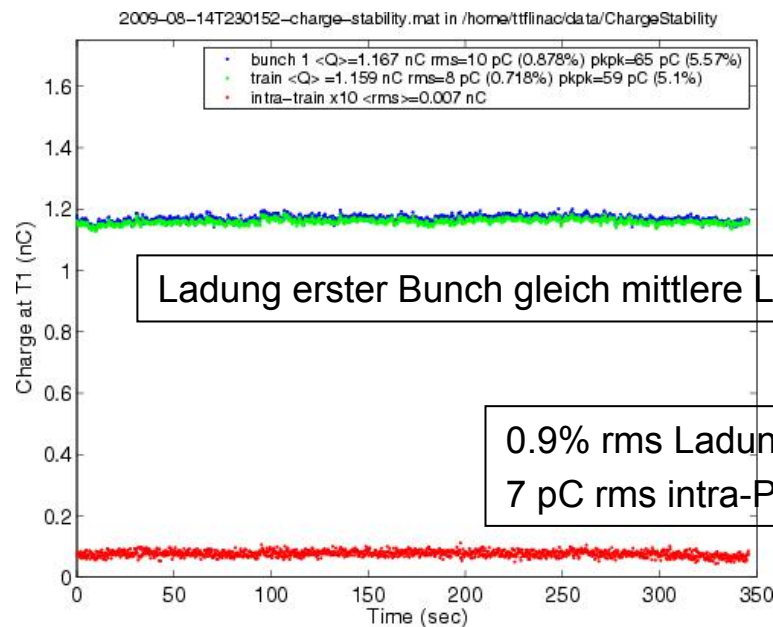
# Stabilität: Beispiel vom August 2008



# Fortschritt im Sommer 2009

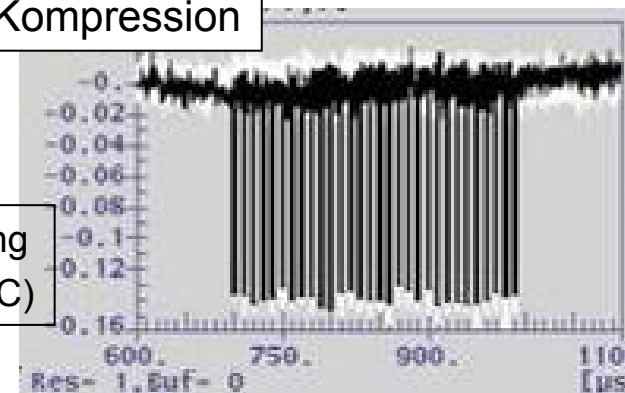


45  $\mu$ J, 100 kHz at 7.02 nm



flache Kompression

0.9% rms Ladungsschwankung  
7 pC rms intra-Pulszug (1.2 nC)



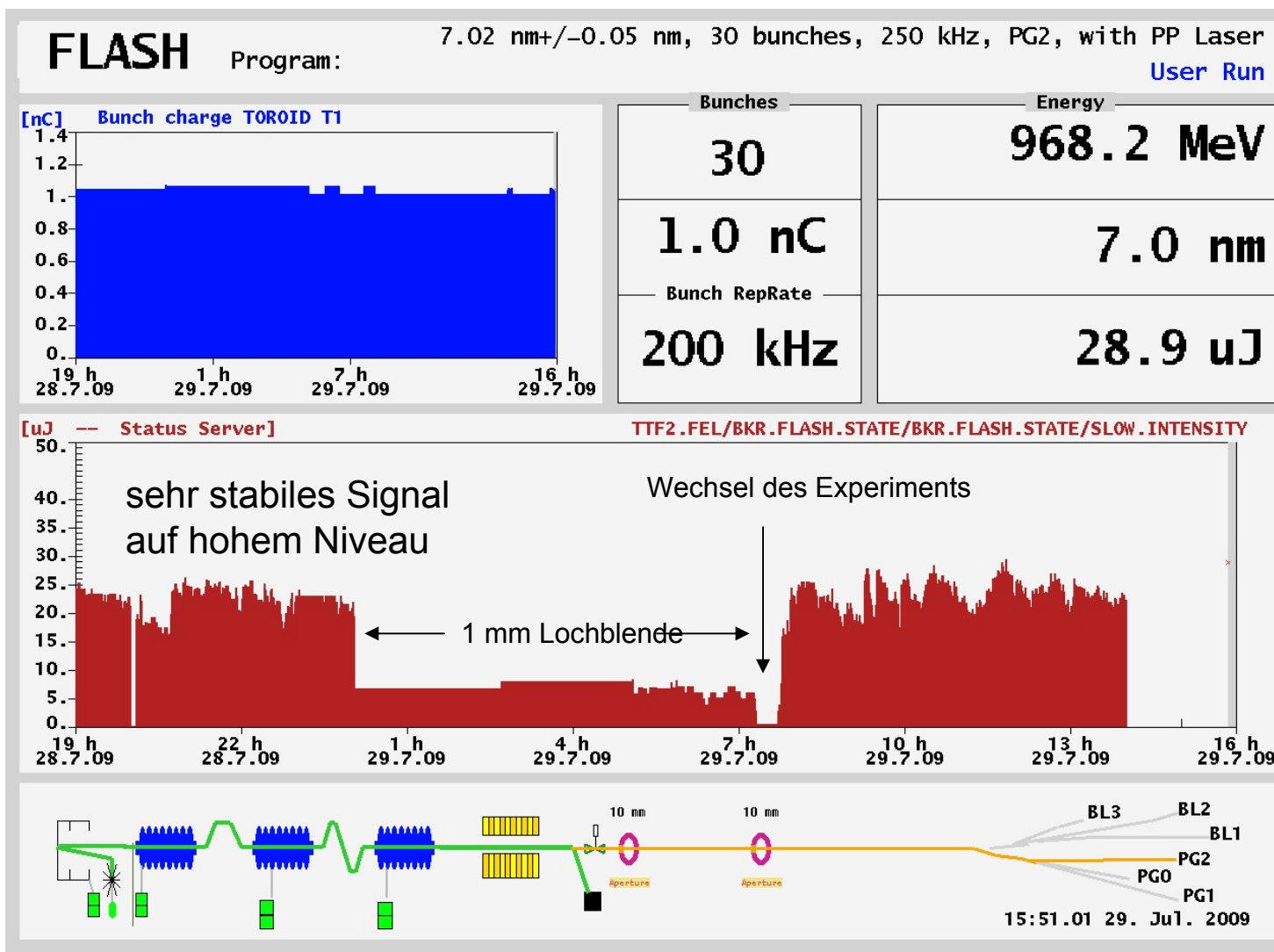
## > Wichtigste Verbesserungen 2008 → 2009

- LLRF, speziell RF-Gun: verbesserte Kalibration der Vektorsummenbildung
- Laserstabilität: neuer Masteroszillator (Kabel!), neue Optik, neue Frequenzverdopplerkristalle (BBO)
- Ausbildung und Training der Operateure, verbesserte Werkzeuge und Bedienung

## > Einige Verbesserungen 2009 → 2010

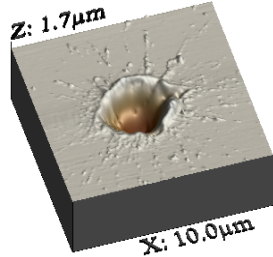
- LLRF (die gleiche Hardware für alle HF-Stationen, Verkabelung Injektorracks, Umgang mit hohen Strahlströmen usf.)
- HF- und strahlbasierte Feedbacks zur Stabilisierung des Pulszuges (Strahllage, Energie, Phase)
- „Beam based alignment“, Dispersions-, Orbitkorrektur, mit/ohne Raumladungs- und andere dynamische Effekte, ACC39
- Online-Spektrometer
- Neuer voll dioden-gepumpter Laser, neue Modulatoren, neue RF-Gun mit wenig Dunkelstrom, neue Korrektormagnete Injektor
- Aufmass der gesamten Maschine

# 3 Wochen mit 7 nm im Sommer 2009

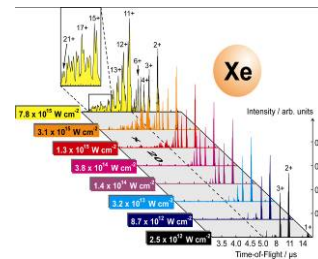


# Beispiele für Experimente

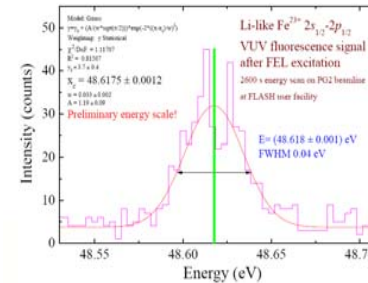
## Plasma Physics



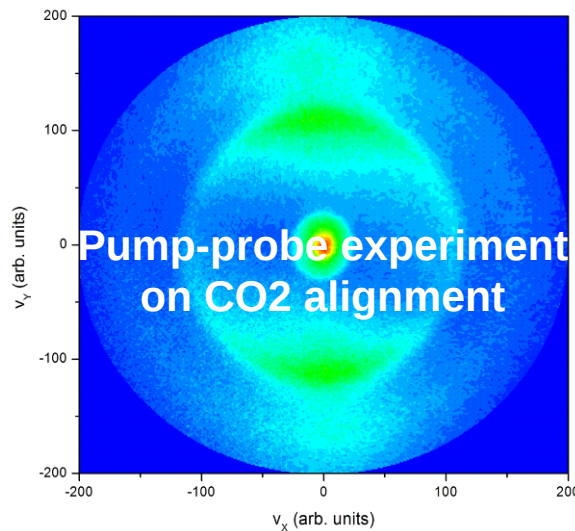
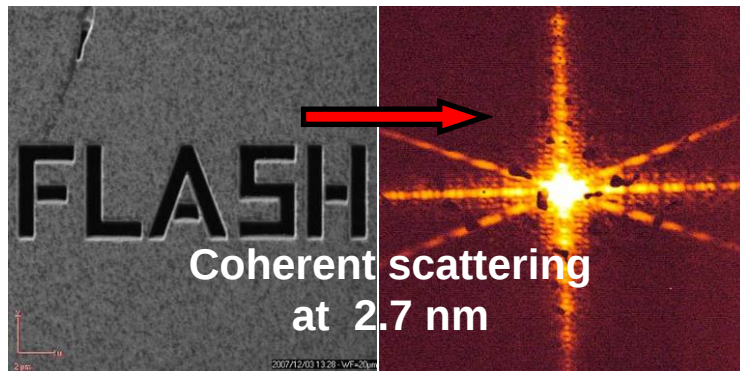
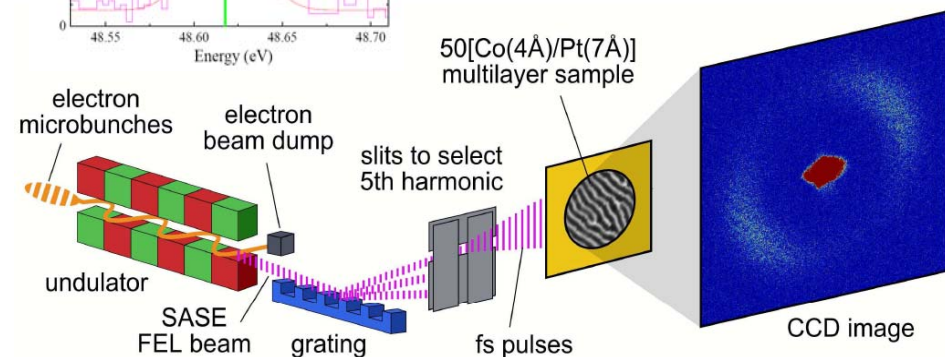
## Multi-Photon Processes



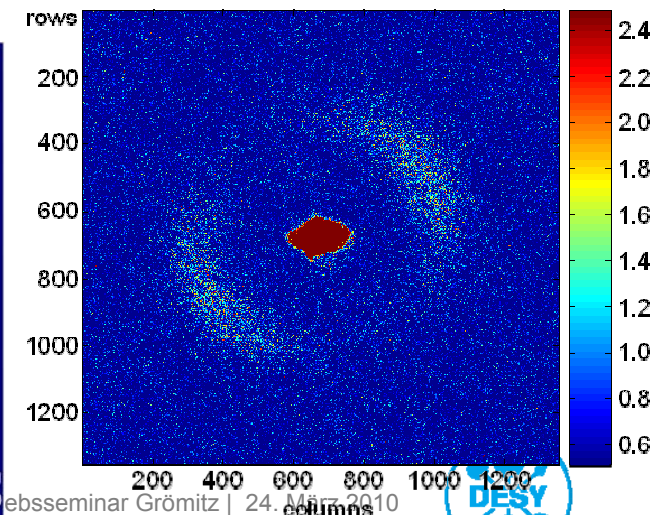
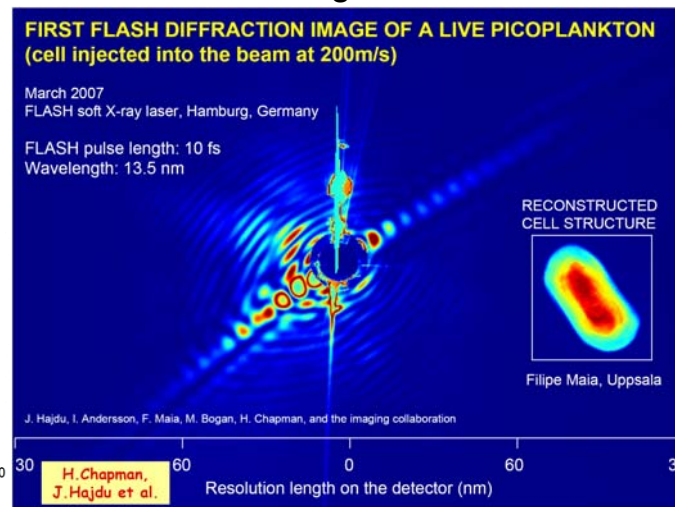
## Spectroscopy on Highly Charged Ions



## Resonant magnetic scattering with fs-pulses at 1.59 nm



## Single Particle Diffraction



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

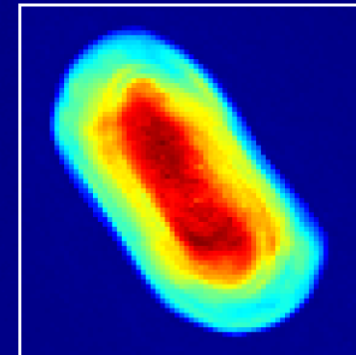
March 2007

FLASH soft X-ray laser, Hamburg, Germany

FLASH pulse length: 10 fs

Wavelength: 13.5 nm

RECONSTRUCTED  
CELL STRUCTURE



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

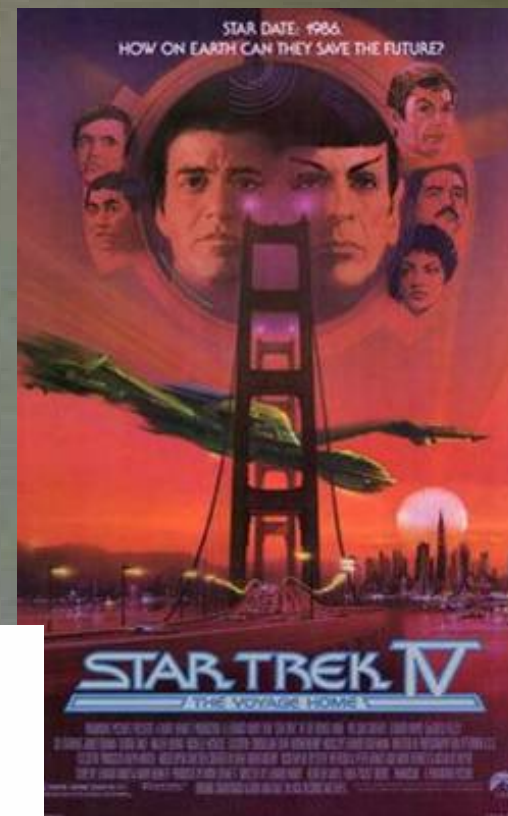
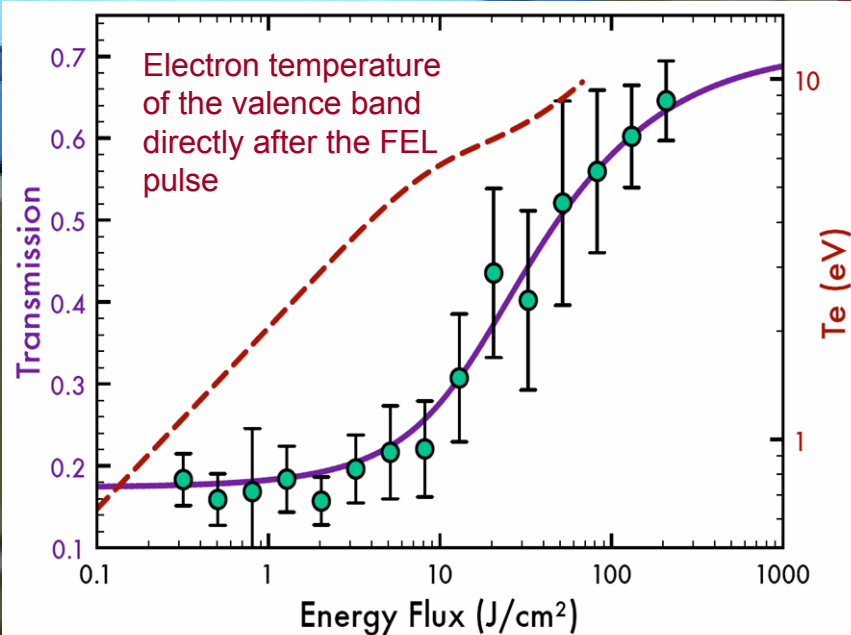
60

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   [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](http://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](http://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 aluminium by bombarding the metal with the world's most powerful soft ...  
[www.physorg.com/news167925273.html](http://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, ...  
[Classical states](#) - [Non-classical states](#) - [Low-temperature states](#)  
[en.wikipedia.org/wiki/State\\_of\\_matter](http://en.wikipedia.org/wiki/State_of_matter) - [Cached](#) - [Similar](#)

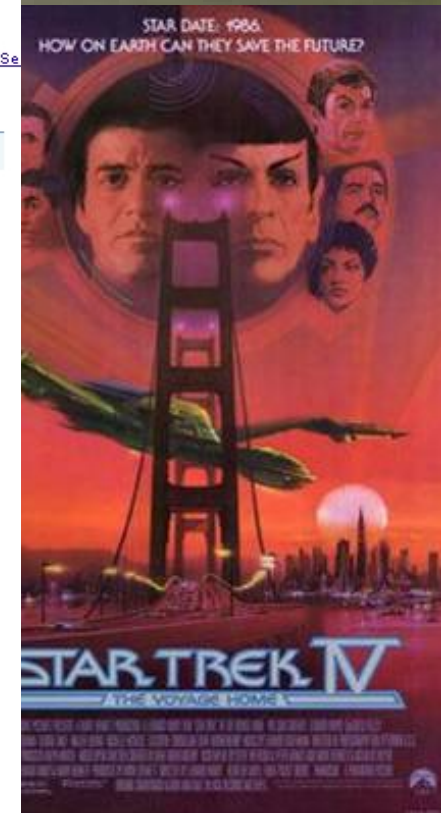
[Slashdot Technology Story | Transparent Aluminum Is "New State of ...](#)  
28 Jul 2009 ... The **new state of matter** that is being boasted about is one where a non-valent ...  
... "The real material is an exotic **new state of matter** with ...  
[tech.slashdot.org/.../Transparent-Aluminum-Is-New-State-of-Matter?...](http://tech.slashdot.org/.../Transparent-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/](http://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/](http://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](http://www.ox.ac.uk/media/news_stories/2009/090727_2.html) - [Cached](#) - [Similar](#)

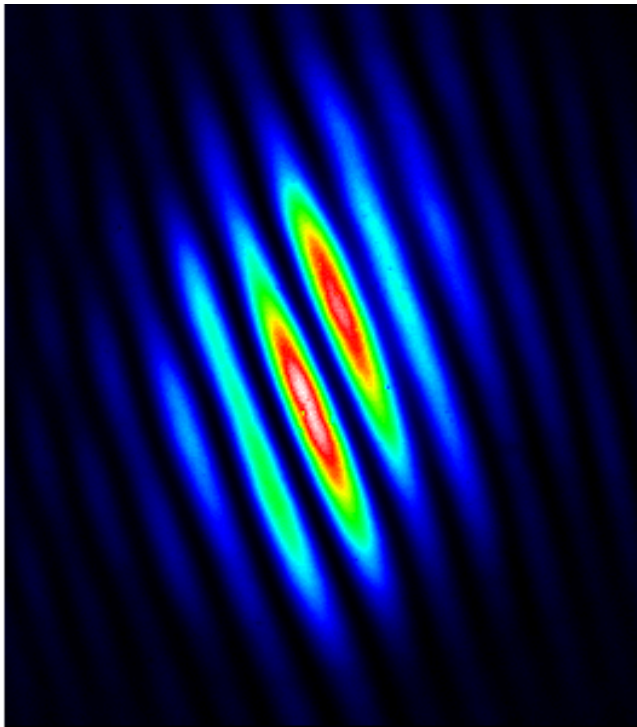
[New State of Matter: Transparent Aluminum - Science News | Science ...](#)  
29 Jul 2009 ... **New State of Matter:** Transparent Aluminum, Scientists claim to have created



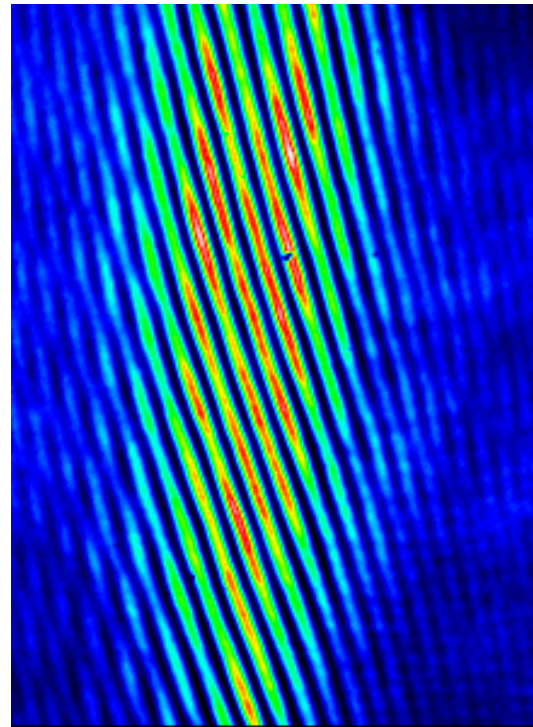
U. Nagler et al., Nature  
Physics 5, 693 (2009)

# Die FLASH Laserstrahlung ist kohärent

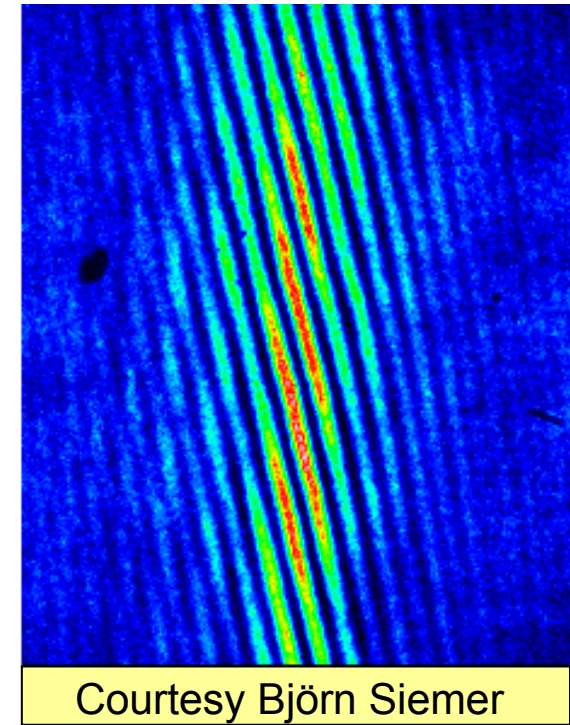
24 nm fundamental



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

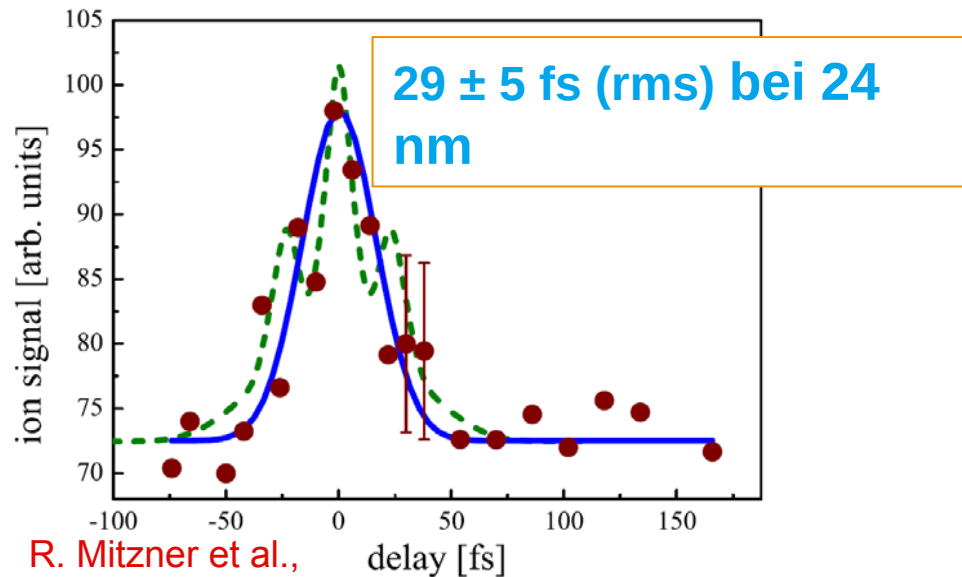
Pulslänge bei 24 nm: ~30 fs

U Münster (H. Zacharias), BESSY, DESY

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

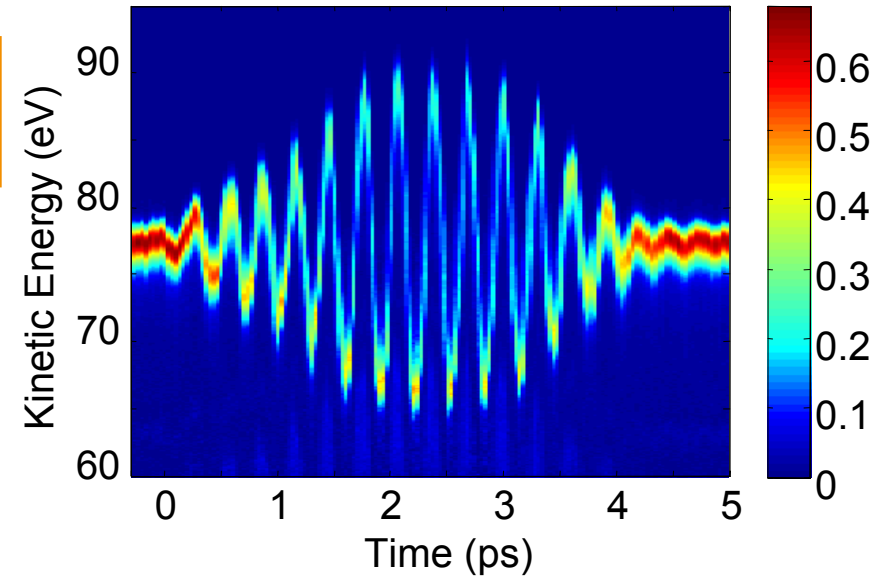
# Die FLASH Laserpulslängen sind unter 50 Femtosekunden

## He<sup>2+</sup> Autokorrelationsmessung



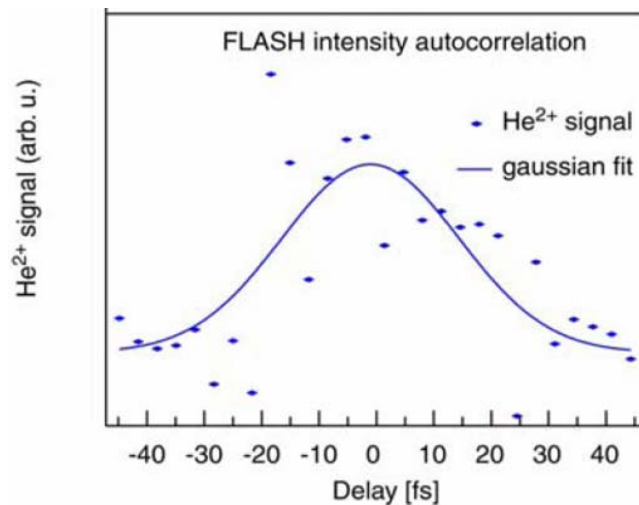
R. Mitzner et al.,  
Physical Review A 80, 025402 (2009)

## FIR/X Streak-Kamera



$15 \pm 3$  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

# 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

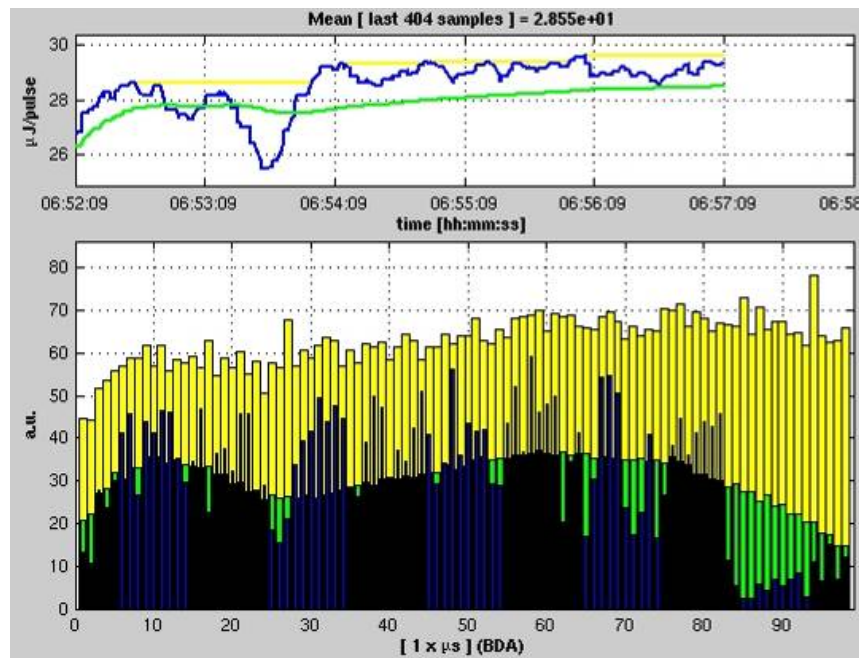
Deutsches Elektronen-Synchrotron  
Member of the Helmholtz Association



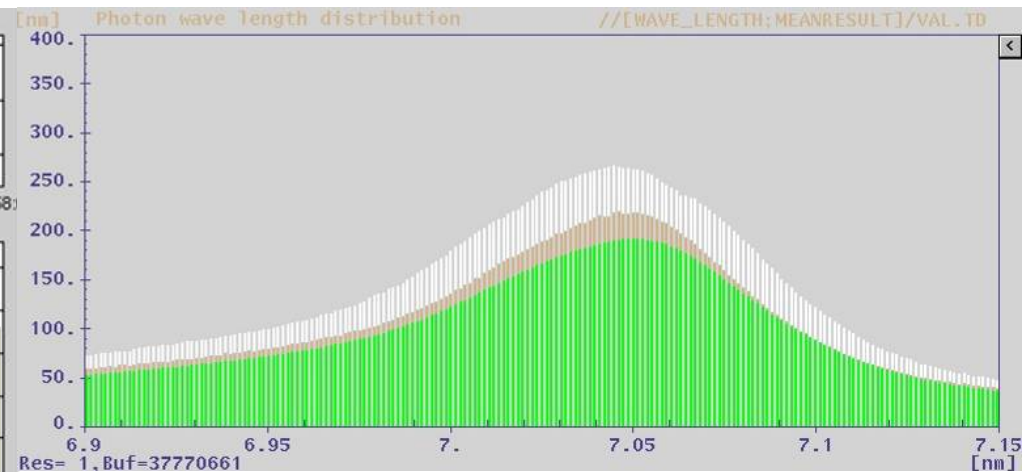
# Ausblick

# Lange Pulszüge bei 7 nm in 2008

- > 100 Pulse mit 500 kHz für zwei Experimente im März 2008
- > Wellenlänge  $7.05 \pm 0.1$  nm
- > Mittlere SASE Energie  $\sim 30 \mu\text{J}$  pro Puls, 14 mW mittlerer Leistung



Zahl der Pulse

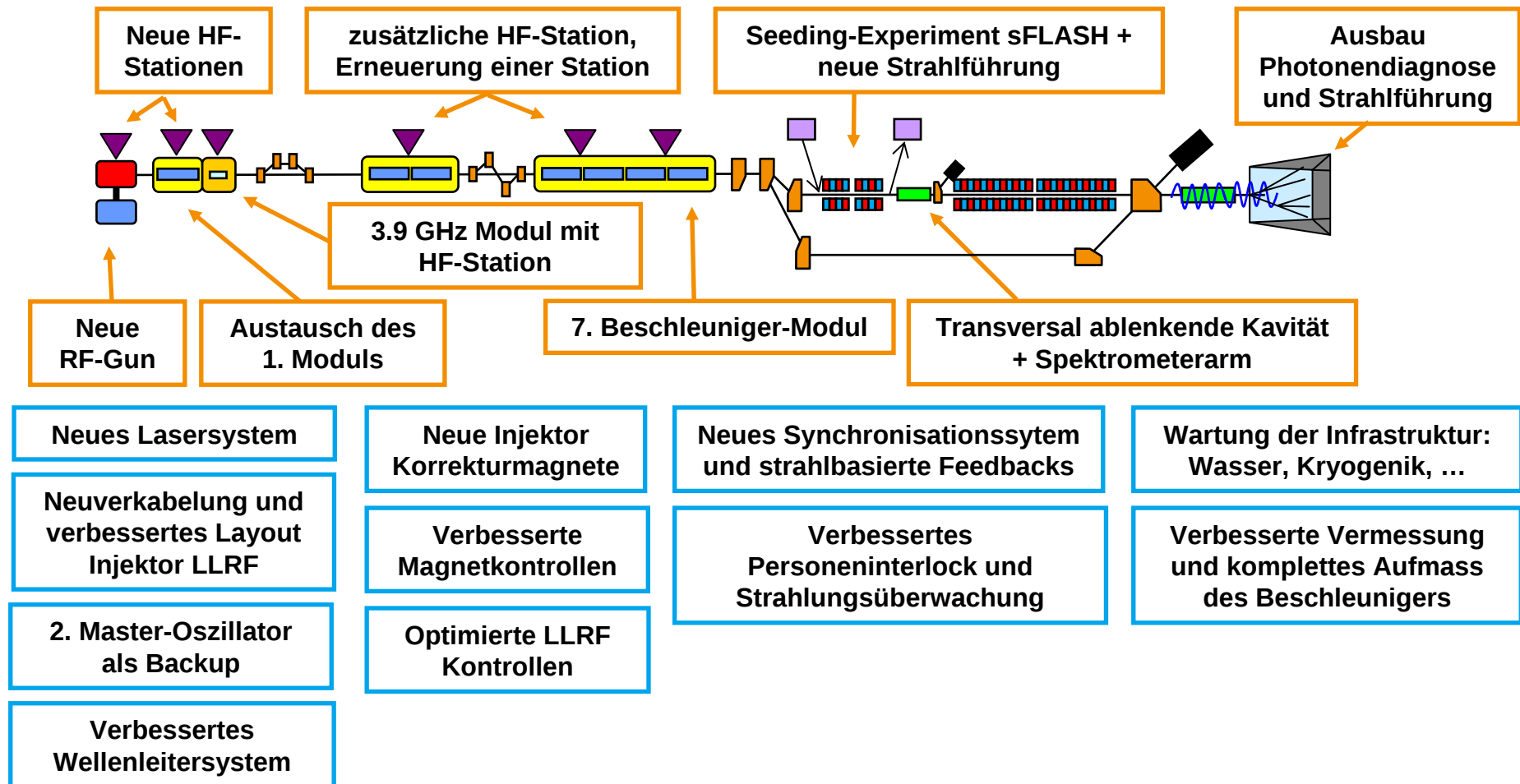


Wellenlänge (nm)

- > 350 Schichten Nutzerbetrieb mit weniger als 4 % Ausfallzeit
- > Erhöhung der Strahlenergie auf 1.2 GeV für Wellenlängen < 5 nm
- > Ausnutzen der neuen Möglichkeiten, die uns das 3.9 GHz-Modul bietet
  - flexible Pulslänge
  - und/oder mehr Energie pro Puls
- > Routinemäßiger Betrieb mit langen Pulszügen
  - einige Hundert bis Tausende Pulse pro Sekunde, je nach Bedarf des Experiments
- > Verbesserte Synchronisation und strahlbasierte Feedbacks
- > Erfolgreicher Betrieb von sFLASH
  - stabile Anregung mit einem externen Laser
  - Synchronisation des Lasers mit der FEL-Strahlung kleiner als 10 fs

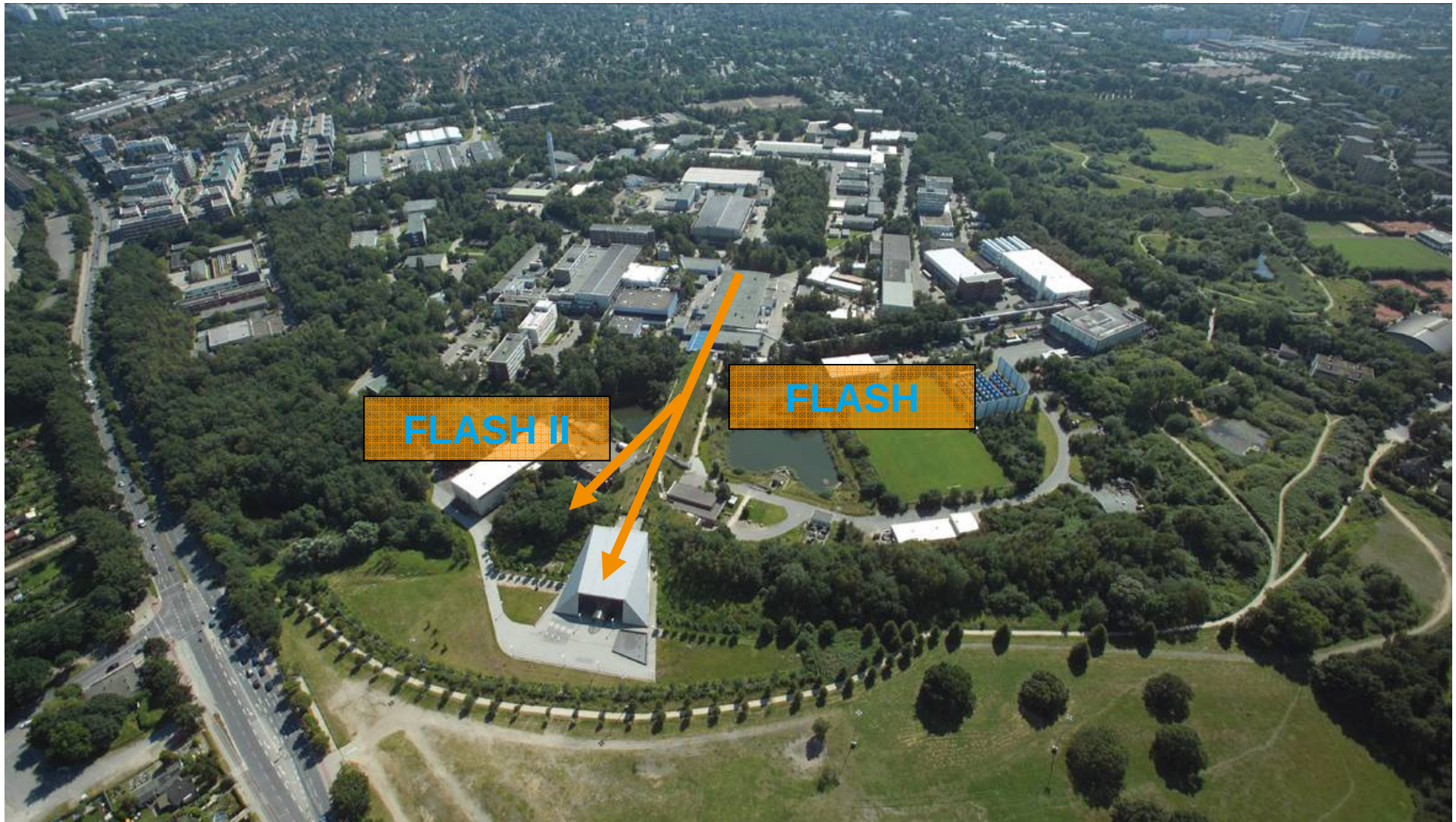
# Ausbau

# Ausbau 2009/2010



# 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
- > 95 Publikationen 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