

Plasmabeschleunigung

Ist es möglich den LHC auf Labortischgröße zu schrumpfen?

Matthias Groß
Technisches Seminar Zeuthen
22. Mai 2012



Das Plasma-Projekt

Helmholtz-Nachwuchsgruppe bei DESY forscht an neuer Beschleunigertechnik

Teilchenbeschleuniger brauchen Platz. Sollen kleine Teilchen auf große Energien gebracht werden, muss schon einiges an Strecke geboten werden. Bei FLASH zum Beispiel, werden über 80 Meter reine Beschleunigungsstrecke benötigt, um die Elektronen auf eine Energie von 1,25 Gigaelektronenvolt zu bringen. „Die Energie schafft dieser Beschleuniger hier auch“, sagt Jens Osterhoff und hält ein 1,6 Zentimeter großes Stück Saphir in die Luft. „Allerdings sind die Eigenschaften des Teilchenstrahls nicht ganz so gut wie die von FLASH“, ergänzt er dann schmunzelnd. Osterhoff leitet seit September 2010 eine Helmholtz-Nachwuchsgruppe an der Universität Hamburg, die bei DESY angesiedelt ist. Zusammen mit zwei Doktoranden, einem Postdoc und einem Lasertechniker beschäftigt er sich mit Plasma-Beschleunigern – einer neuen Beschleunigertechnologie, die noch in den Kinderschuhen steckt, aber schon jetzt viel verspricht. „Mit einem Plasmabeschleuniger kann man den Teilchen pro Strecke mehr Energie zuführen.“ So schaffen zum Beispiel die Resonatoren,

die im European XFEL eingebaut werden, bis zu 35 Megaelektronenvolt pro Meter – ein Plasmabeschleuniger kann zwischen 10 000 und 100 000 Megaelektronenvolt pro Meter erreichen.

Bisher reicht die Qualität der Strahlen, die in einem Plasmabeschleuniger erzeugt werden können, noch nicht, um sie für anspruchsvolle Anwendungen wie Freie-Elektronen-Laser zu nutzen. Außerdem können Teilchen bisher nur über sehr kurze Strecken beschleunigt werden. Um dies zu ändern, forschen Osterhoff und seine Kollegen. Zum Beispiel gibt es Pläne bei dem Ausbau von FLASH zu FLASH II eine Plasma-Beamline einzubauen, die auch die Nachwuchsgruppe für ihre Experimente nutzen kann. Im Gegensatz zu herkömmlichen Beschleunigertypen wie bei FLASH oder auch HERA braucht ein Plasmaschleuniger keinen Resonator, in den ein elektromagnetisches Feld eingekoppelt wird. Vielmehr werden hier die Teilchen in einem Plasma beschleunigt. Wird ein Laser- oder ein Elektronenstrahl in ein Plasma eingeschossen,

ändert er die Elektronendichte dort wellenartig. Das führt zu sehr starken elektrischen Feldern im Plasma. Ein Elektronenstrahl, der zum richtigen Zeitpunkt eingespeist wird, kann dann von diesen elektrischen Feldern im Plasma beschleunigt werden.

Die hohen Gradienten wollen die Wissenschaftler nutzen, um sehr kompakte Beschleuniger zu bauen. Um mit den Teilchen aus den Plasmabeschleunigern auch experimentieren zu können, also eine gute Strahlqualität zu erreichen, wollen die Wissenschaftler mit einem Trick arbeiten. Sie schießen schon Strahlen mit guten Eigenschaften in das Plasma ein und lassen sie dort weiter beschleunigen. Um zu erforschen, ob das funktioniert, würden sich zum Beispiel Elektronenstrahlen von PITZ, REGAE oder FLASH eignen. Es gibt also noch viel zu tun, bis die Plasmabeschleuniger den Kinderschuhen entwachsen sind. Für diese Arbeiten bietet DESY mit seinen Beschleunigeranlagen vor Ort die idealen Gegebenheiten. (gh)

DESY inForm (April 2011)

Inhalt

- > Motivation
- > Prinzip der Plasmabeschleunigung
- > Bisherige Resultate
- > Arbeiten bei PITZ
- > Ausblick
- > Zusammenfassung



Motivation

- > Warum ein neuer Beschleunigertyp – wir können das doch schon?
- > Herkömmliche Beschleuniger funktionieren sehr gut sind aber auch sehr groß

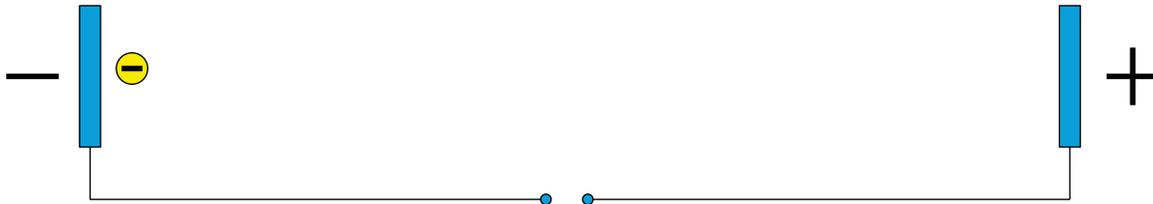
Beispiele Elektronenbeschleuniger:

Name	Endenergie	Größe (Durchmesser bzw. Länge)
DESY	7.5 GeV	100 m
PETRA	19 GeV	730 m
HERA	27.5 GeV	2 km
LEP	105 GeV	8,6 km
SLC (linac)	50 GeV	3,2 km

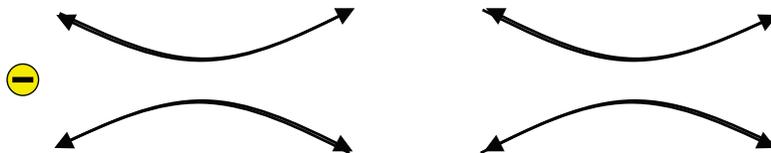


Beschleunigertypen

- > Gleichspannung (statisch)



- > Wechselspannung (dynamisch)



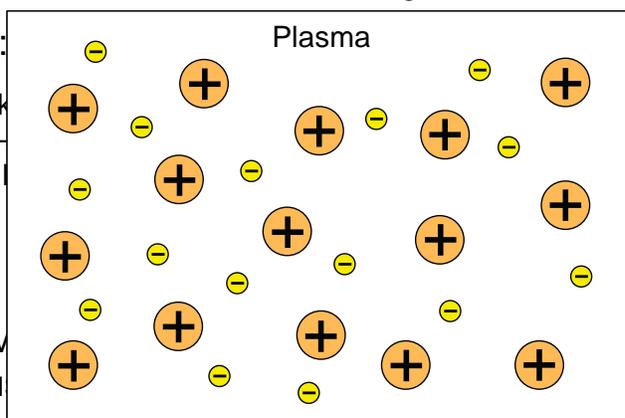
Problem von herkömmlichen Beschleunigern

- > Grundsätzliches Problem: Mikroskopische Teilchen werden mit makroskopisch erzeugten Feldern beschleunigt

- Kleine Feldstärke → Großer Beschleuniger

- > Neue Idee:

- Nutze mikroskopische Teilchen (z.B. Elektronen und Ionen in einem Plasma) – ohne die makroskopischen Felder



Elektronen und Ionen in einem Plasma
zusammen sein können

- > **Problem:** Mikroskopische Teilchen (z.B. Elektronen und Ionen) werden durch makroskopische Felder beschleunigt

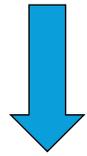
z.B. durch Laserpulse etc. aus einzelnen Teilchen

- > **Lösung:** Gezielte Ionisation eines Gas zu einem Plasma mit den gewünschten Eigenschaften



Neuer Beschleunigertyp: PWA

- > Statischer Beschleuniger geht nicht, da man die Ionen nirgendwo festmachen kann
- > Deshalb: Dynamischer Beschleuniger mit Wanderwelle



Plasmawanderwellenbeschleuniger

Plasma

Wakefield

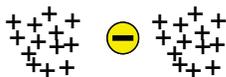
Accelerator

'Wake':
Kielwasser



Grundprinzip

- > Beschleunigung eines Elektrons mit einer Wanderwelle



- > Bei optimaler Ausnutzung von Nichtlinearitäten sind extrem starke Beschleunigungen möglich



Wie stark kann man beschleunigen?

- > Maß für die Beschleunigung: Elektrische Feldstärke (Gradient)
- > Herkömmliche Beschleunigerkavitäten: Bis zu 100 MV/m
- > Möglich mit Plasmabeschleuniger: Bis zu 1 TV/m !!!
= 1.000.000 MV/m

Plasmabeschleuniger ist 10000 mal stärker !!

- > Beispiel: International Linear Collider (ILC) – Endenergie: 500 GeV
 - Geplante Länge mit herkömmlicher Technik: $\approx 30\text{km}$
 - Möglich mit Plasmabeschleunigung: 3m

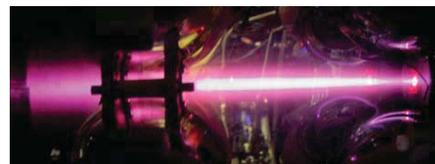


Die Kraftquelle

- > Wie treibt man eine Plasmawelle?

A) Mit einem starken Laserpuls
LDPWA

 *Laser Driven*

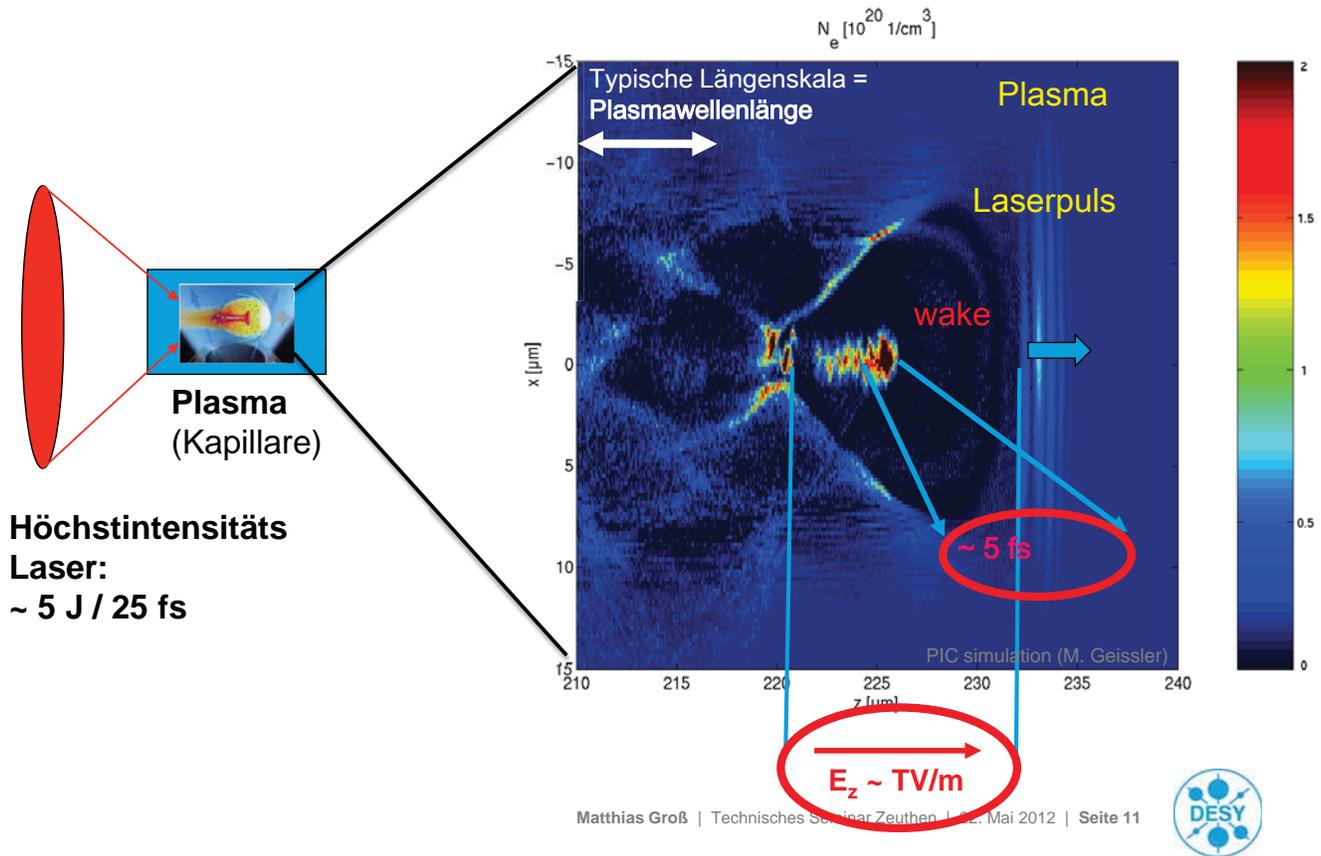


B) Mit einem Teilchenstrahl
PDPWA

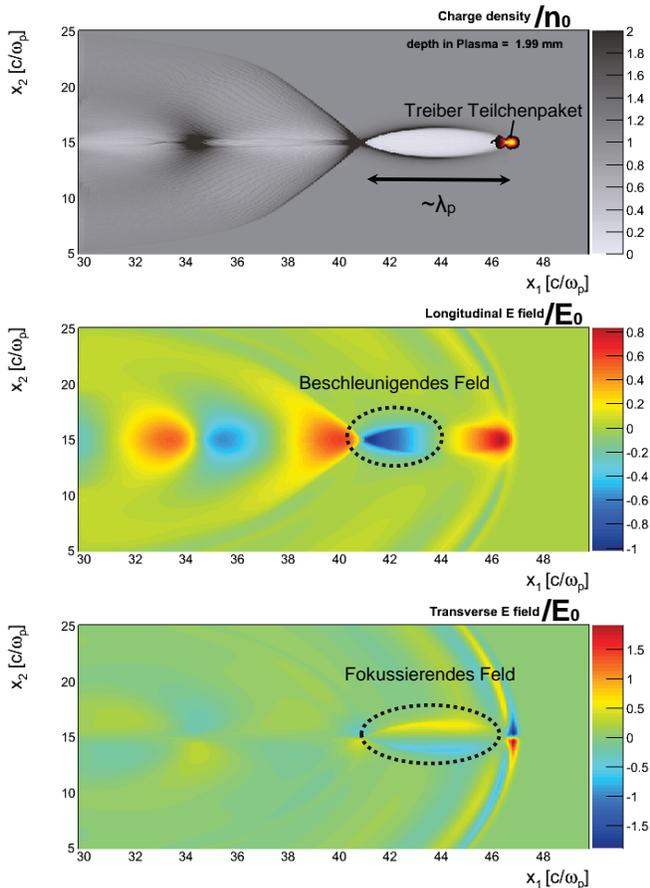
 *Particle Driven*



Simulation: Laser Treiber



Simulation: Teilchen Treiber



Teilchendichte

Longitudinales Feld

Transversales Feld



Bisherige Resultate

- > Prinzip der Plasmabeschleunigung wurde 1979 von Toshiki Tajima und John Dawson (UCLA) vorgeschlagen
- > Erste Experimente in den 1980er Jahren
- > Höchste bislang erreichte Energie bei Experiment am SLAC: Beschleunigung eines Elektronenstrahls von 42 GeV auf 85 GeV in einem 85cm langen Plasma
 - Problem: Schlechte Kontrolle über mikroskopische Felder → Sehr große Energieverteilung (hier von 0 bis maximale Energie)
- > Seit 2004: Demonstration von Plasmabeschleunigung mit geringer Energieverteilung – höchste bislang demonstrierte Endenergie ist etwa 1 GeV in einem 3cm langen Plasma



Problemfeld

- > Größtes Problem heute: Strahlqualität

1. Sehr breite Energieverteilung

- Allgemein: Es ist schwer die mikroskopischen Gegebenheiten exakt zu kontrollieren
- Speziell: "dephasing" – Phasenstabilität
 - Die beschleunigten Elektronen haben eine sich ständig steigende Geschwindigkeit, geraten dadurch mit dem beschleunigenden Feld aus dem Takt
 - Dieser Effekt hat dazu auch noch unterschiedliche Stärke über ein Elektronenpaket

2. Hohe Divergenz

- Durch Kollisionen mit den Ionen im Plasma tendiert der Elektronenstrahl sich schnell zu verbreitern
 - Vergleich: Teilchenstrahlen in konventionellen Beschleunigern breiten sich im Ultrahochvakuum aus





LAOLA

Laboratory for Laser- and beam-driven plasma Acceleration



HOME

Home /

PROJECTS

Laboratory for Laser- and beam-driven plasma Acceleration

CONTACT

LAOLA, the Laboratory for Laser- and beam-driven plasma Acceleration is a collaboration between groups from DESY and the University of Hamburg. Its mission is to complement basic research in the relatively new field of plasma wakefield acceleration (PWA) by an explicit combination with DESY's conventional, modern accelerators.

OPEN POSITIONS

PUBLICATIONS

INTERNAL

Plasma Wakefield Accelerators attract great interest from accelerator and applied physics due to their unprecedented ultra-high field gradients on the order of TV/m as well as their intrinsically ultra-short electron bunch lengths of just few femtoseconds.

LAOLA experiments will be hosted at three sites: PITZ, REGAE and FLASH. At PITZ, we want to test beam self-modulation (a pre-study for the CERN proposal of Proton-driven-PWA) and beam-driven resonant plasma excitation towards higher transformer ratios. At the REGAE-lab external, ultra-short electron bunches will be injected into a laser-driven wakefield for probing the latter and comparing the results with numerical simulation tools. Both laser- and beam-driven experiments will then be continued at FLASH, using an additional extraction beamline.

Links

- » PITZ
- » REGAE
- » FLA
- » ARD
- » PIER
- » Contact



Arbeiten bei PITZ

> Simulationen

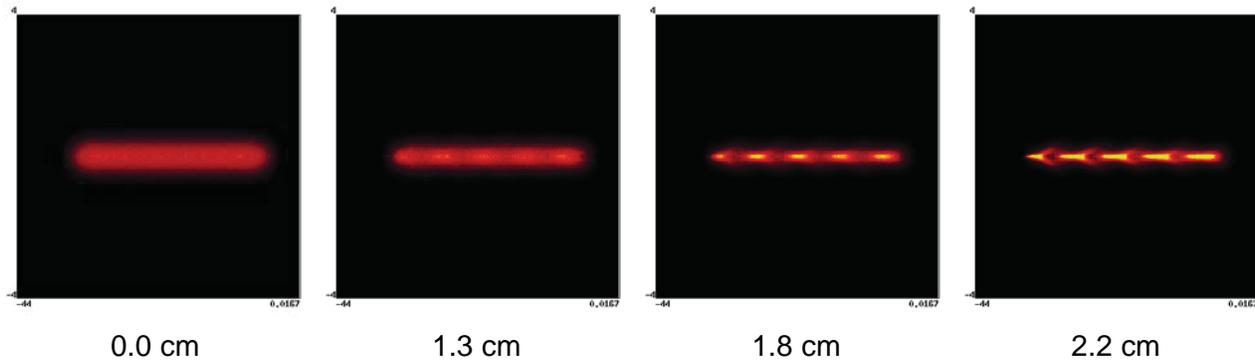
- Detaillierte Untersuchung von Effekten wenn der PITZ Elektronenstrahl auf ein Plasma trifft

> Experimente

- Einbau einer Plasmazelle in PITZ zur Durchführung von Experimenten
- Plasmabeschleunigung nicht möglich mit der vorhandenen Infrastruktur (kein Treiber) – ABER: wichtige Untersuchungen zu grundlegenden Effekten durch Ausnutzung des einzigartigen Lasersystems und der hervorragenden Diagnostik.
- Dies ist wichtig um die Kontrolle bei zukünftigen Beschleunigungsexperimenten zu verbessern → verbesserte Qualität
- Nach Einbau eines Pulscompressors ist auch Plasmabeschleunigung möglich (in ein paar Jahren)



Simulation des PITZ Experiments



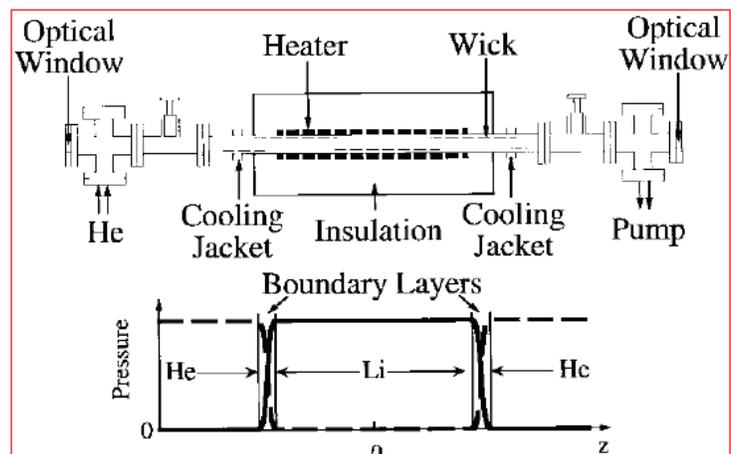
- > Mit zunehmender Ausbreitung im Plasma bildet sich im Elektronenpaket eine Substruktur aus
- > Dies bedeutet, dass das Elektronenpaket mit dem Plasma interagiert
- > In einem Experiment könnten diese Substrukturen in Abhängigkeit von Plasmadichte etc. genau vermessen werden



Lithium Plasmazelle

> Prinzip:

- Lithium wird in zentraler Röhre verdampft (700°C)
- Die Lithium Zone wird auf beiden Seiten durch einen steilen Temperaturegradienten und durch einen Helium Puffer scharf definiert
- Nach Stabilisierung der Druckregionen:
 - Lithium Gas wird mit Laser ionisiert
 - Elektronenstrahl für Plasmaexperiment wird injiziert



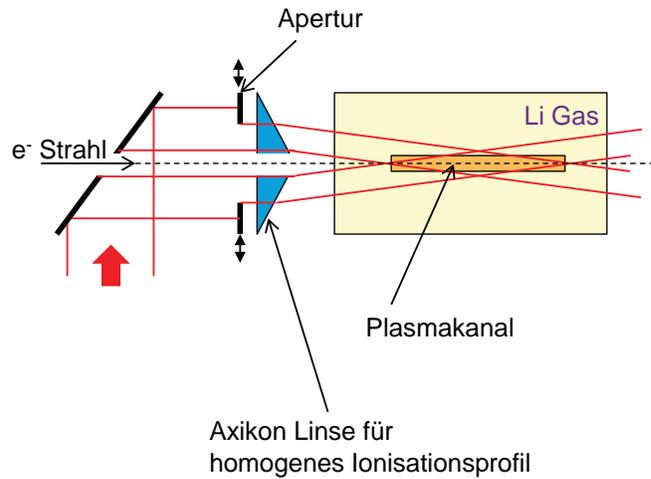
Aus: P. Muggli et al. "Photo-Ionized Lithium Source for Plasma Accelerator Applications", *IEEE Trans. Plasma Science* **27** (1999), pp. 791-799



Plasmaerzeugung durch Laserionisation bei PITZ

> Einzelphoton Ionisation

- Linearer Prozess
- $< 320\text{nm}$, z.B. ArF Laser
- Partielle Ionisation $\rightarrow f$ (Lokale Intensität)
 \rightarrow Sättigung
- Apertur zur Kontrolle der Länge des Plasmakanals



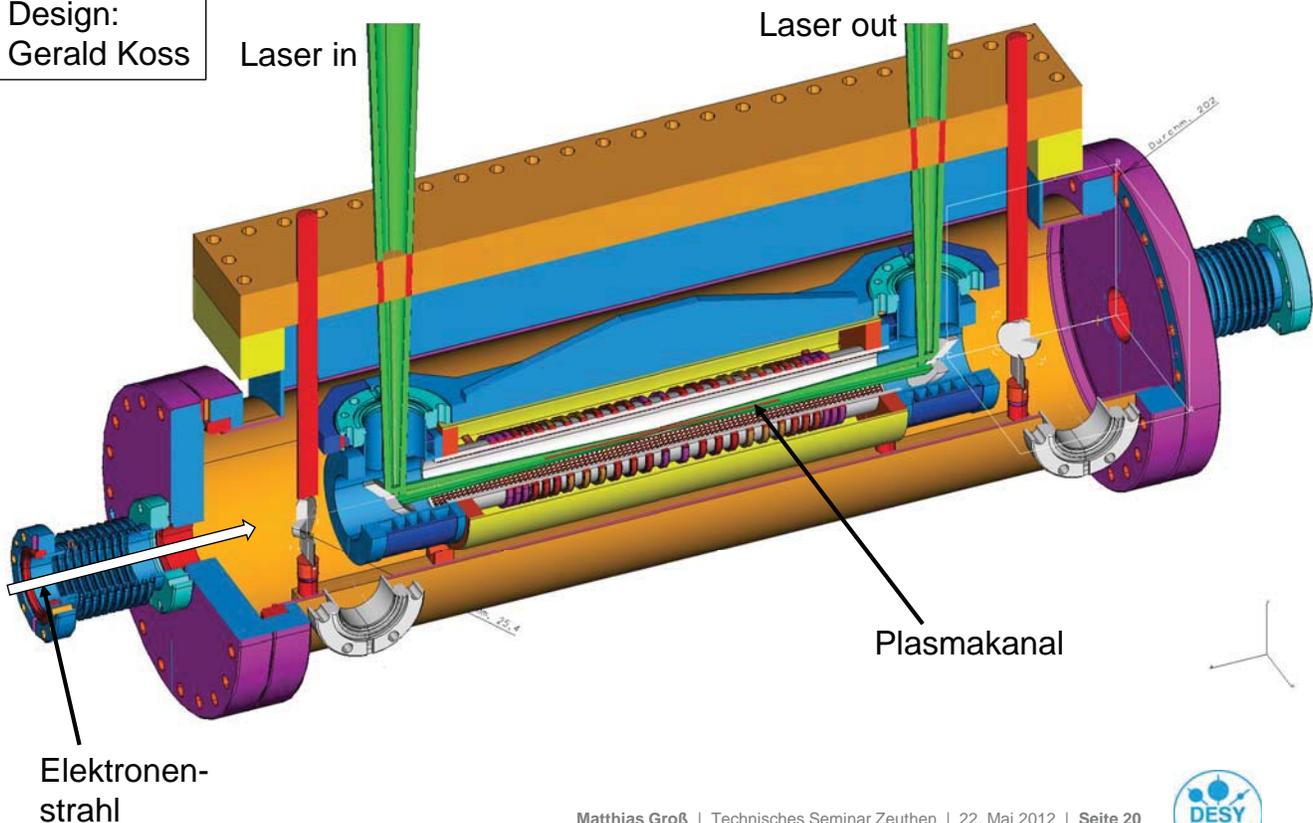
> Feldionisation

- Nichtlinearer Prozess
- Wellenlänge nicht wichtig, z.B. Ti:Saphir
oder CO₂ Laser
- Schwellenprozess \rightarrow vollständige
Ionisation



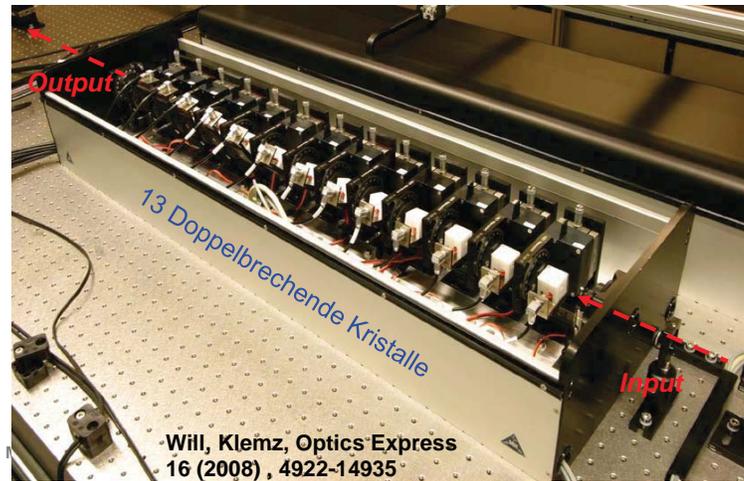
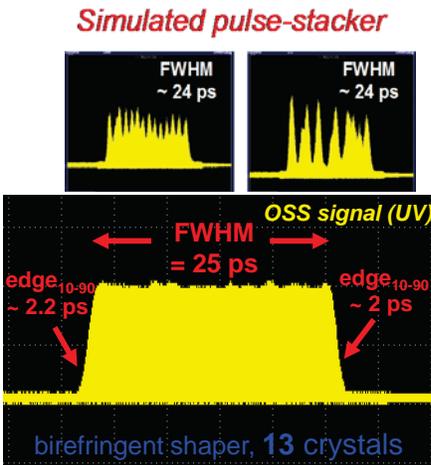
PITZ Plasmazelle: Derzeitiger Planungsstand

Design:
Gerald Koss



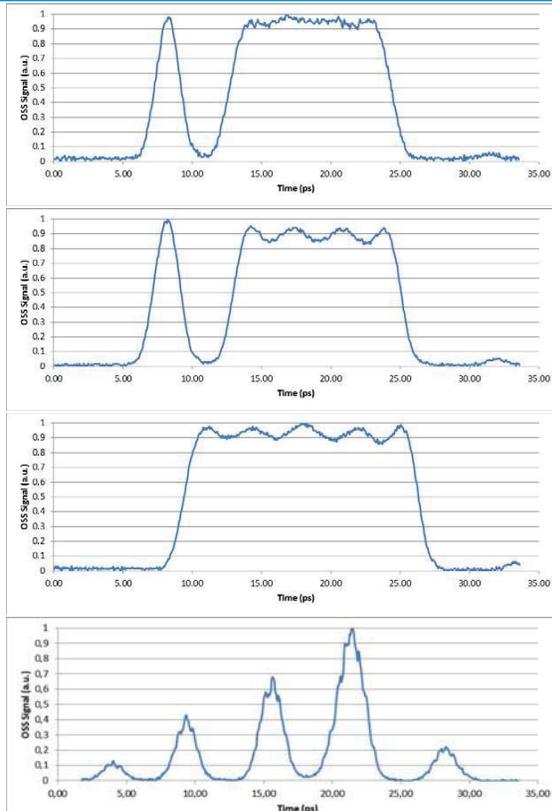
“Der Andere Laser”

- > Photokathodenlaser zur Erzeugung von Elektronenpaketen
- > Entwickelt und gebaut from Max-Born Institut Berlin
- > Herzstück: Der Pulsformer
 - Der Pulsformer enthält 13 doppelbrechende Kristalle. Diese spalten die einkommenden kurzen Pulse nach Polarisation auf und setzen sie mit einer festgelegten Verzögerung und einstellbarer relativer Stärke wieder zusammen

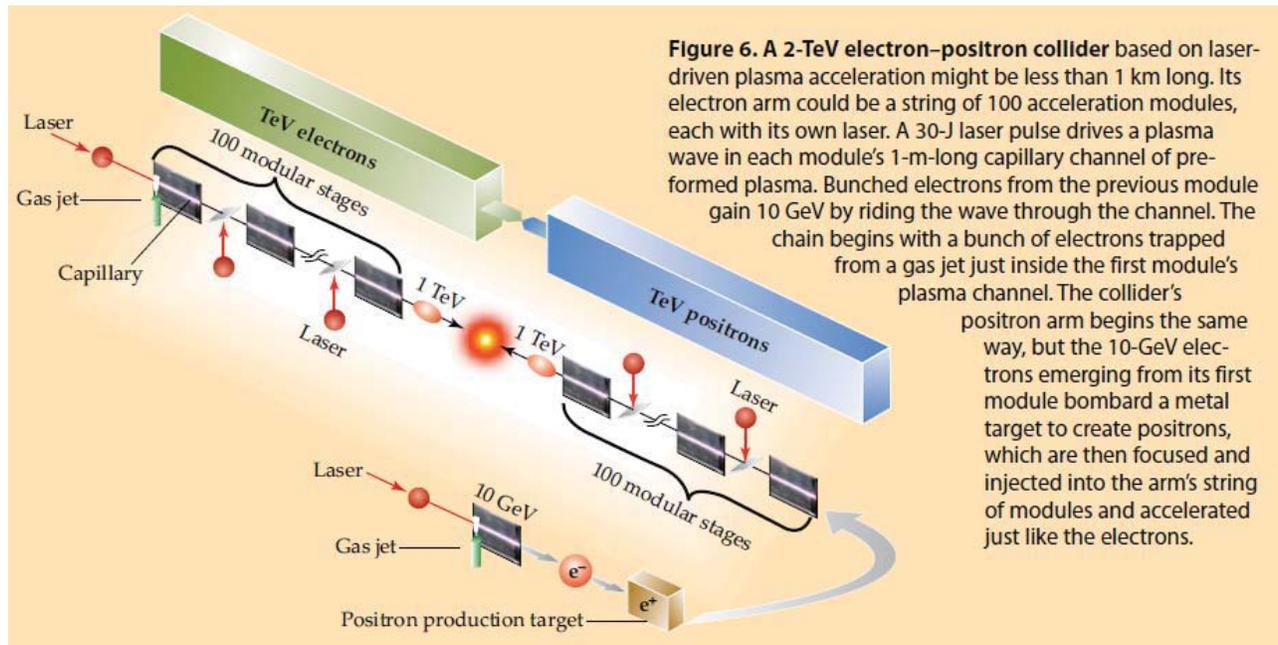


Flexible Laserpulserzeugung für Plasmaexperimente

- > Treiber + Experimentierpuls
- > Modulierter Treiber + Experimentierpuls
- > Modulierter Treiber
- > Multipulse



> Konzept für einen Plasma Linearbeschleuniger



Aus: Leemans et al. Physics Today, March 2009, p. 44

Matthias Groß | Technisches Seminar Zeuthen | 22. Mai 2012 | Seite 23



Zusammenfassung

> Neue Idee: Plasmabeschleunigung

- Ausnutzung von sehr hohen molekularen Feldern zur Beschleunigung
- Ziel: Bau von sehr kompakten aber leistungsfähigen Teilchenbeschleunigern

> Konzept wurde demonstriert – Hauptproblem heute: Schlechte Qualität der beschleunigten Teilchenpakete

- Breite Energieverteilung

> Bei PITZ wird daran mitgearbeitet diese Probleme zu lösen. Sehr wertvoll dafür: Flexibles Lasersystem und gute Diagnostik

- Simulationen
- Experimente nach Einbau einer Plasmazelle, die zur Zeit entwickelt wird

Matthias Groß | Technisches Seminar Zeuthen | 22. Mai 2012 | Seite 24

