

PITZ-Status und Zukunftsstrategie

Basierend auf der Präsentation von Houjun Qian
auf der Liebenbergklausur am 7.12.2016

Inhalt:

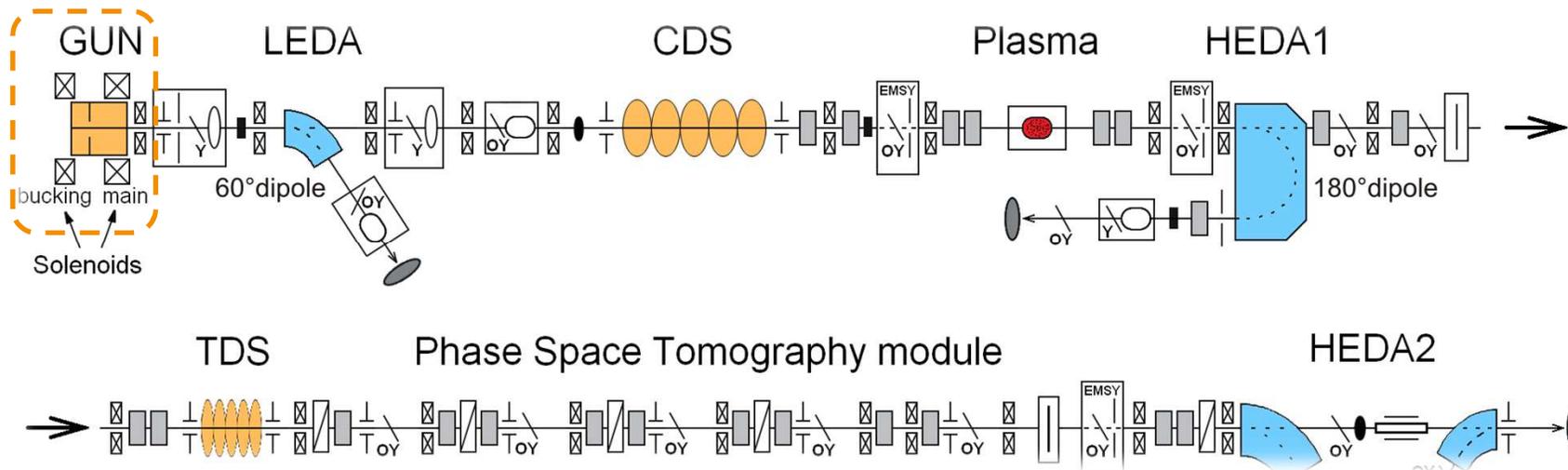
- PITZ und die PITZ-Kollaboration
- Verhandlungen mit der XFEL GmbH
- Forschung-Highlights und Zukunftsthemen
- Zusammenfassung

A. Oppelt
Technisches Seminar
7. Februar 2017

Entwicklung und Anwendungen einer hochbrillianten Elektronenquelle

> PITZ - eine einzigartige Photoemissions-Elektronenquelle

- **Gun:** hoher Beschleunigungsgradient mit langen HF-Pulsängen (~ 60 MV/m, 650 μ s, 10 Hz)
- **Photokathodenlaser:** MHz-Pulszug @ 10 Hz (10^3 - 10^4 Pulse/s), mit Möglichkeit der 3D-Formung
- **Strahldiagnose:** 6D-Phasenraummessungen des Elektronenstrahls (räumliche und zeitliche Verteilungen, Impulsverteilungen)
- **Strahlqualität und Flexibilität:** zeitgemäße Elektronenquelle für FLASH & XFEL, nahezu beliebige zeitliche Strahlprofile (Gauss, Rechteck, Dreieck, Ellipsoid, ultrakurz, quasi-CW...)
- **Anwendungen:** XFEL-Quelle, THz-Pumpquelle, Elektronenbeugung, Plasmaexperimente für neue Beschleunigerkonzepte, Labor-Astrophysik, Testanlage für XFEL + neue Ideen...



PITZ-Kollaborationspartner

> Founding partners of PITZ:

- [DESY. HH&Z](#) (leading institute)
- [HZB \(BESSY\)](#): magnets, vacuum
- [MBI](#) (S. Eisebitt): cathode laser
- [TU Darmstadt](#) (TEMF, T. Weiland, H. DeGersem): simulations

> Other national partners:

- [Hamburg university](#):
 - most PhD students;
 - HGF-Vernetzungsfond;
 - generation of short pulses
 - plasma experiments
- [HZDR](#):
 - BMBF-PC-laser-project between MBI, DESY and HZDR, until ~2009;
 - collaboration between HZB, HZDR, MBI and DESY in SC-gun-cluster

> International partners:

- [STFC Daresbury](#) (S. Smith, B. Militsyn): phase space tomography
- [INR Troitsk](#) (L. Kravchuk): CDS, TDS, Gun5

- [INRNE Sofia](#) (D. Tonev, G. Asova): EMSY + personnel
- [LAL Orsay](#) (A. Stocchi): HEDA1 + HEDA2
- [IAP Nizhny Novgorod + JINR Dubna](#): 3D elliptical laser pulses, THz radiation
- [INFN Milano](#) (C. Pagani): photocathodes
- [INFN Frascati + Uni Roma II](#) (L. Palumbo, M. Ferrario): TDS and E-meter pre-studies
- [YERPHI Yerevan](#) (V. Nikoghosyan): personnel
- [Thailand Center of Excellence in Physics](#) (T. Vilaithong, Ch. Thongbai): personnel



mit Kollaborationsvertrag

Verhandlungen mit der XFEL GmbH (Stand Nov. 2016)

- > **Hintergrund:** Um geplante Astroteilchenphysik-Aktivitäten in Zeuthen zu ermöglichen, muss zukünftig $\sim 1/3$ des derzeitigen PITZ-Budgets aus externen Mitteln gedeckt werden, z.B. durch die Finanzierung der für den Europäischen Röntgenlaser (XFEL) interessanten Forschungsthemen durch die XFEL GmbH
- > **Derzeitiger Status:** obwohl noch nicht im DESY-XFEL-MAC (Machine Advisory Committee) ausdiskutiert, wurden die zukünftigen Beiträge der XFEL-GmbH an PITZ mit den verantwortlichen Personen abgestimmt
 - Finanzierung **ab ~Mitte 2017**, derzeitiger Planungshorizont **bis 2021**

Verhandlungen mit der XFEL GmbH (Stand Nov. 2016)

> Aus dem XFEL-**Betriebs**budget:

- **Unterstützung XFEL-Betrieb** (4 Wochen PITZ-Betrieb + 1 Physiker für die Verbesserung gepulster Elektronenquellen)
- ggf. **Bau und Konditionierung einer weiteren gepulsten Gun** (16 Betriebswochen)

> Aus dem XFEL-**Forschungs**budget (vorläufig, da Budget noch nicht fixiert):

- **Forschung an ellipsoiden Elektronenpaketen** (2 Wochen PITZ-Betrieb zum Studium spezieller zeitlicher Laserpulsformung)
- **Entwicklungsarbeiten für eine normalleitende 216 MHz-CW-Gun** (4 Betriebswochen für grundlegende CW-Gun-Studien (Strahldynamik, grüne Kathoden) + 1 Physiker für die Konstruktionsvorbereitung + Basisbudget für die Konstruktion einer CW-Gun)
- personelle Unterstützung zwischen 1,5-3 FTE

Verhandlungen mit der XFEL GmbH (Stand Nov. 2016)

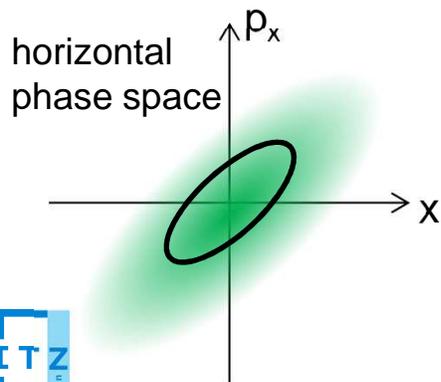
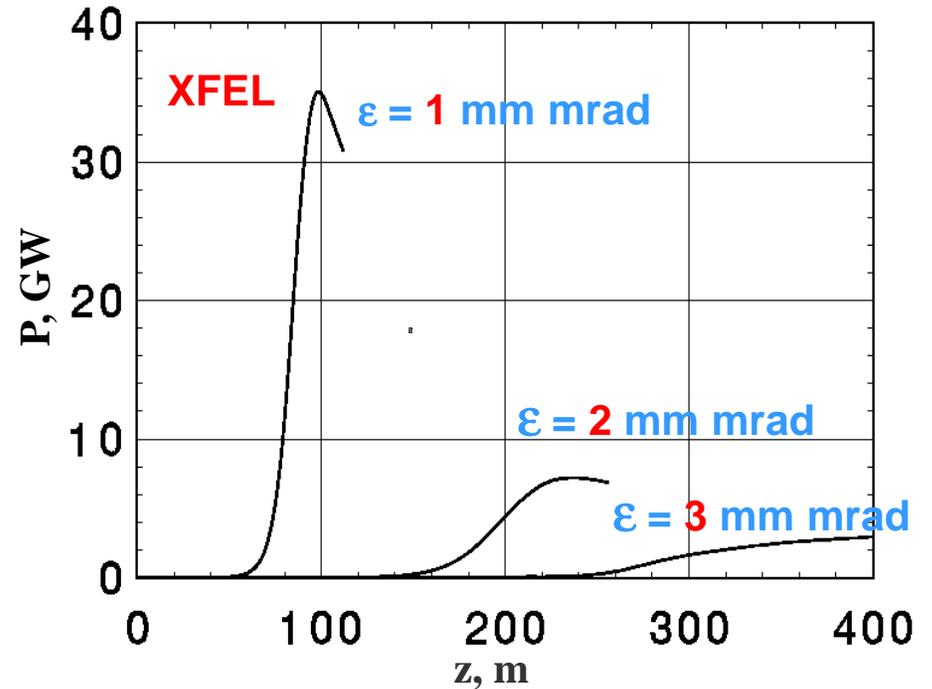
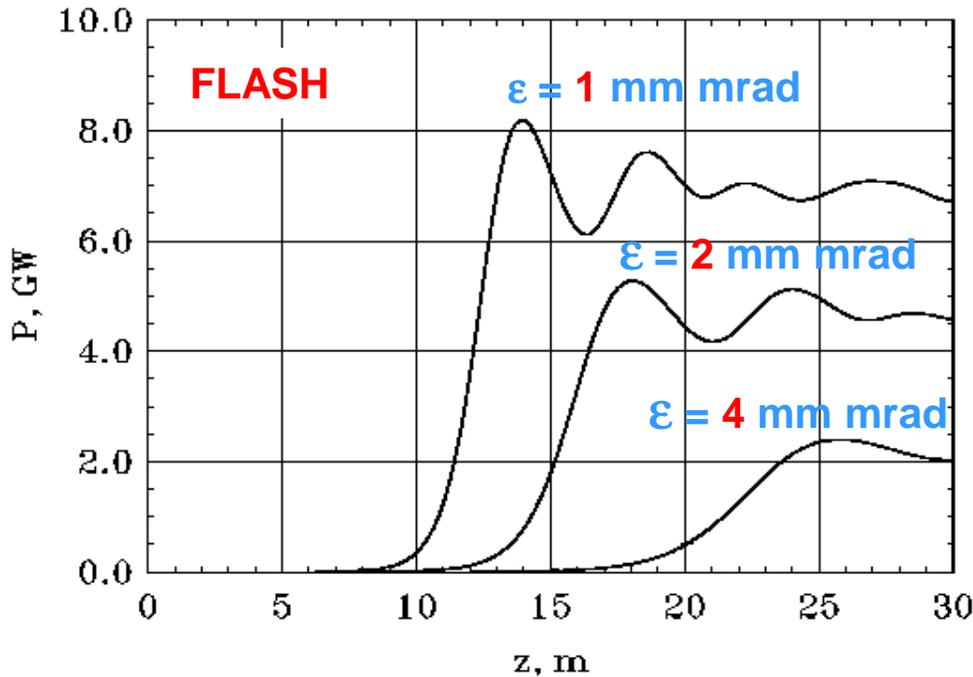
- > PITZ wird auch **nach 2021** mit mindestens dem gleichen Aktivitätsniveau weiterlaufen wie jetzt – wenn weitere Guns konditioniert werden sollen, sogar intensiver
- > eine **signifikante Beteiligung** wird von der XFEL GmbH kommen
 - höhere Zuverlässigkeit in Betriebs- und Umbauperioden ist notwendig
 - gemeinsame Anstrengung von technischem und wissenschaftlichem Personal bei PITZ
- > **langfristige Zukunft der Beschleunigerphysik** in Zeuthen ist gesichert
 - detaillierte Planung ab 2018 ist derzeit im Rahmen von POF IV in Vorbereitung

Forschungs-Highlights und Zukunftsthemen

- > Verbesserungen der Elektronenquelle für den XFEL
 - Gun4.6: Verbesserungen und Resultate
 - 3D-Laserformung für verbesserte Strahlqualität
 - Design und Konstruktion von Gun 5
- > neue Beschleunigerkonzepte: Plasmabeschleunigung
 - Selbstmodulation
 - Hohes Transformationsverhältnis
 - Astrophysik im Labor
- > Entwicklung einer CW-Gun bei PITZ
- > Anwendungen von bei PITZ erzeugten Elektronenstrahlen
 - THz-Quelle für Pump/Probe-Experimente
 - Kurze Elektronenpakete für Elektronenbeugungs-Experimente

Eine zuverlässige Quelle für den Europäischen Röntgenlaser

- von der Elektronenquelle produzierte Strahlqualität (Emittanz) ist kritischer Parameter für Freie-Elektronen-Laser (FEL)



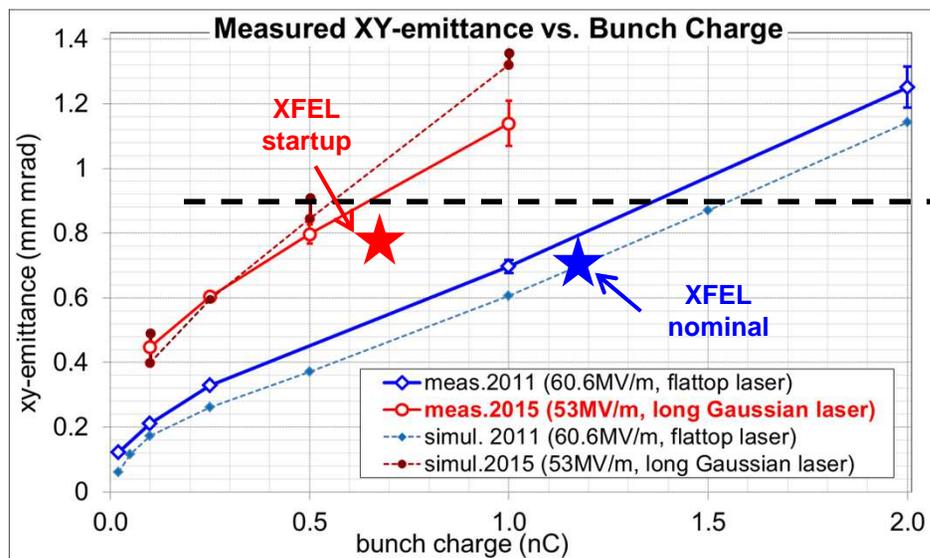
$$\frac{\epsilon_n}{\gamma} \sim \frac{\lambda_{x\text{-ray}}}{4\pi}$$

Phase space match between XFEL radiation and e beam

	FLASH	XFEL
Max Elektronen-Energie	1 GeV	17.5 GeV
Min Photon-Wellenlänge	4.1 nm	0.05 nm
Ideale Strahlemittanz	0.64 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	0.14 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$

Eine zuverlässige Quelle für den Europäischen Röntgenlaser

- bei PITZ produzierte Strahlqualität (Emittanz) ist Weltspitze: Zielparameter für Standardbetrieb des XFEL wurden bereits 2011 erreicht



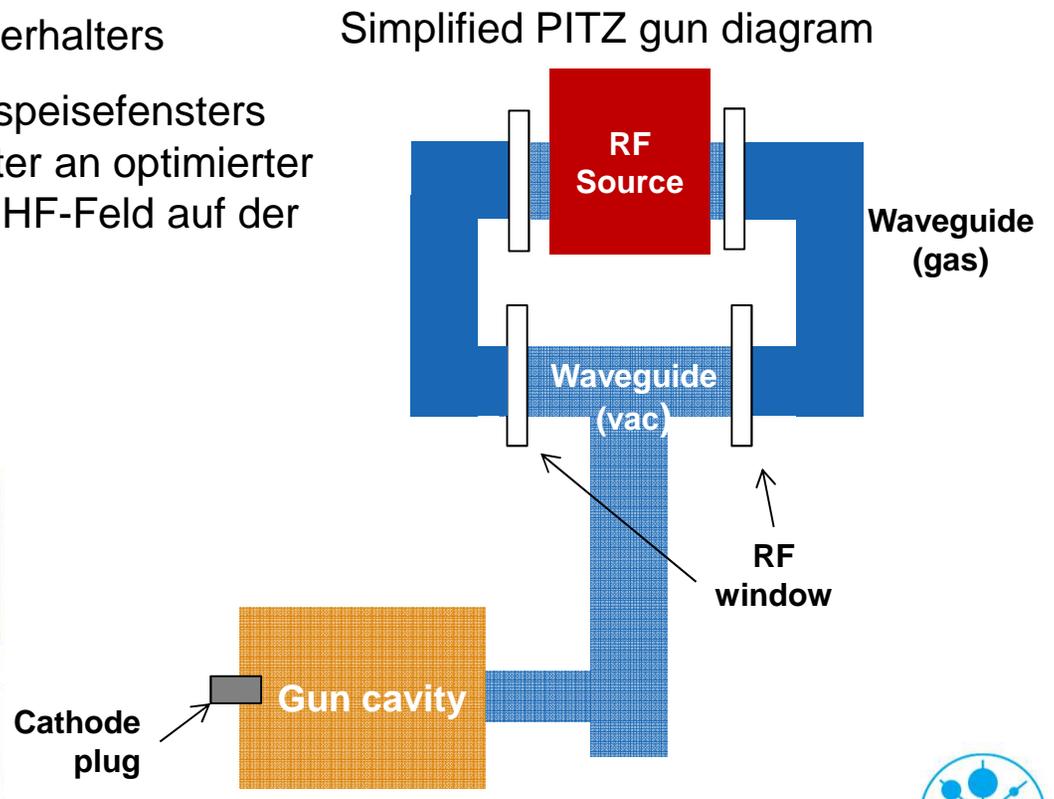
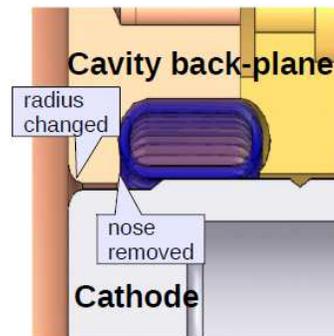
XFEL-Spezifikation
Injektor: 0.9 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$

	Peak acc gradient	RF pulse length
XFEL startup	53 MV/m	650 μs x 10 Hz
XFEL nominal	60 MV/m	650 μs x 10 Hz

- Schwierigkeiten mit der Zuverlässigkeit der Gun im Dauerbetrieb bei hohen Gradienten: Parameter für XFEL-Inbetriebnahme wurden reduziert
- diverse Verbesserungen wurden 2016 erfolgreich mit Gun4.6 getestet

Eine zuverlässige Quelle für den Europäischen Röntgenlaser

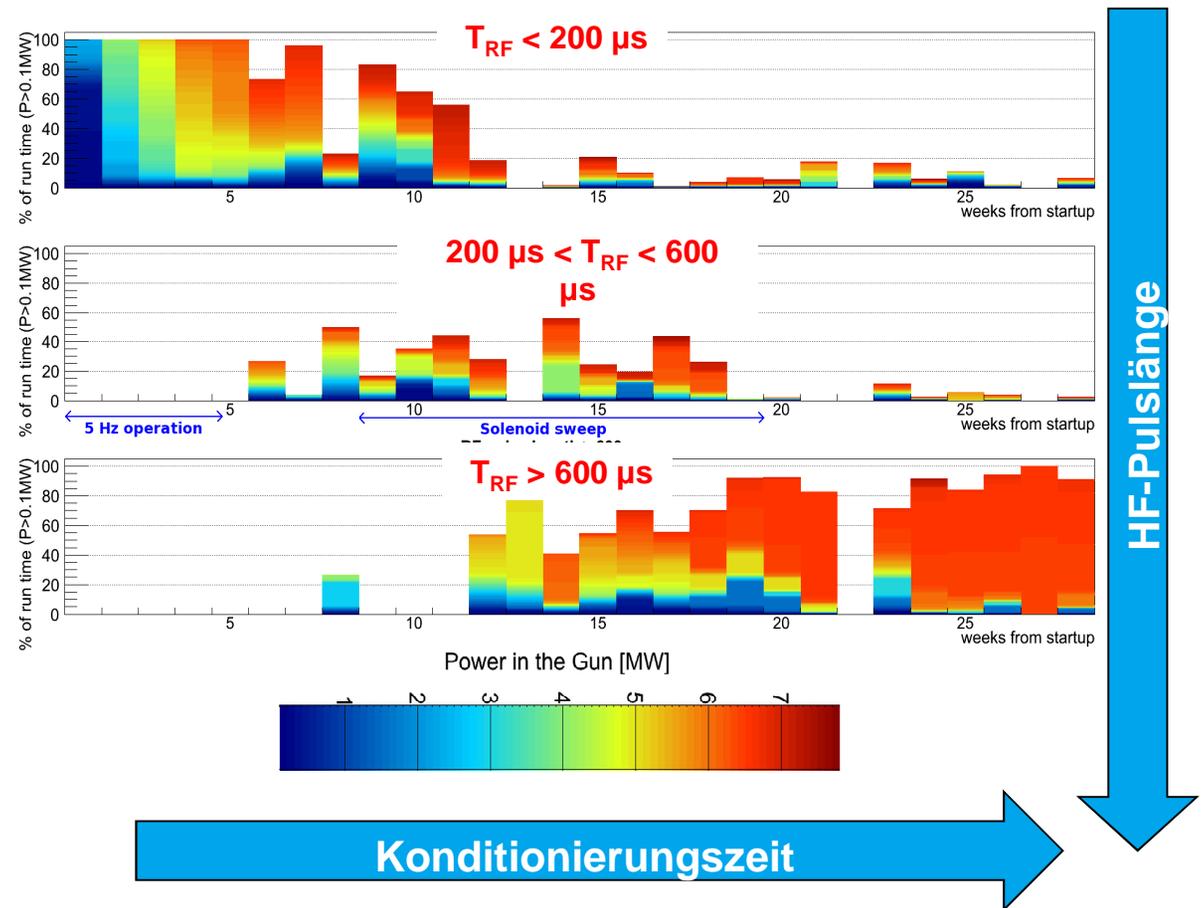
- > Betrieb von Gun4.6 mit höherem Gradienten und größerer Zuverlässigkeit mit dem Ziel: 99% Verfügbarkeit bei 60 MV/m
- > Zwei Schwachpunkte früherer Guns wurden ausgemerzt
 - HF-Überschläge in der Gun am Kathodenfederhalter aufgrund schlechten HF-Kontakts
→ neues Design des Kathodenfederhalters
 - HF-Entladungen nahe des HF-Einspeisefensters
→ zwei vorkonditionierte HF-Fenster an optimierter Position reduzieren das maximale HF-Feld auf der Fensterkeramik



Eine zuverlässige Quelle für den Europäischen Röntgenlaser

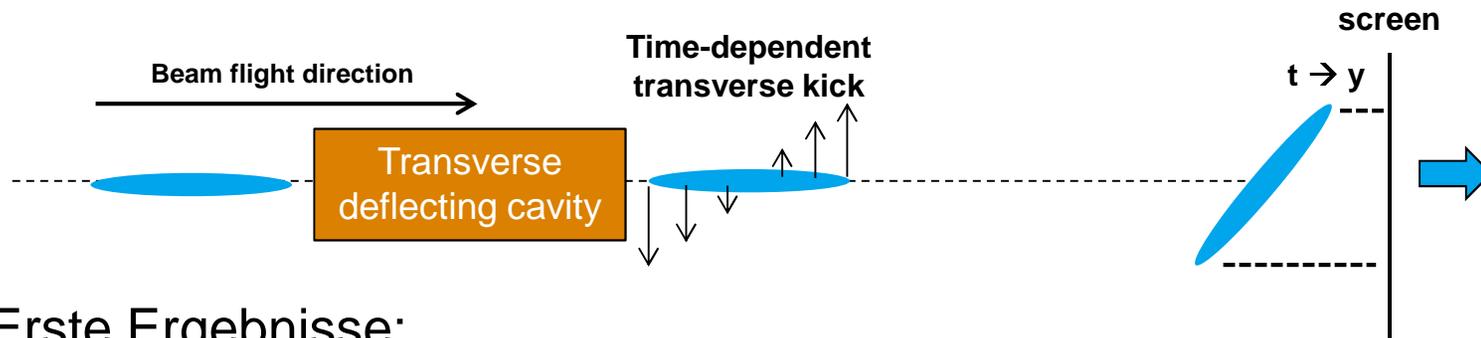
> Verbesserung von Gradient und Stabilität mit Gun4.6 im Jahr 2016

- Ausfallzeiten nehmen immer mehr ab, auch durch zeitsparende Prozeduren beim Neustart nach Ausfällen

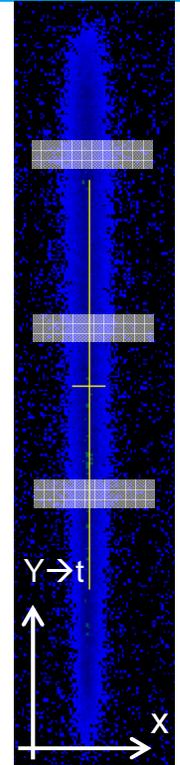
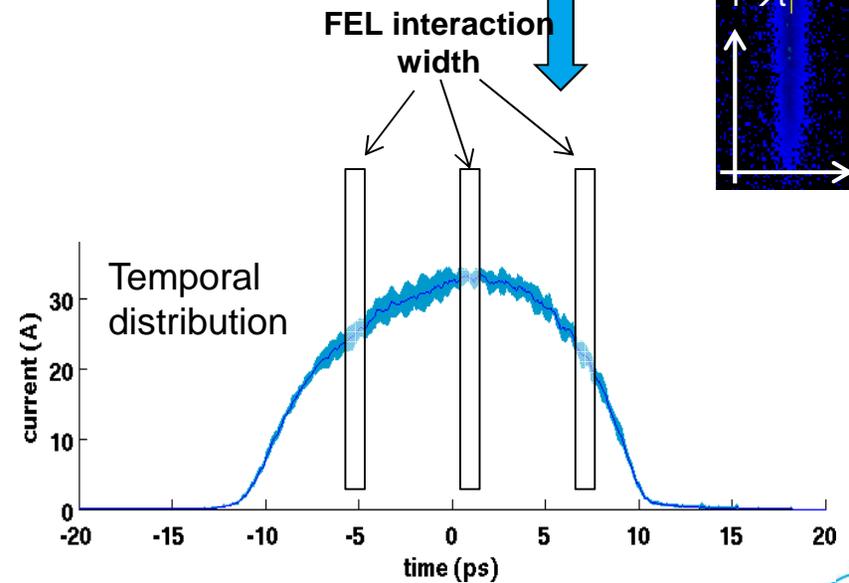
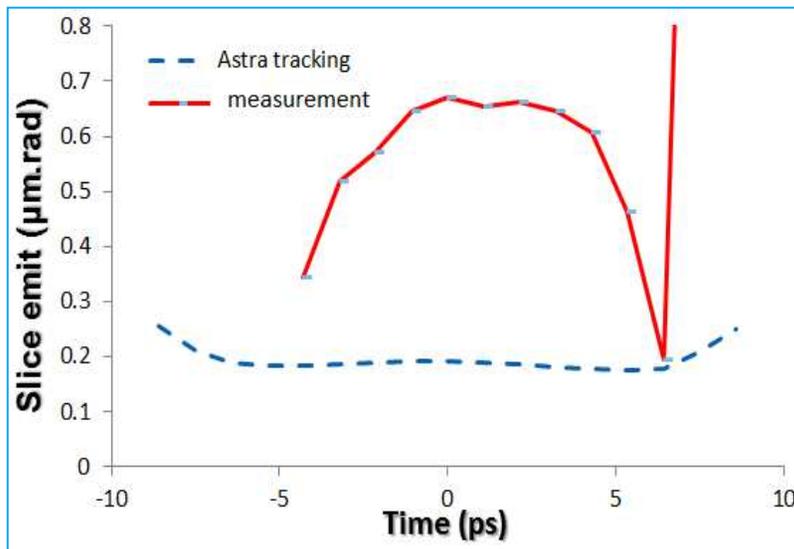


Phasenraumvermessung mit Gun 4.6

- zeitaufgelöste Emittanzmessungen (slice emittance)

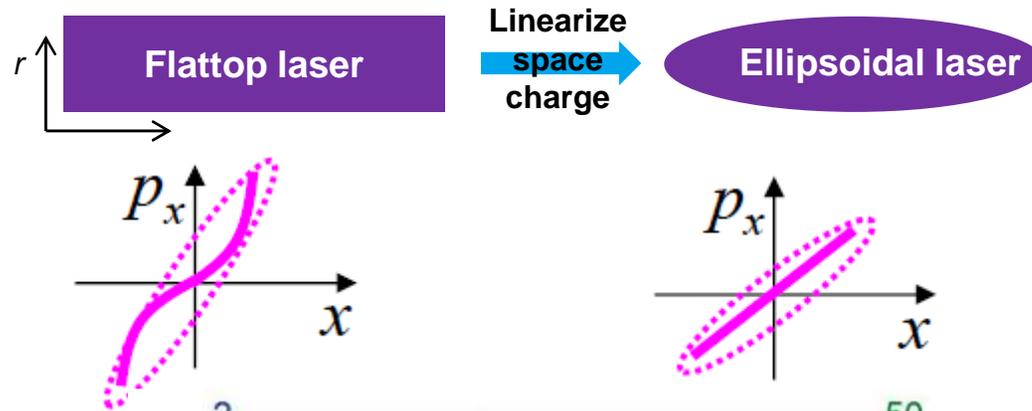


- Erste Ergebnisse:

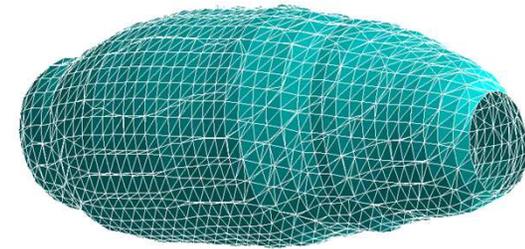


3D-Laserpulsformung

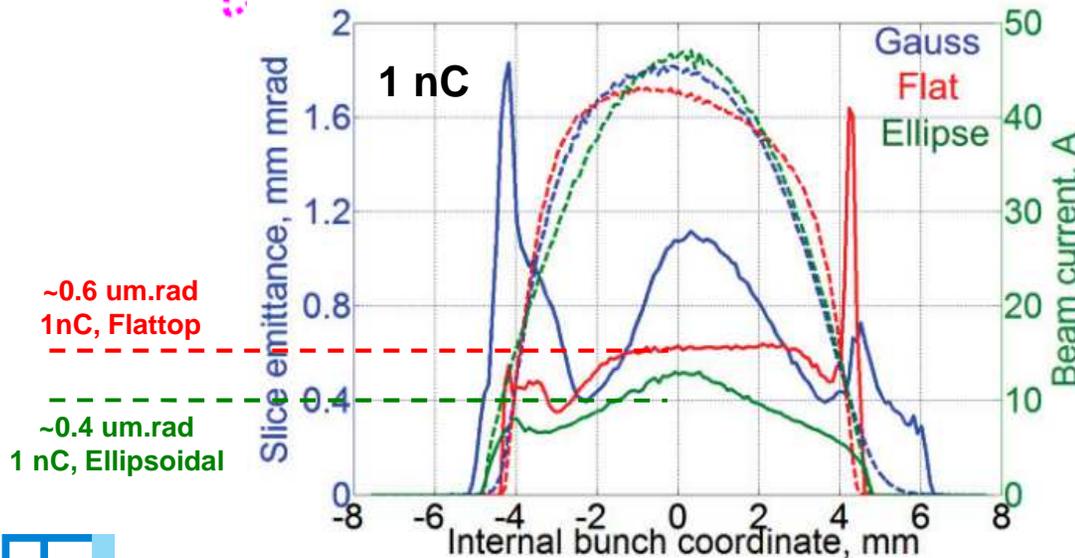
- 3D-ellipsoide Laserpulse versprechen verbesserte Strahlqualität durch ~30% Reduktion der Slice-Emittanz



Laserpulsform (gemessen)



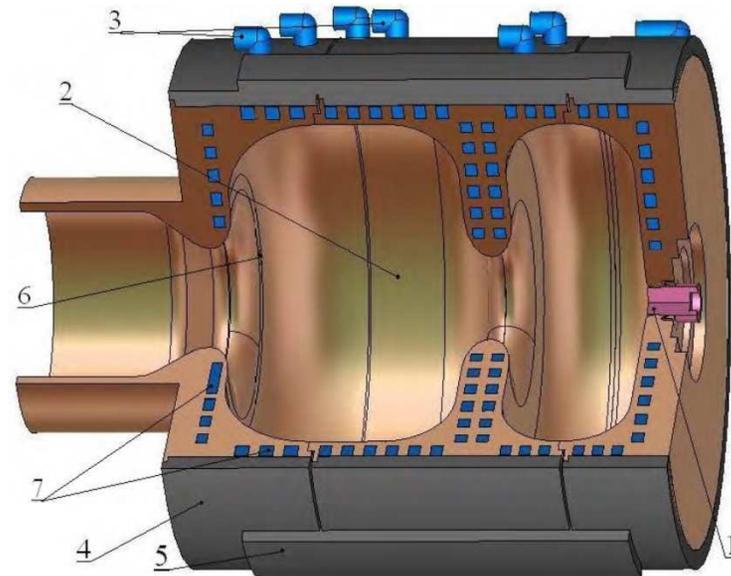
$$\frac{x^2}{R^2} + \frac{y^2}{R^2} + \frac{z^2}{L^2} = 1$$



Demonstration der Technologie bei PITZ, danach Transfer von Know-How zu XFEL:
→ FEL-Leistungssteigerung

Design und Konstruktion von Gun 5

- Gun5 - eine Gun für höhere Stabilität und Zuverlässigkeit
- besondere Merkmale:
 - Verbesserte Zellengeometrie: verminderte Erwärmung durch HF-Pulse, weniger Dunkelstrom
 - Verbesserte Wasserkühlung: 10 Hz → 25 Hz
 - HF-Antenne in der Gun: Feinkontrolle der HF-Stabilität
- Planung:
 - 2016: technisches Design
 - 2017: Fabrikation
 - 2018: Einbau / Konditionierung

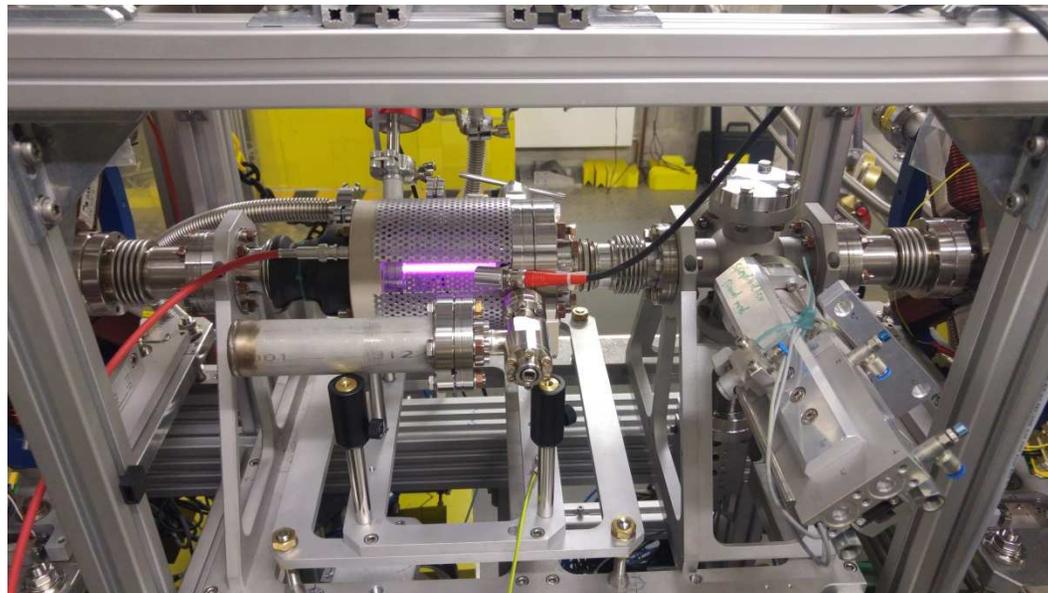


Forschungs-Highlights und Zukunftsthemen

- > Verbesserungen der Elektronenquelle für den XFEL
 - Gun4.6: Verbesserungen und Resultate
 - 3D-Laserformung für verbesserte Strahlqualität
 - Design und Konstruktion von Gun 5
- > neue Beschleunigerkonzepte: Plasmabeschleunigung
 - Selbstmodulation
 - Hohes Transformationsverhältnis
 - Astrophysik im Labor
- > Entwicklung einer CW-Gun bei PITZ
- > Anwendungen von bei PITZ erzeugten Elektronenstrahlen
 - THz-Quelle für Pump/Probe-Experimente
 - Kurze Elektronenpakete für Elektronenbeugungs-Experimente

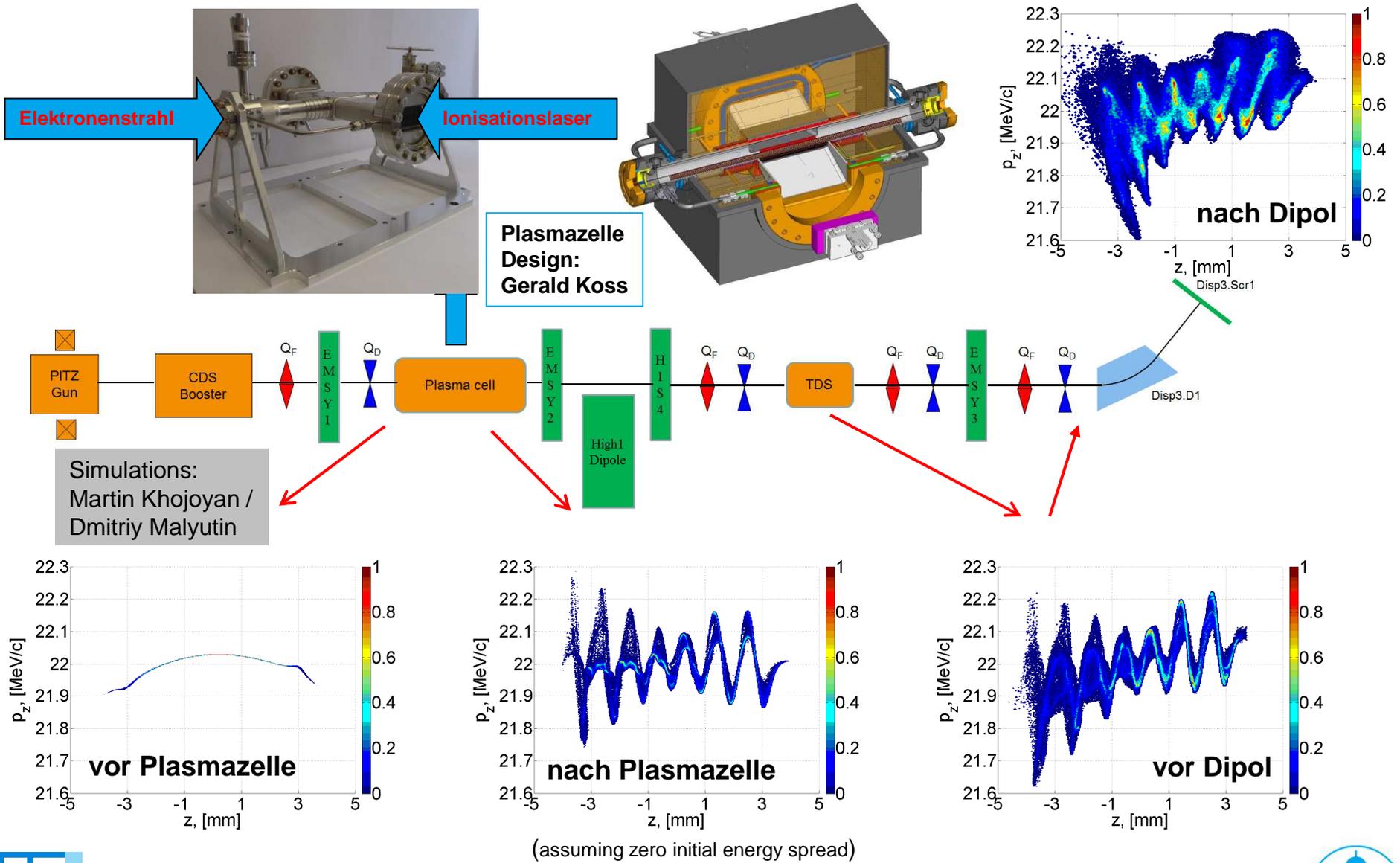
Plasmaexperimente bei PITZ

- PITZ hat im letzten Jahr zwei verschiedene Plasmazellen eingebaut und erfolgreich betrieben
- Lithium-Plasmazelle
 - Vorteil: gut definierte und justierbare Länge des Plasmakanals; Erzeugung beliebiger Plasmaprofile ist prinzipiell möglich
- Gasentladungs-Plasmazelle
 - Vorteil: einfaches Prinzip; leicht skalierbar, z.B. für Labor-Astrophysik-Experimente



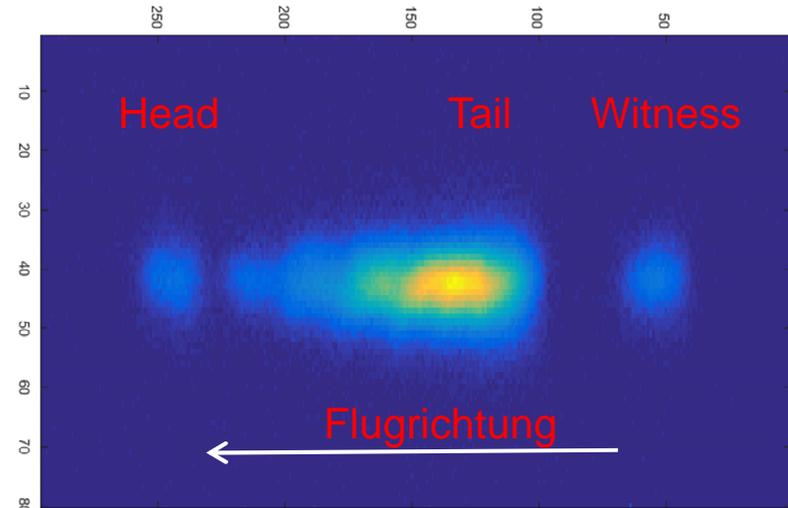
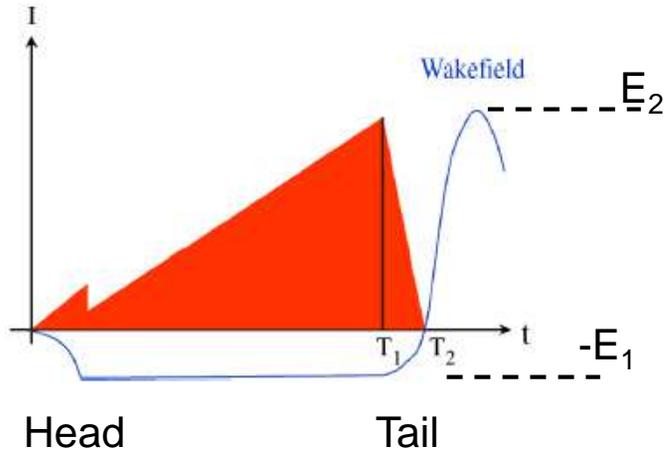
Gasentladungs-Plasmazelle
in der PITZ-Beamline

Selbstmodulation langer Elektronenpakete bei PITZ



Hohes Transformationsverhältnis (HTR)

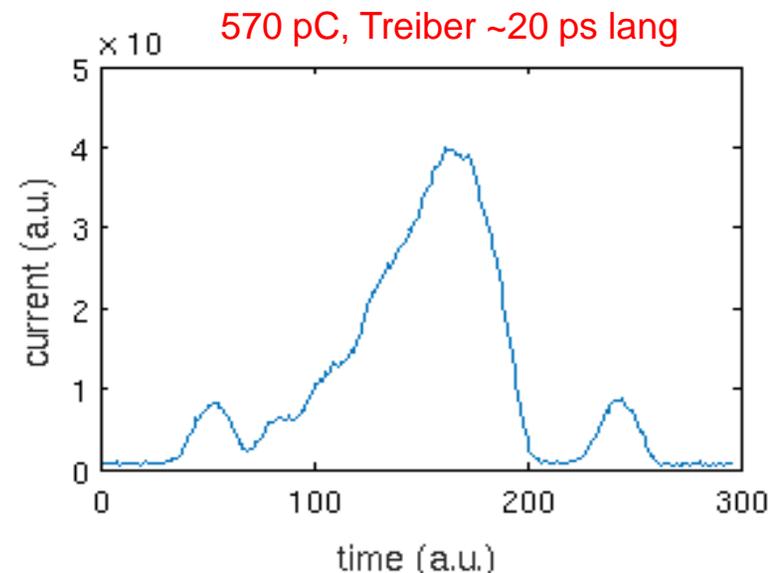
“Doppeldreieck”-Treiber



Effizienz der Plasmabeschleunigung:

Transformationsverhältnis $TR = E_2/E_1$

$\Delta E_k(\text{witness}) < TR * \Delta E_k(\text{driver})$



**Erste Plasmabeschleunigung
bei PITZ wurde gezeigt!**

Zukünftige Plasmaexperimente: Beliebige Plasmaprofile

- einmalige Li-Plasmazelle mit seitlichen Fenstern für den Ionisationslaser → Option: Filter für Dichteabstufungen oder Erzeugung beliebiger Plasmaprofile

Ramp

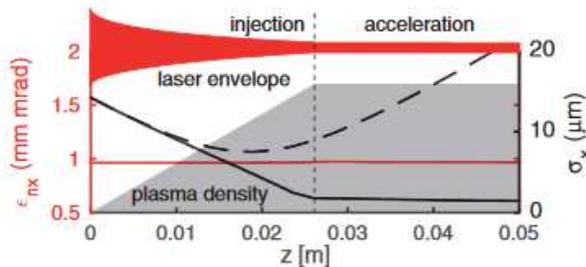
PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 18, 041302 (2015)

Emittance conservation by tailored focusing profiles in a plasma accelerator

I. Dornmair,^{1,2} K. Floetmann,³ and A. R. Maier^{1,2,*}
¹CCEL, Center for Free-Electron Laser Science, 22607 Hamburg, Germany
²University of Hamburg, Institute of Experimental Physics, 22761 Hamburg, Germany
³DESY, 22607 Hamburg, Germany
 (Received 10 July 2014; published 30 April 2015)

Laser-plasma accelerators, providing high electric field gradients, are promising candidates to drive next-generation compact light sources and high-energy applications. However, conservation of beam emittance, a prerequisite for future applications, is very challenging, as the accelerated beam has to be matched to the plasma's strong focusing forces. Here we derive with simulations ideal laser and plasma density profiles to match an electron beam in and out of a plasma stage, thus relaxing required beta functions for injection and minimizing divergence and emittance growth after the plasma.

DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.18.041302 PACS numbers: 29.27.-a, 41.75.Fr, 41.85.Ar, 52.38.Kd



Emittance conservation

Step

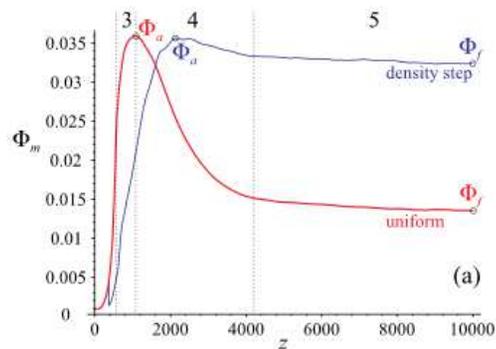
PHYSICS OF PLASMAS 22, 103110 (2015)

Physics of beam self-modulation in plasma wakefield accelerators

K. V. Lotov^{1,2}
¹Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia
²Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, 630090 Novosibirsk, Russia

(Received 16 June 2015; accepted 1 October 2015; published online 15 October 2015)

The self-modulation instability is a key effect that makes possible the usage of nowadays proton beams as drivers for plasma wakefield acceleration. Development of the instability in uniform plasmas and in plasmas with a small density up-step is numerically studied with the focus at nonlinear stages of beam evolution. The step parameters providing the strongest established wakefield are found, and the mechanism of stable bunch train formation is identified. © 2015 AIP Publishing LLC. [http://dx.doi.org/10.1063/1.4933129]



Max gradient optimization

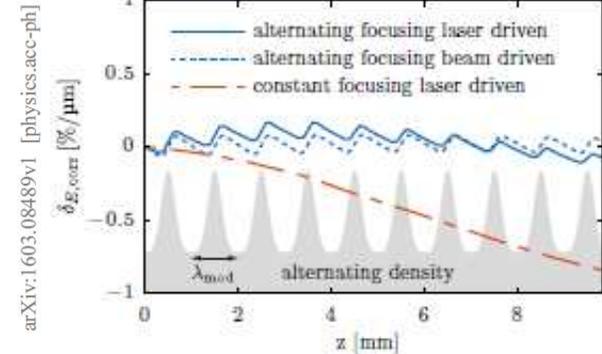
Modulation

Chirp mitigation of plasma-accelerated beams using a modulated plasma density

R. Brinkmann,¹ N. Delbos,² I. Dornmair,² R. Assmann,¹ C. Behrens,¹ K. Floetmann,¹ J. Grebenyuk,¹ M. Gross,³ S. Jales,² M. Kirchen,² T. Mehrling,¹ A. Martinez de la Ossa,⁴ J. Osterhoff,¹ B. Schmidt,¹ V. Wacker,¹ and A. R. Maier^{2,*}
¹Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Notkestr. 85, 22607 Hamburg, Germany
²Center for Free-Electron Laser Science & Department of Physics University of Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg, Germany
³Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Platanenallee 6, 15738 Zeuthen, Germany
 (Dated: March 29, 2016)

Plasma-based acceleration offer the possibility to drive future compact light sources and high-energy physics applications. Achieving good beam quality, especially a small beam energy spread, is still one of the major challenges. For stable transport, the beam is located in the focusing region of the wakefield which covers only the slope of the accelerating field. This, however, imparts a longitudinal energy correlation (chirp) along the bunch. Here, we propose an alternating focusing scheme in the plasma to mitigate the development of this chirp and thus maintain a small energy spread.

PACS numbers: 29.27.-a, 41.75.Fr, 52.38.Kd, 52.40.Mj



Energy chirp control

Zukünftige Plasmaexperimente: Astrophysik im Labor

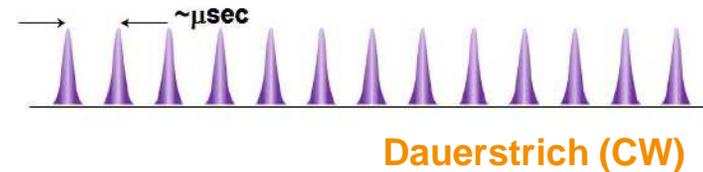
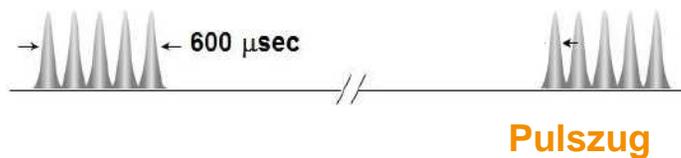
- Idee: nutze eine Plasmazelle, um astrophysikalische Prozesse im Labor skaliert nachzustellen
- DSF-Project: Nachweis von *Bell's instability*
 - Kollaboration von THAT (Martin Pohl), PITZ (Frank Stephan) and FLA (Jens Osterhoff)
 - Simulationsstudien zum Abstecken der Parameter haben begonnen
 - **Im besten Fall: erste Experimente zum Ende der 2-Jahres-Periode**
- andere astrophysikalische Phänomene könnten später getestet werden

Forschungs-Highlights und Zukunftsthemen

- > Verbesserungen der Elektronenquelle für den XFEL
 - Gun4.6: Verbesserungen und Resultate
 - 3D-Laserformung für verbesserte Strahlqualität
 - Design und Konstruktion von Gun 5
- > neue Beschleunigerkonzepte: Plasmabeschleunigung
 - Selbstmodulation
 - Hohes Transformationsverhältnis
 - Astrophysik im Labor
- > **Entwicklung einer CW-Gun bei PITZ**
- > Anwendungen von bei PITZ erzeugten Elektronenstrahlen
 - THz-Quelle für Pump/Probe-Experimente
 - Kurze Elektronenpakete für Elektronenbeugungs-Experimente

Entwicklung einer CW-Gun für den XFEL-Upgrade

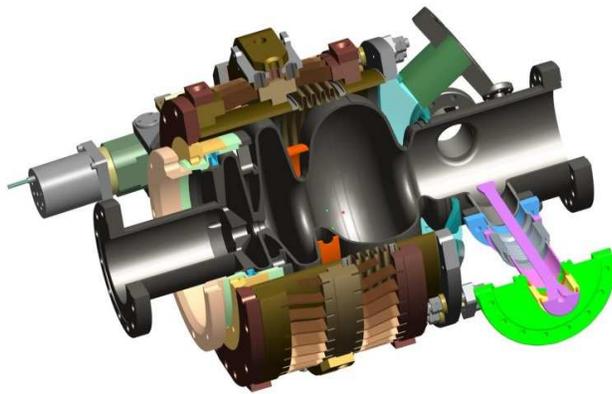
- Elektronenquelle für Dauerstrich-Betrieb (CW) von FLASH und XFEL



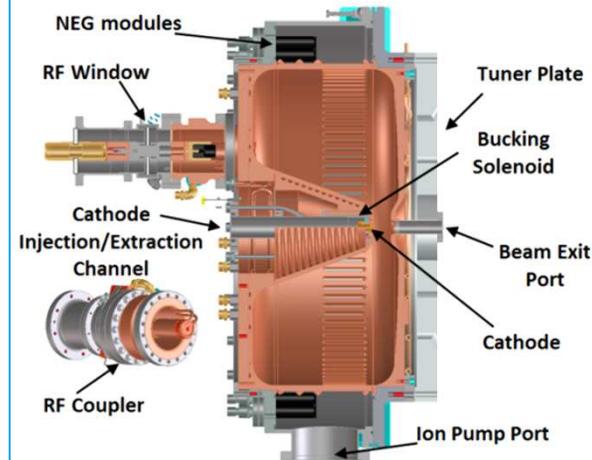
- Zwei Optionen:

- Supraleitende L-Band CW-Gun (DESY, HZB, HZDR)
- Normalleitende CW-Gun (LBNL)

CW SRF gun @ HZB
1.3 GHz, 2~3 MeV/c, 10~30 MV/m @photoemission



CW NC gun @ LBL
1.3/n GHz, 100~200 kW
1~2 MeV/c, 20~30 MV/m @ photoemission



Entwicklung einer CW-Gun für den XFEL-Upgrade

- > mögliche Vorstudien mit der derzeitigen PITZ-Gun:
 - Strahldynamiktests bei CW-Gradienten
 - Test “grüner” Kathoden
- > Design einer skalierten und verbesserten LBNL-Gun bei PITZ:
 - als alternative CW-Gun, falls die Entwicklung einer SRF-Gun scheitert
 - abhängig von Ressourcen (~2,5 M€ Hardware-Investitionen nötig) und basierend auf den Erfahrungen am LBNL dauert es >5...12 Jahre vom Design bis zur Demonstration der gewünschten Strahlqualität
- > Vorläufiger Zeitplan bei PITZ:
 - Phase I: Design und Fabrikation einer 216 MHz-Gun (2017-2020)
 - Phase II: HF- und Kathodentests (2021-2022)
 - Phase III: Einbau in die PITZ-Beamline für Strahlstudien (2023-2025)

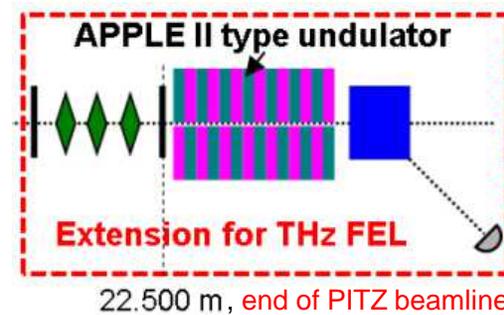
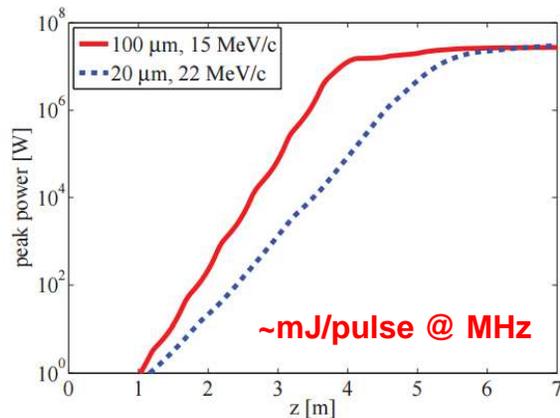
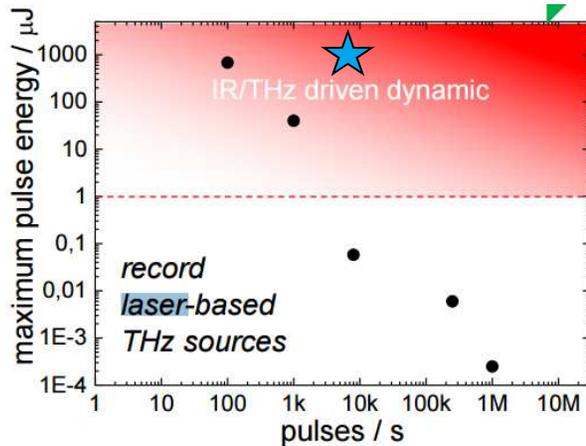
Forschungs-Highlights und Zukunftsthemen

- > Verbesserungen der Elektronenquelle für den XFEL
 - Gun4.6: Verbesserungen und Resultate
 - 3D-Laserformung für verbesserte Strahlqualität
 - Design und Konstruktion von Gun 5
- > neue Beschleunigerkonzepte: Plasmabeschleunigung
 - Selbstmodulation
 - Hohes Transformationsverhältnis
 - Astrophysik im Labor
- > Entwicklung einer CW-Gun bei PITZ
- > Anwendungen von bei PITZ erzeugten Elektronenstrahlen
 - THz-Quelle für Pump/Probe-Experimente
 - Kurze Elektronenpakete für Elektronenbeugungs-Experimente

PITZ-Anwendungen: Eine THz-Pumpquelle für den XFEL

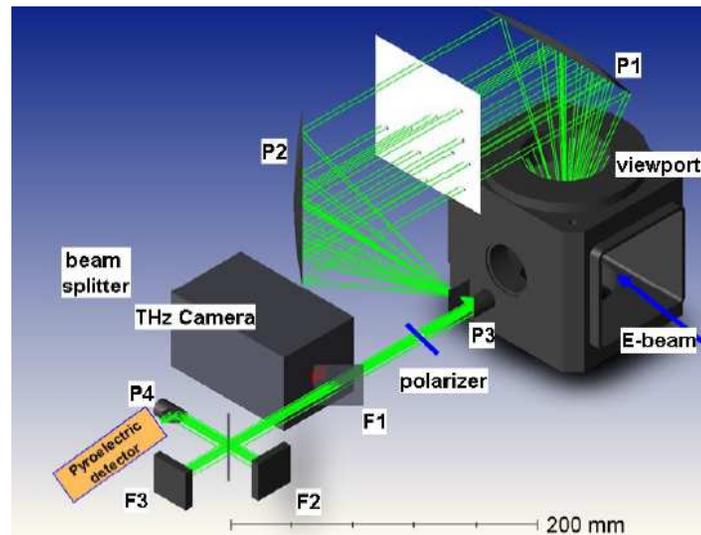
➤ Erzeugung von THz-Pulsen für Pump-Probe-Experimente am XFEL

- **laserbasierte** vs. **beschleunigerbasierte** THz-Quelle
- THz-Pumppulse für XFEL: **MHz, 1 μ J...1 mJ/Puls, 0.3 ~ 30 THz (10 μ m...1 mm)**



To do list:

- 1) THz diagnostics
- 2) CTR THz source
- 3) Find free undulator and start THz FEL

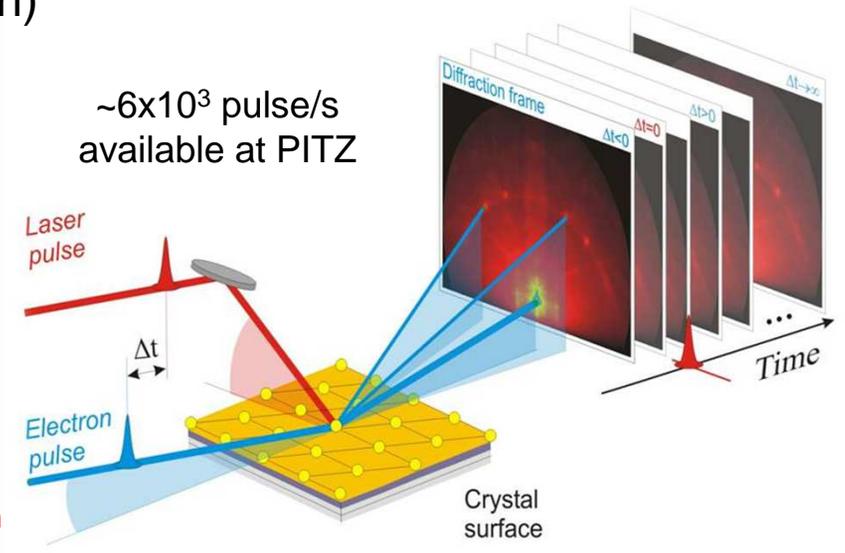


PITZ-Anwendungen: fs-Beugungsexperimente

➤ ultrakurze (Femtosekunden-) Elektronenpakete für Pump-Probe-Experimente zur Oberflächenanalyse (electron diffraction)

▪ Elektronen vs. Röntgenbeugung

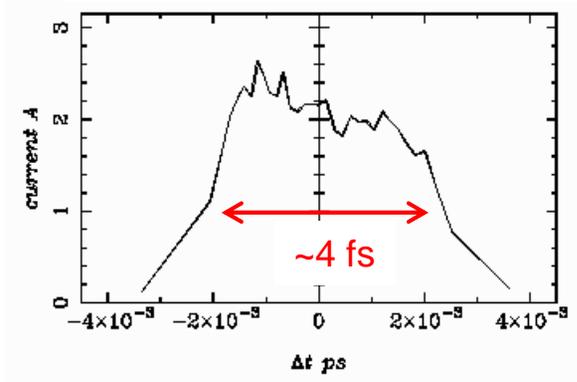
- $\sim 10^6$ higher scattering cross section, good for thin film & gas phase samples
- Sub-Å wavelength
- less radiation damage
- more compact (can be combined with accelerator based THz source)
- ...



Conventional velocity bunching (sub 100 fs)



Preliminary simulations



To do list:

- 1) More systematic simulation studies, including beam jitters
- 2) Low charge diagnostics, fs beam diagnostics
- 3) Find user collaboration partners (potential interest from MBI)
- 4) ...

Zusammenfassung

- > derzeitige und zukünftige PITZ-Aktivitäten umfassen:
 - **Verbesserungen der Elektronenquelle für XFEL**
 - Gun 4.6 läuft bei höherem Gradienten und mit besserer Stabilität
 - Vermessung der Strahlqualität, auch zeitaufgelöst
 - 3D-Laserformung für 30% Emittanzreduktion
 - Technisches Design und Konstruktion von Gun 5
 - Entwicklung einer normalleitenden CW-Gun
 - **Neue Beschleunigerkonzepte (im Rahmen des HGF-Programms ARD)**
 - Selbstmodulation
 - Hohes Transformationsverhältnis
 - Dielektrische Röhren
 - Astrophysik im Labor
 - **Anwendungen von bei PITZ erzeugten Elektronenstrahlen**
 - Erzeugung von THz-Strahlung
 - Bereitstellung ultrakurzer Pulse
- > ein sehr breites und wissenschaftlich interessantes Programm
 - substantieller Unterstützung bestimmter Aktivitäten ab ~Mitte 2017 aus XFEL-Budget