

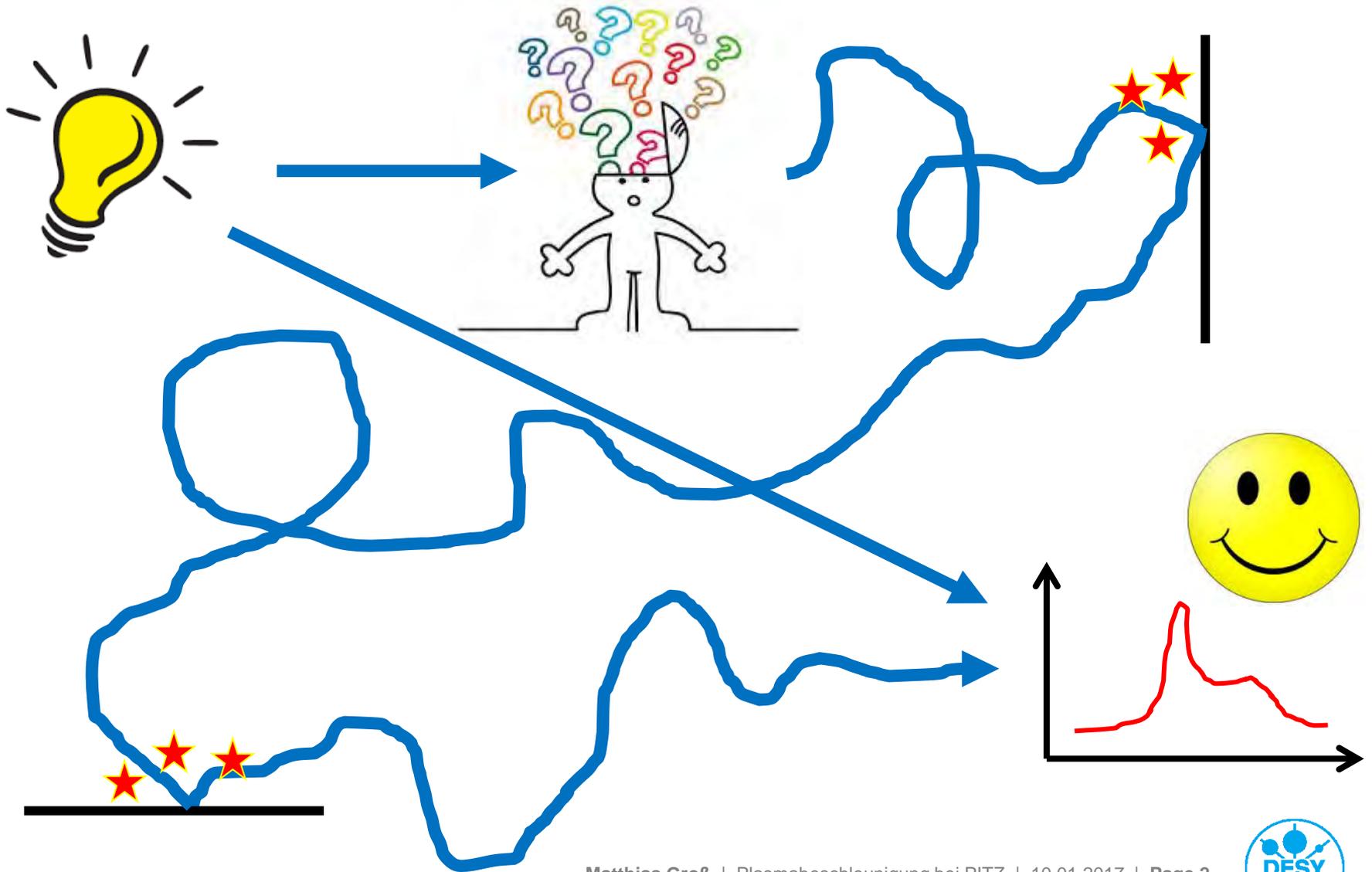
Plasmabeschleunigung: Geschichte eines Experiments

Demonstration der Selbstmodulation eines langen Elektronenstrahls
bei PITZ

Matthias Gross

Plasmabeschleunigung bei PITZ
Zeuthen, 10. Januar 2017

Von der Idee zum experimentellen Resultat



- Die Idee: Wir wollen Selbstmodulation bei PITZ demonstrieren

Notes: Beam-Plasma Self-Modulation Instability Experiment

Carl B. Schroeder*
Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA

Florian J. Grüner†
Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, 22761 Hamburg, Germany

(Dated: 19 August 2011)

I. INTRODUCTION

In these Notes, we consider preliminary parameters for an experiment to explore the self-modulation an electron beam in an overdense plasma (beam density much less than plasma density, $n_b \ll n_0$). A seed for the instability on a long (many plasma wavelengths) beam may be generated by the plasma wave (wake) excited by a lead-

The amplitude of the density perturbation (seed for the self-modulational instability) provided by the short electron bunch, assuming a Gaussian longitudinal beam distribution, is, solving Eq. (1),

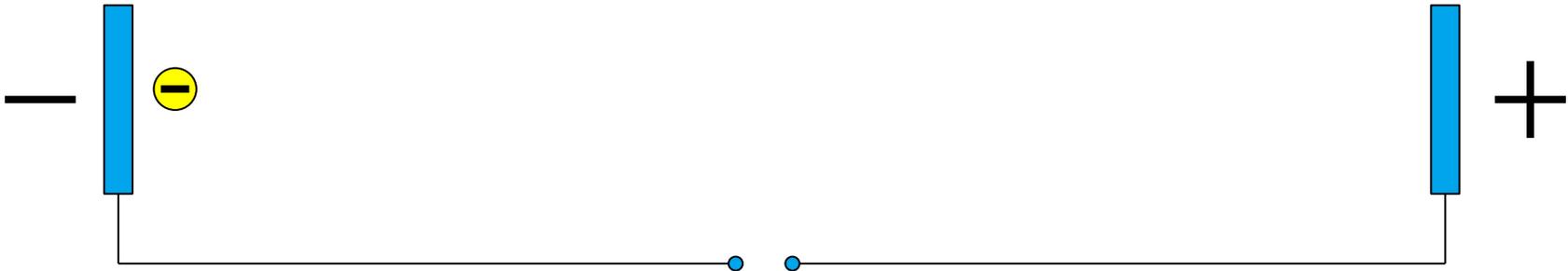
$$\frac{\delta n}{n_0} = (2\pi)^{1/2} (k_p \sigma_z) e^{-(k_p \sigma_z)^2 / 2} \frac{n_b(r)}{n_0}, \quad (4)$$

- Was ist Plasmabeschleunigung?
- Was ist Selbstmodulation???

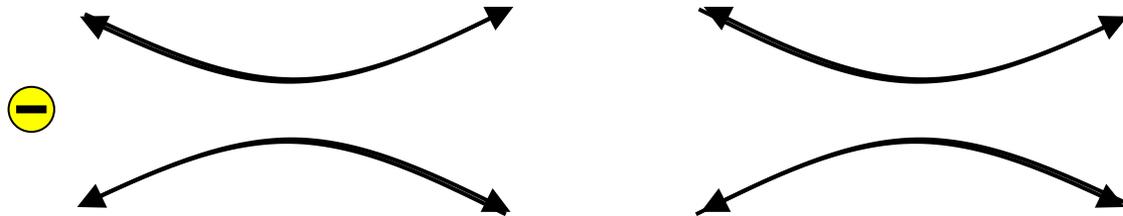


Beschleunigertypen der Gegenwart

> Gleichspannung (statisch)



> Wechselspannung (dynamisch)



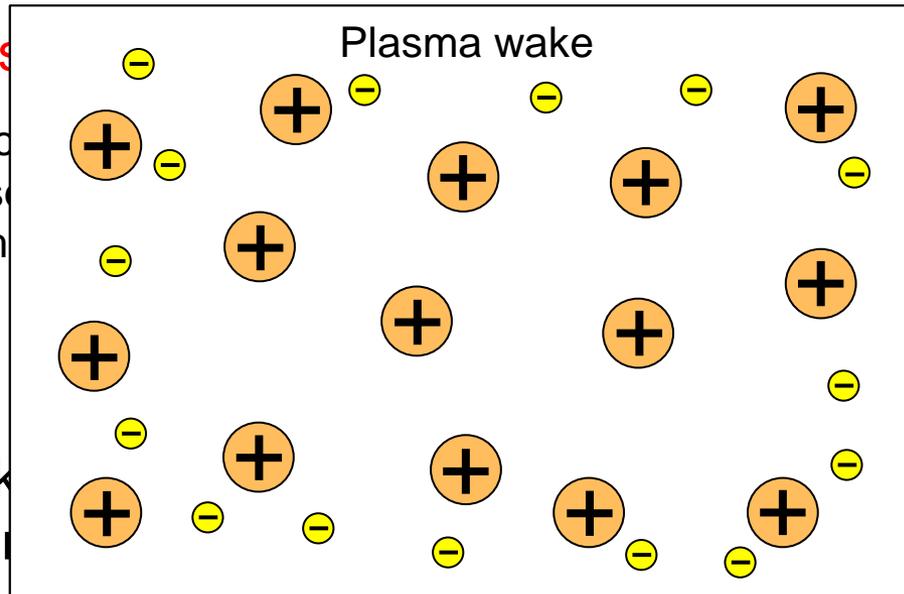
Problem von herkömmlichen Beschleunigern

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

- Kleine Feldstärke → Großer Beschleuniger

- > Neue Idee: **Plasma**

- Nutze mikroskopische Teilchen (Ionen in einem Plasma) – diese können zusammen sein können ohne die Baumstruktur



Ionen in einem Plasma können zusammen sein können

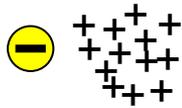
- > **Problem:** Man kann nicht alle Ionen zusammenbringen

... aus einzelnen

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

Grundprinzip

- Beschleunigung eines Elektrons mit einer Wanderwelle

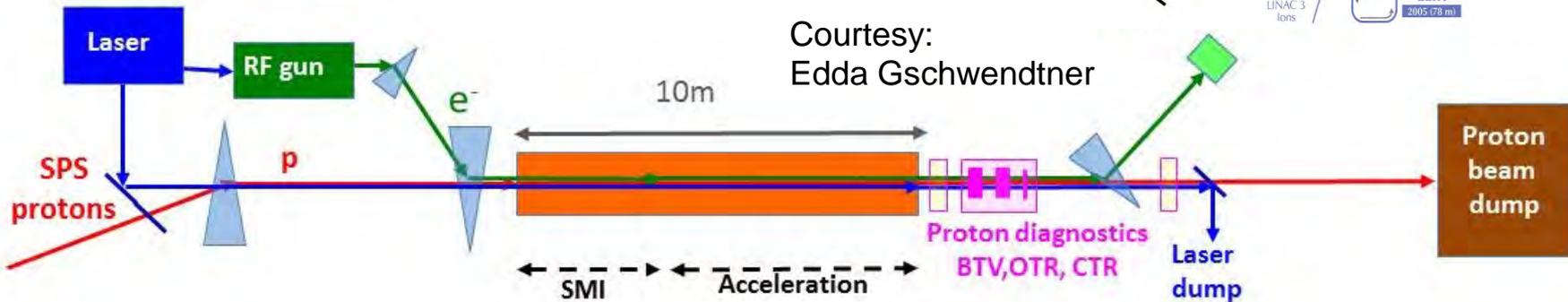
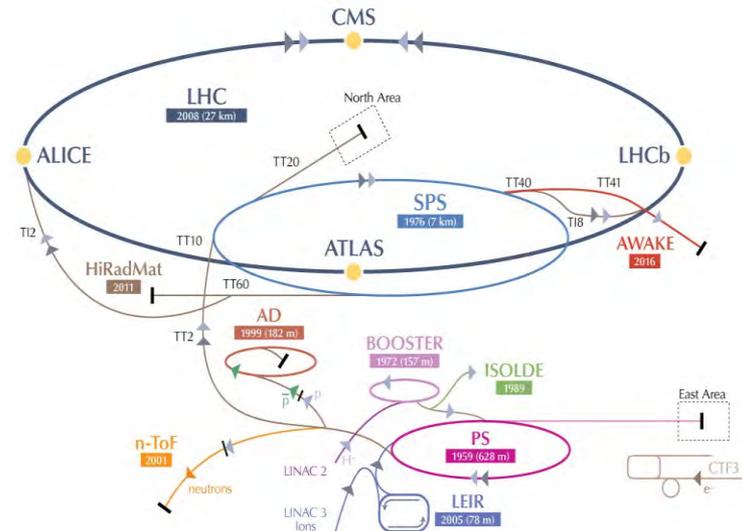


- Bei optimaler Ausnutzung von Nichtlinearitäten sind extrem starke Beschleunigungen (1000x oder mehr) möglich



EAAC Workshop 2015: Edda Gschwendtner – The AWAKE Facility at CERN

- > Nutzung des hochenergetischen Protonenstrahls vom SPS, um eine Plasmawelle zu erzeugen
- > Konvertierung der Protonenenergie, um Elektronen in einer einzigen Stufe zu beschleunigen



Courtesy:
Edda Gschwendtner

- > Für hohen Beschleunigungsgradienten: **Kurze** Pulse (σ_z weniger als 100 μ m)
- > Aber: Existierende Protonenbeschleuniger produzieren **lange** Pulse (10cm)

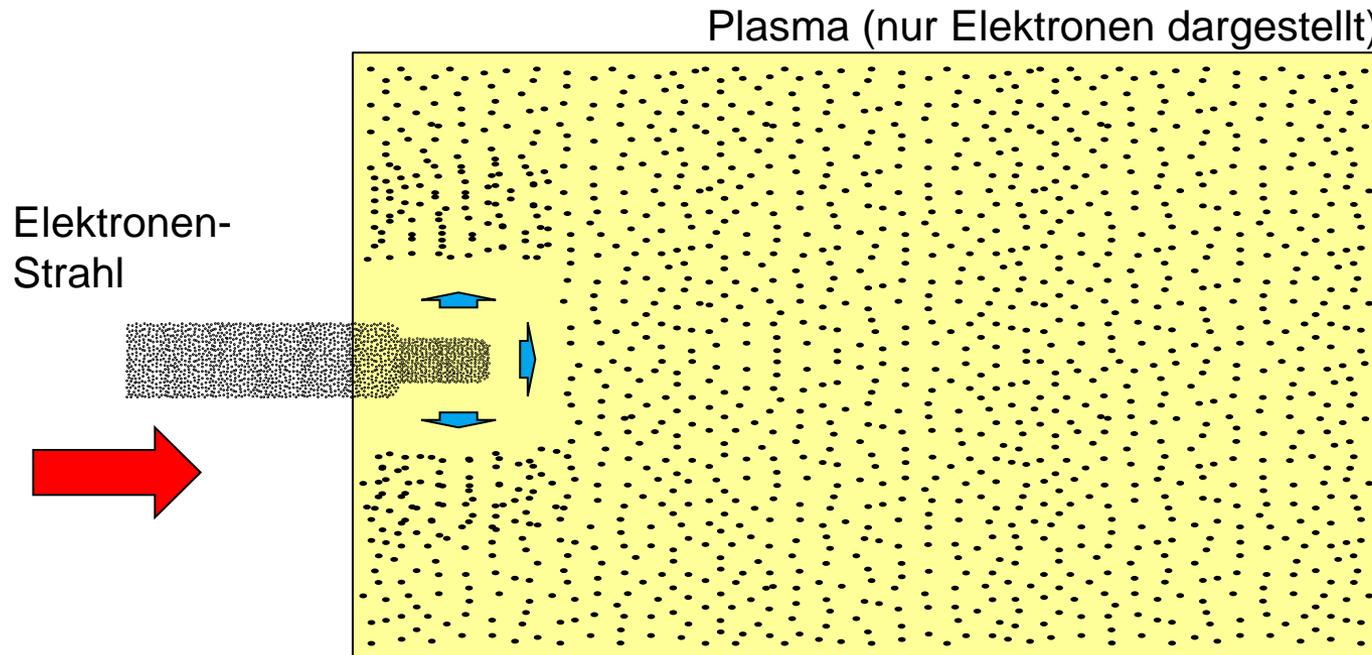
Caldwell et al., Nature Physics (2009):

$$E_{z,max} = 240(MV m^{-1}) \left(\frac{N}{4 \times 10^{10}} \right) \left(\frac{0.6}{\sigma_z(mm)} \right)^2$$

Selbstmodulation!

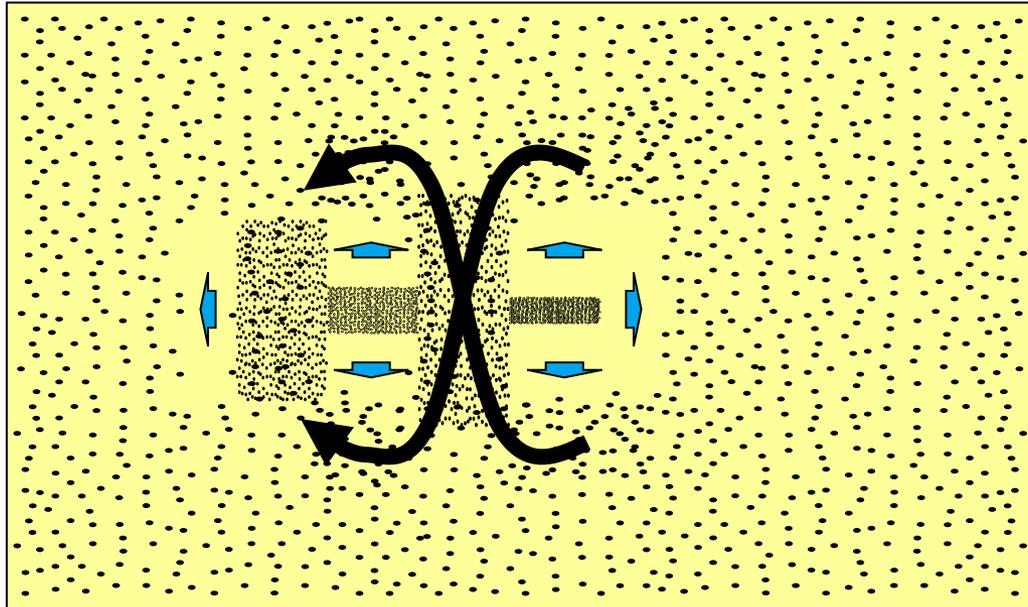


Eintritt in das Plasma

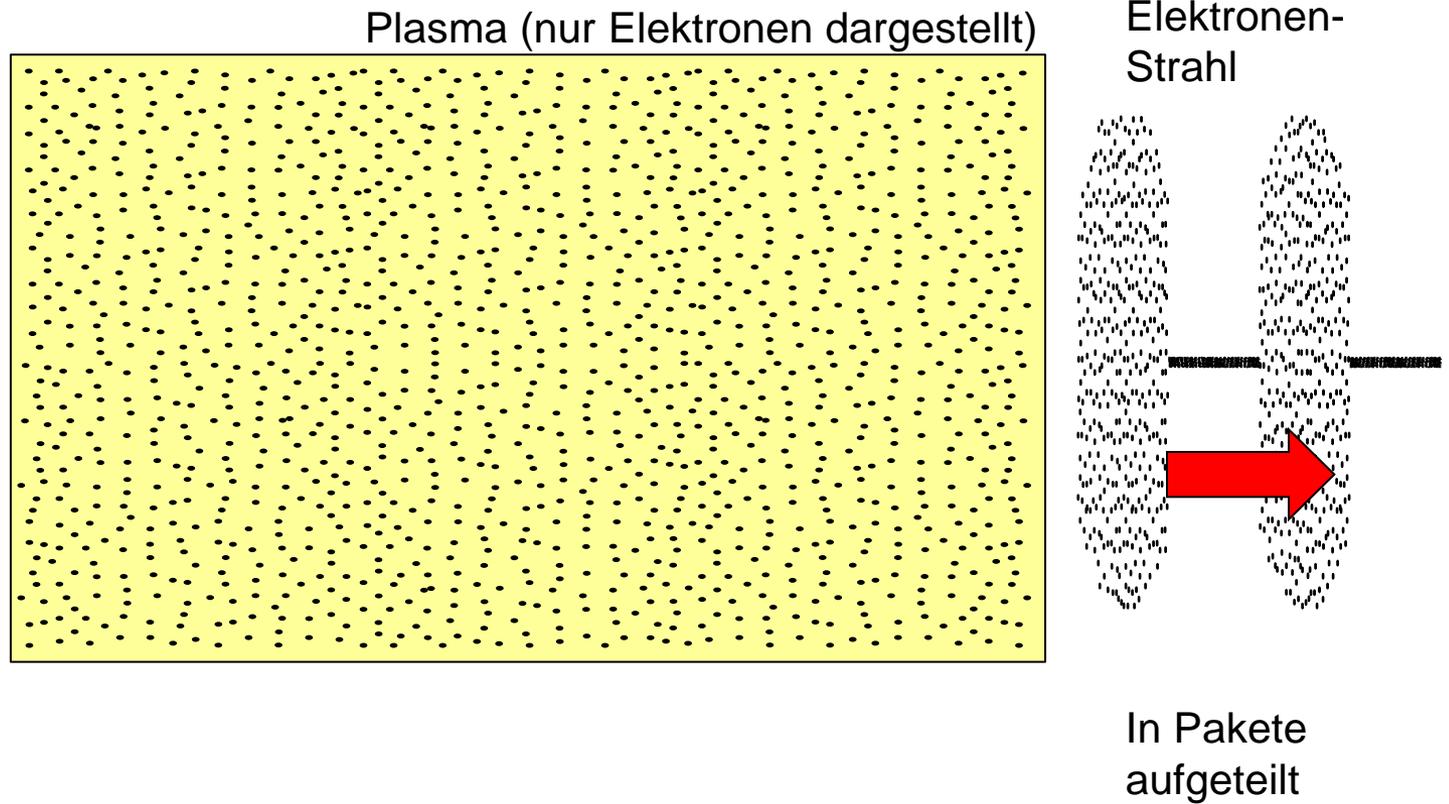


Fortschreitende Aufteilung

Plasma (nur Elektronen dargestellt)



Nach dem Plasmadurchgang



Gut! Dann legen wir mal los...

> Also:

- wir brauchen eine Plasmazelle
- bauen die bei PITZ in den Beschleuniger
- schicken eine Elektronenstrahl durch
- und messen, was hinten herauskommt

> Wie baut man eine Plasmazelle??? Fragen wir den Experten:

- Gut für uns ist eine **Lithium** Plasmazelle (**Heizofen + Ionisationslaser**)

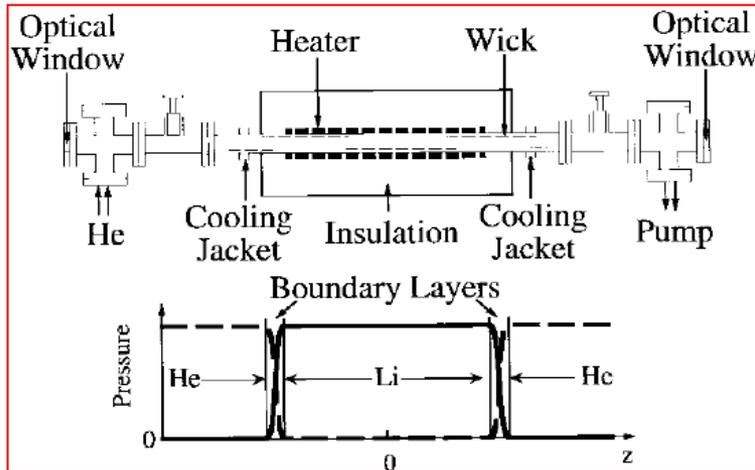
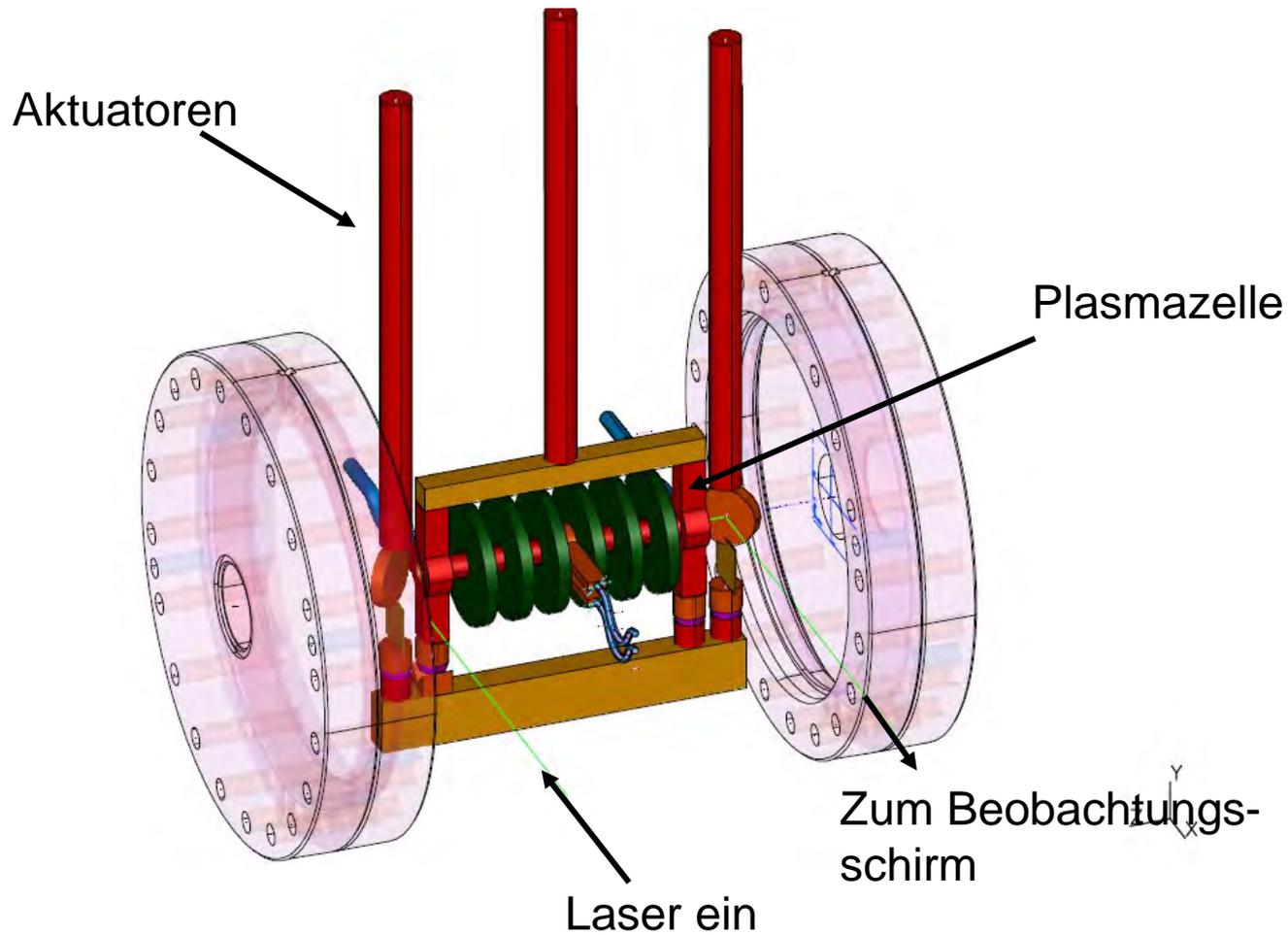


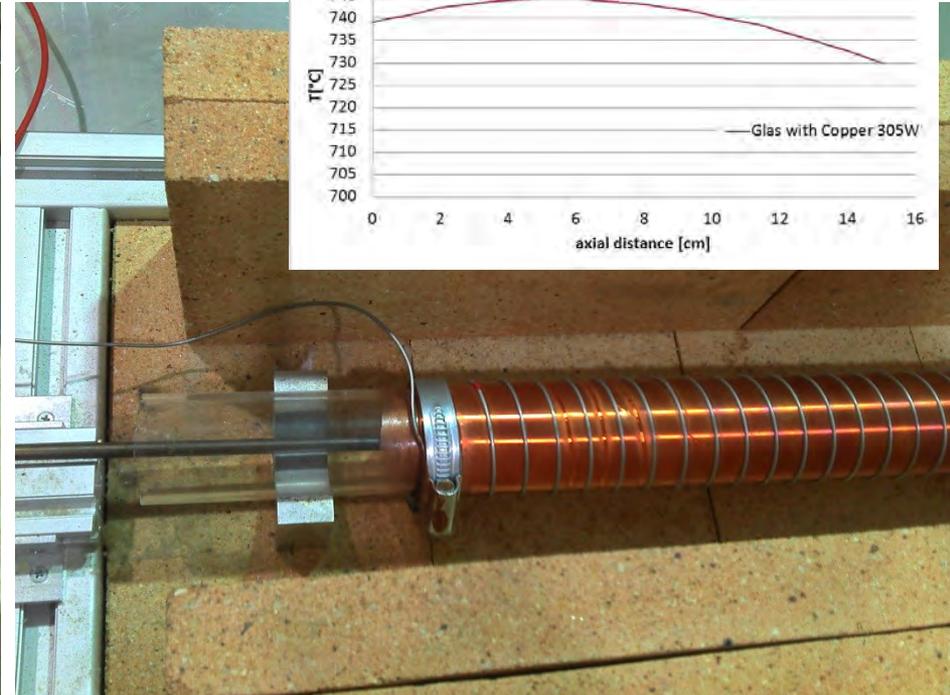
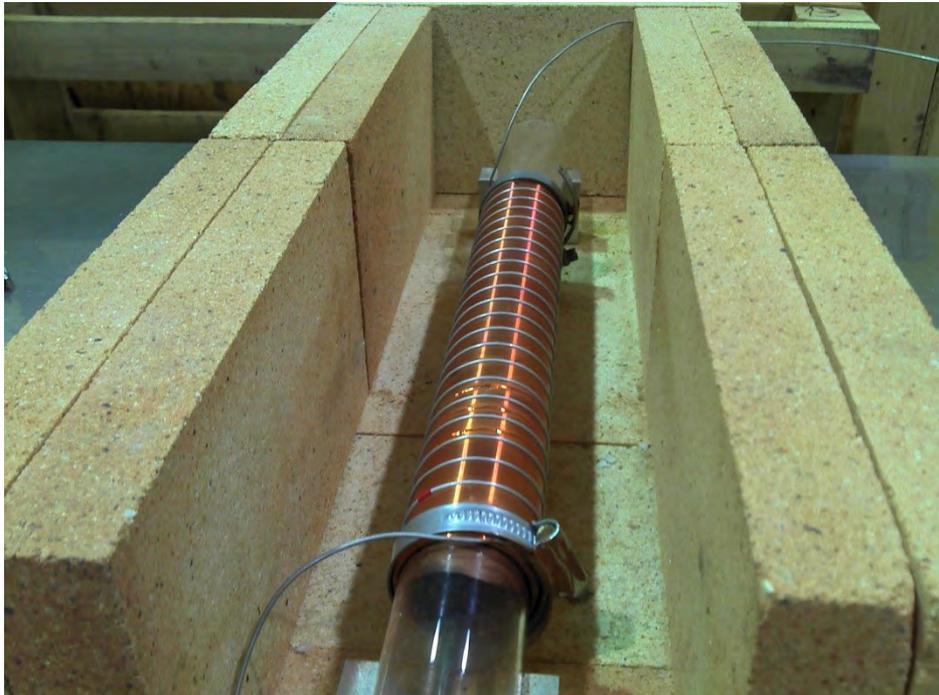
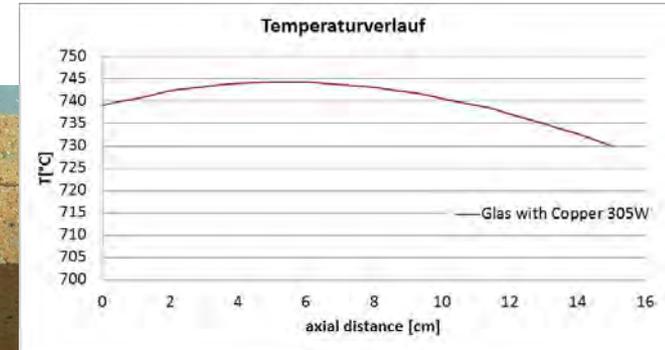
Figure from: P. Muggli et al. "Photo-Ionized Lithium Source for Plasma Accelerator Applications", *IEEE Trans. Plasma Science* **27** (1999), pp. 791-799

Herbst 2011: Ein erster Plan



Sommer 2012: Unsere erste "Plasmazelle"

- Quarzglasrohr; Kupferhülle mit helikaler Einkerbung zur Aufnahme eines Heizdrahtes (Thermocoax TET; 1.5mm Durchmesser; $5.5\Omega/m$)
- Länge des Heizbereiches: 30cm



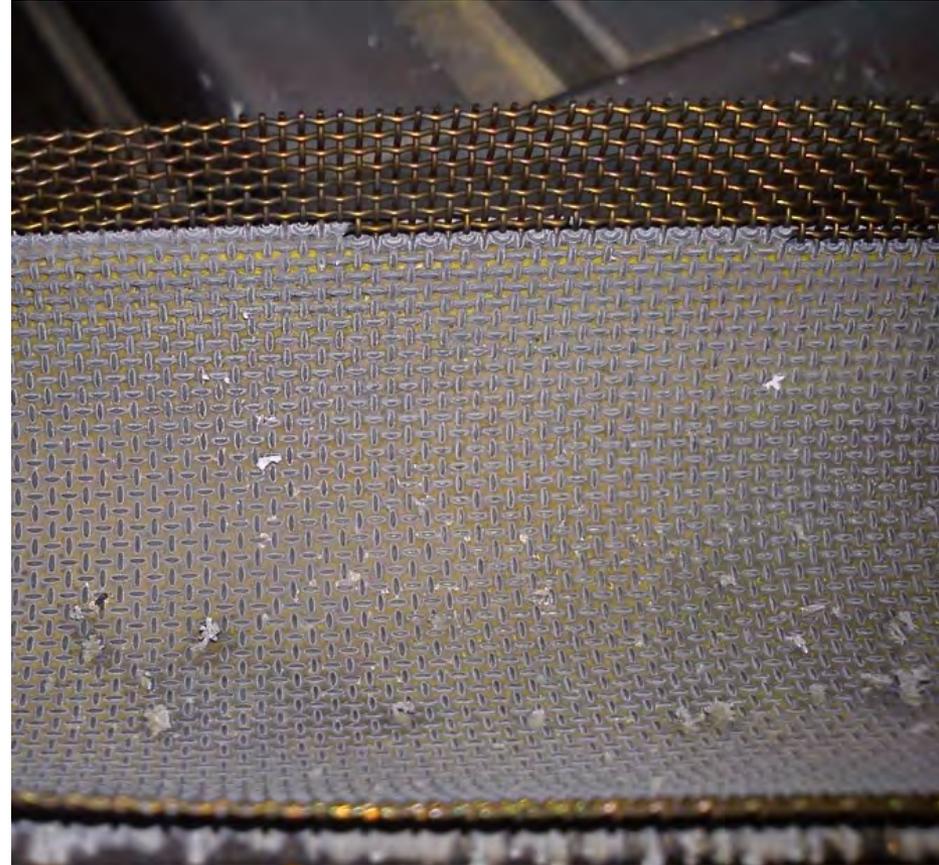
- Aufheizen kann man die schon, aber ohne Lithium kein Plasma...

2013: Erste Lithium Schmelzversuche in Vakuumröhre

> Aller Anfang ist schwer



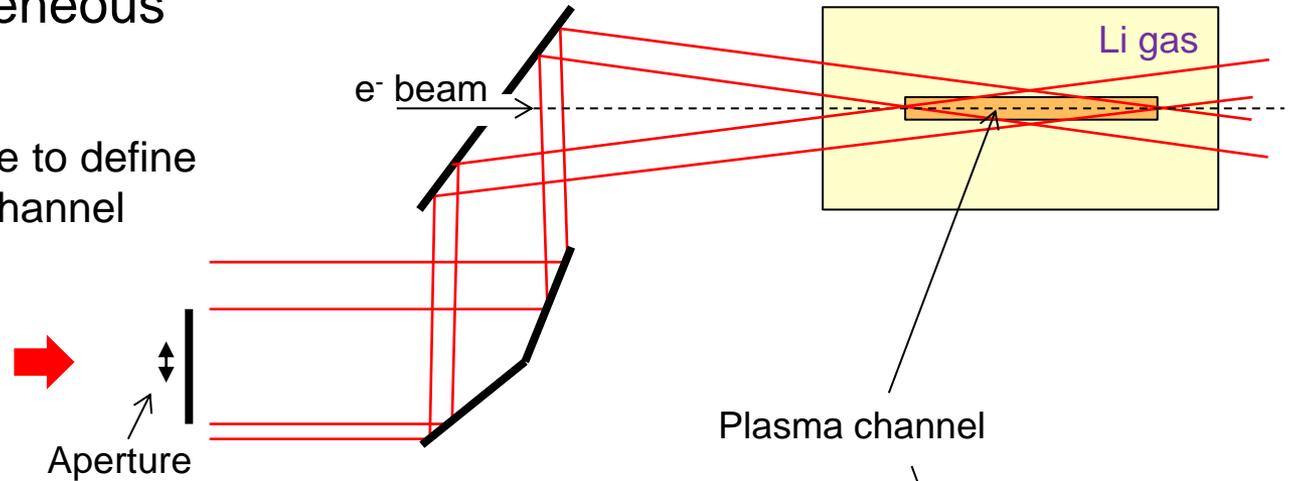
> Viel besser!



Mittlerweile: Wie koppel ich den Ionisationslaser ein?

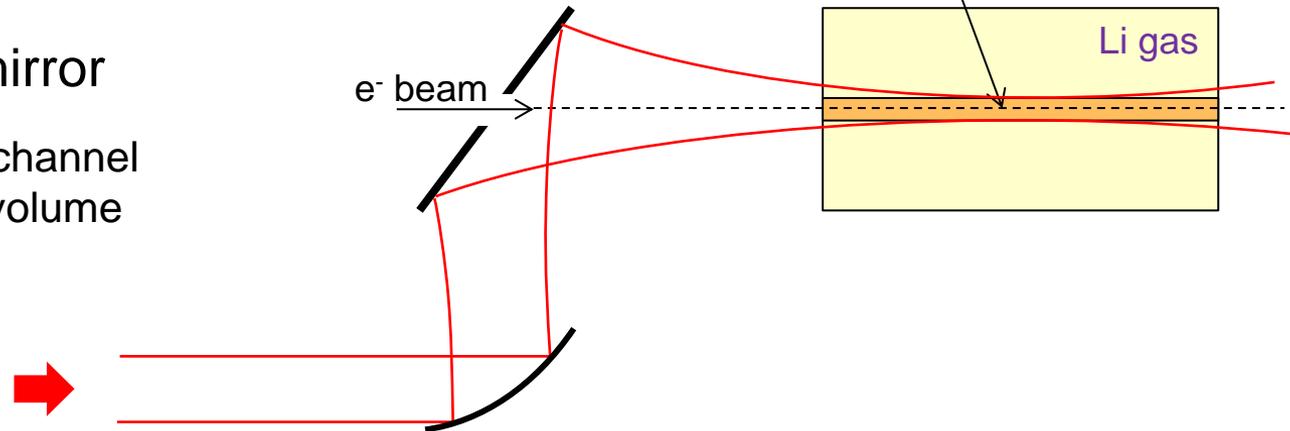
> Axicon for homogeneous ionization profile

- Adjustable aperture to define length of plasma channel



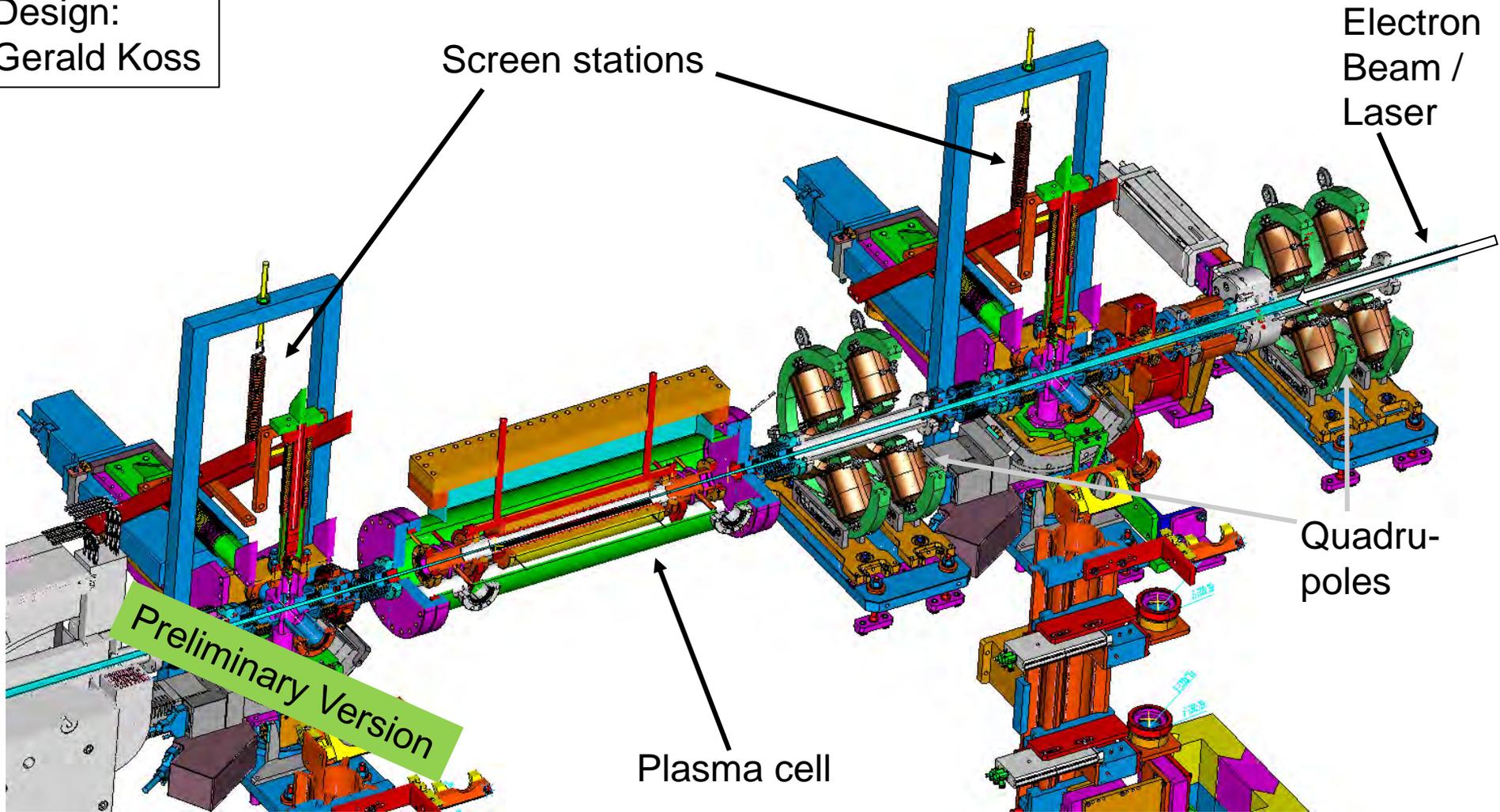
> Simple focusing mirror

- Length of plasma channel defined by Li gas volume



Herbst 2012: Die erste große Krise: Nicht genug Platz!

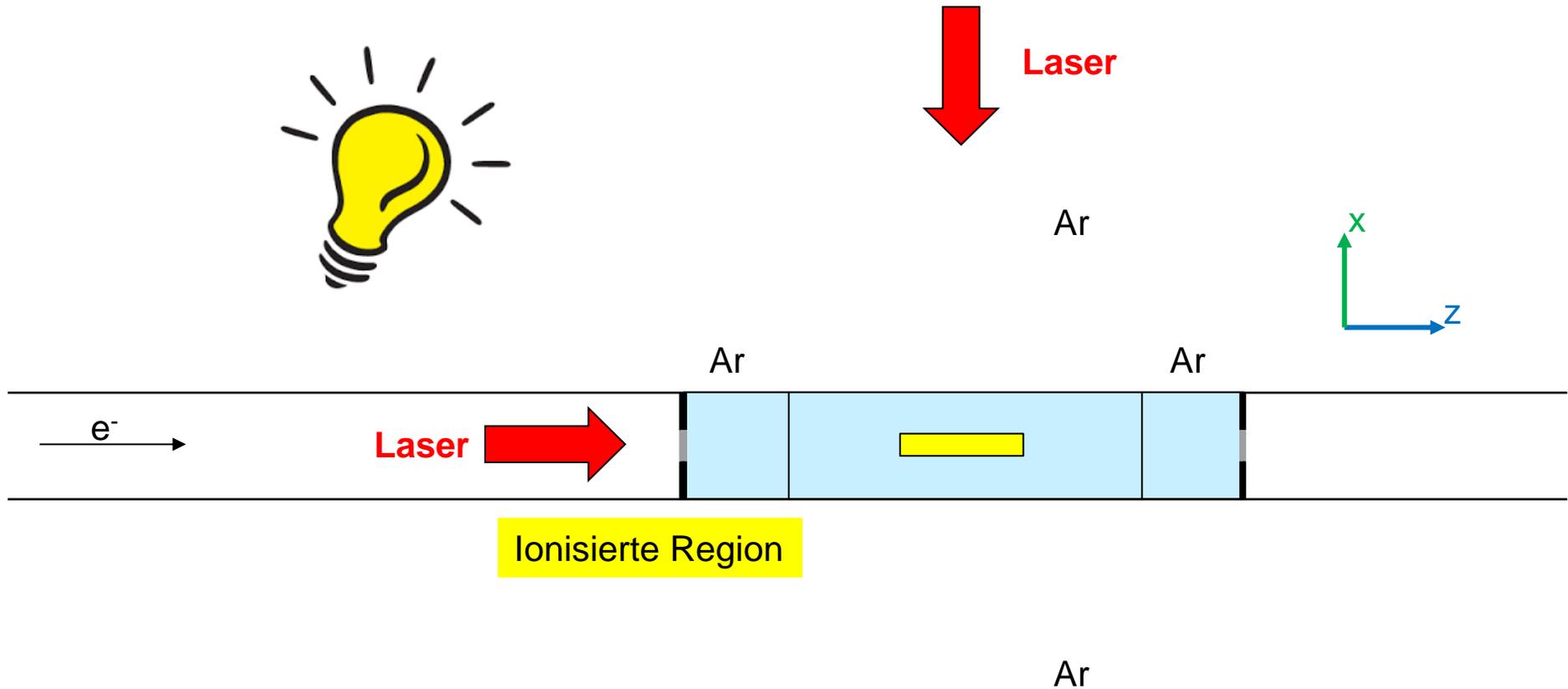
Design:
Gerald Koss



> Zelle passt gerade so, aber kein brauchbares Laserprofil einstellbar

Eine neue Idee muss her!

> Seiteneinkopplung!!!



Plasmazellendesign im Frühling 2013

Design:
Gerald Koss

Preliminary Version

Turbopumpe

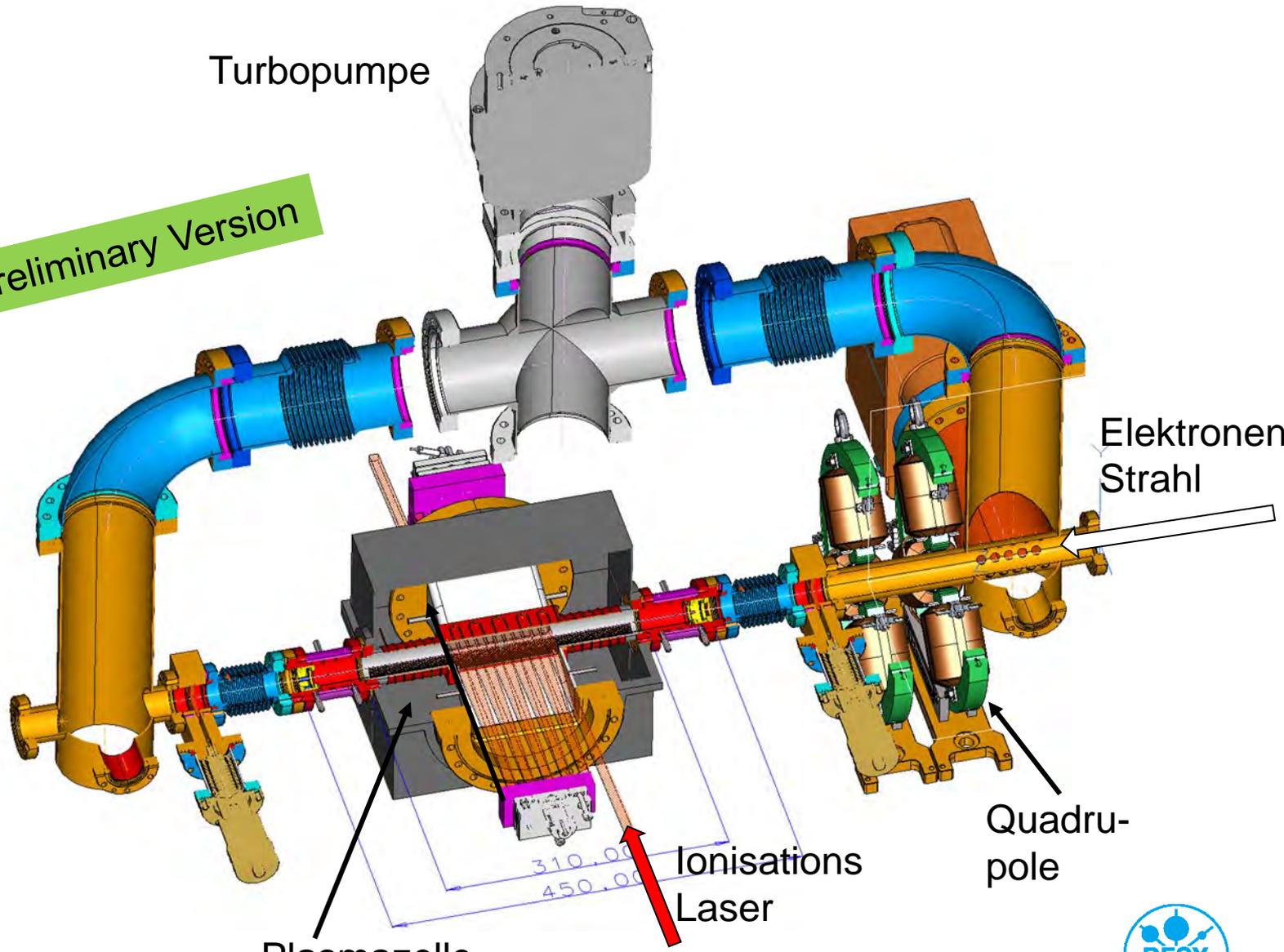
Elektronen
Strahl

Zur
Diagnostics

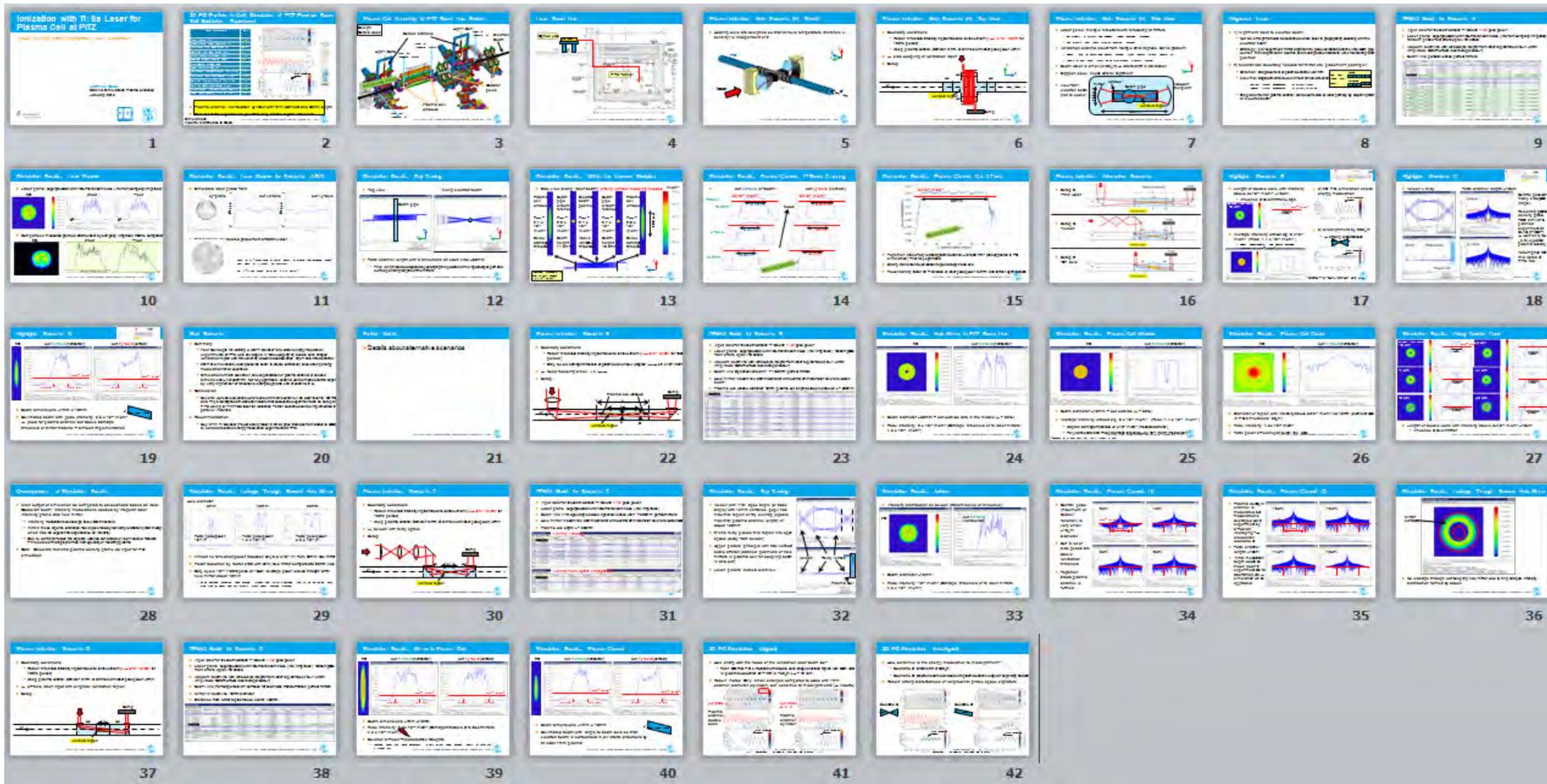
Quadru-
pole

Ionisations
Laser

Plasmazelle



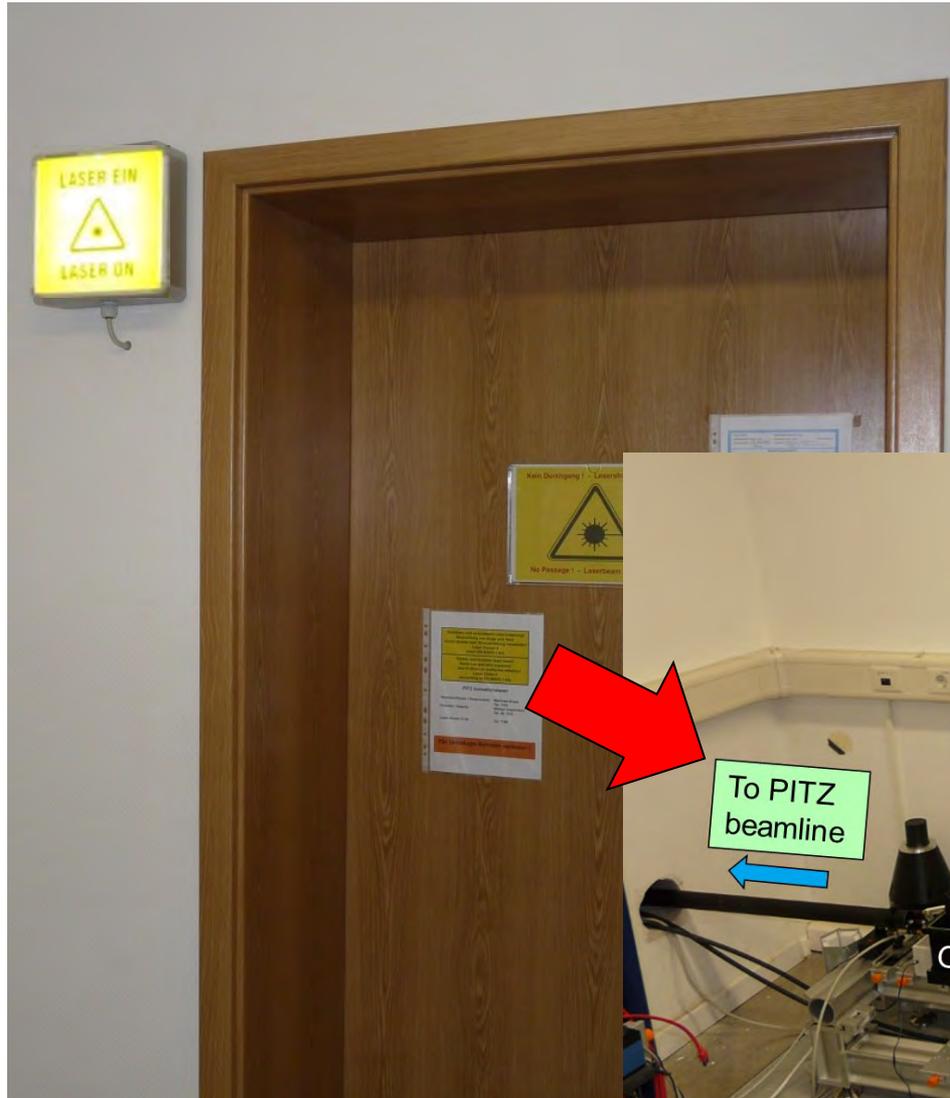
Ionisationslaser #1: Ti:Sa Laser. Viel gerechnet...



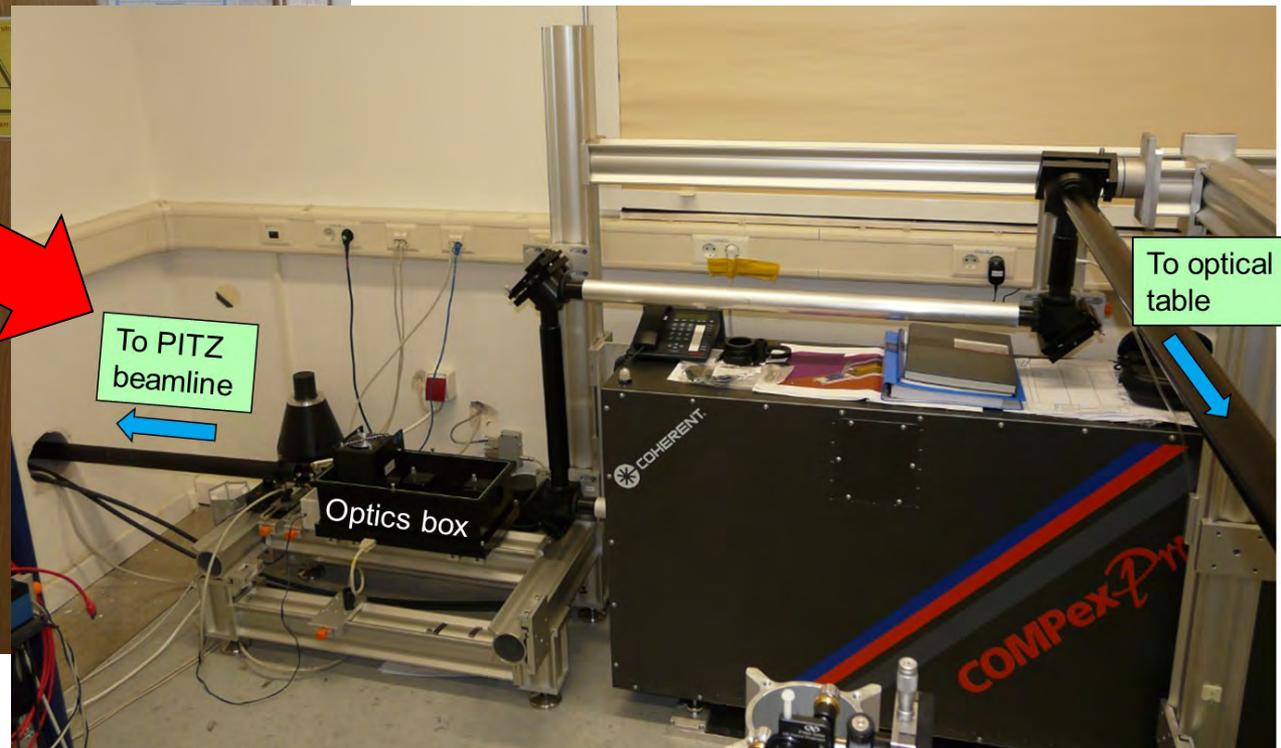
➤ ...aber es geht nicht ☹ - zu aufwendig; zu teuer



Ionisationslaser #2: ArF Laser “das gelbe Zimmer”



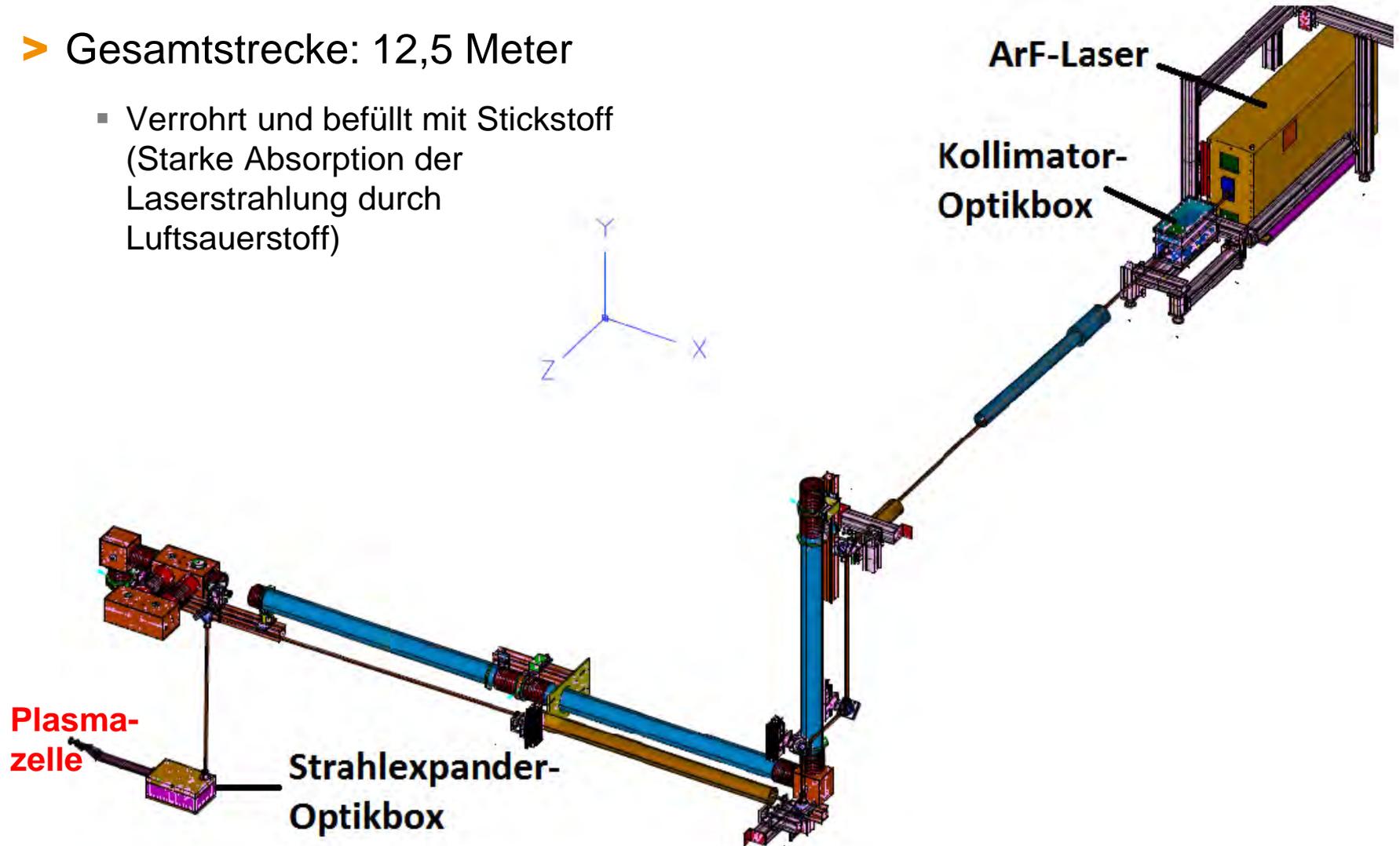
- Coherent COMPexPro 201: bis zu 400 mJ / Puls; 10 Hz
 - UV Laser (193nm) – kann Lithium ionisieren
 - Teilweise finanziert von Bernhard Hidding (UHH)



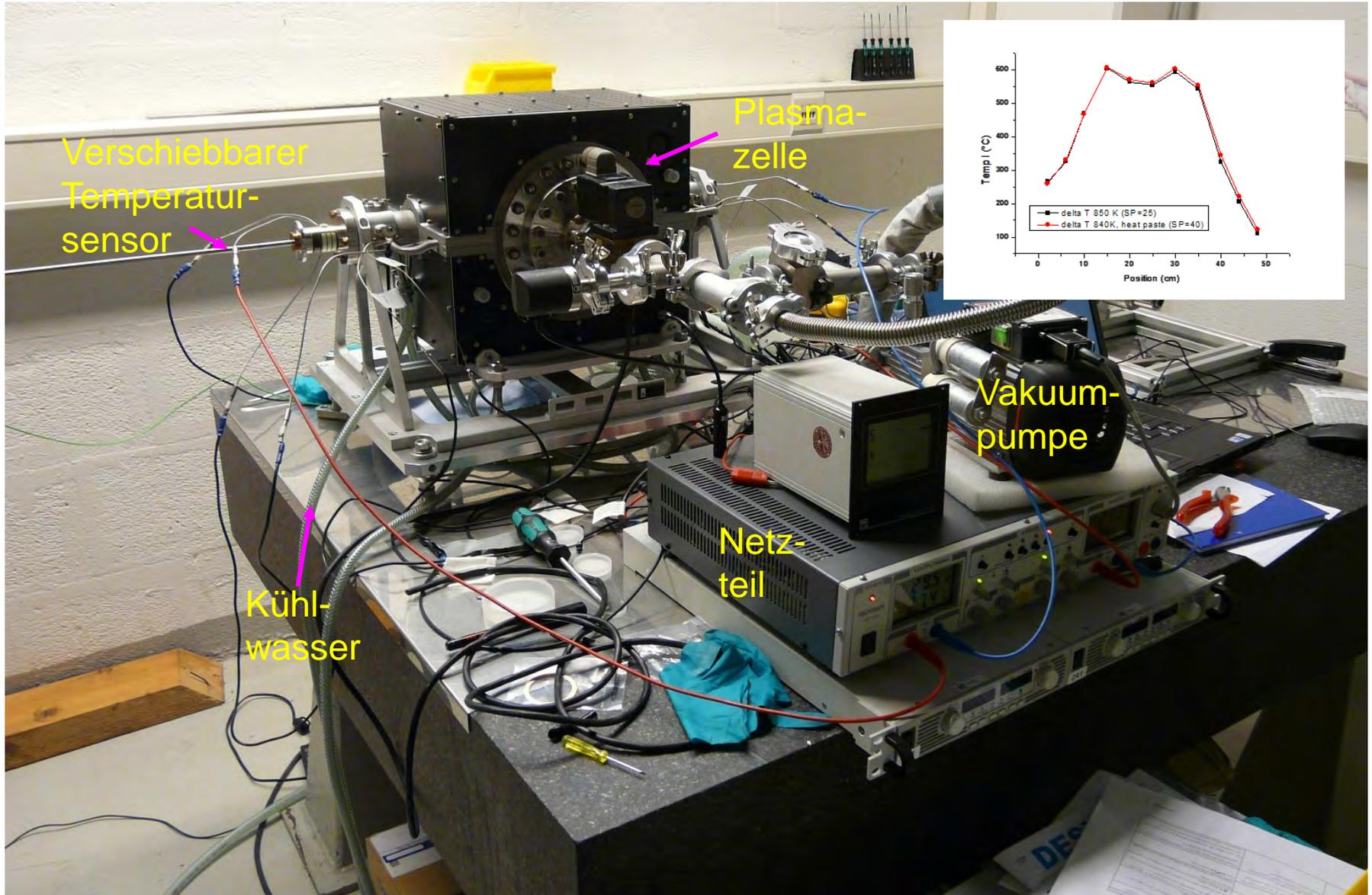
Laserbeamline

> Gesamtstrecke: 12,5 Meter

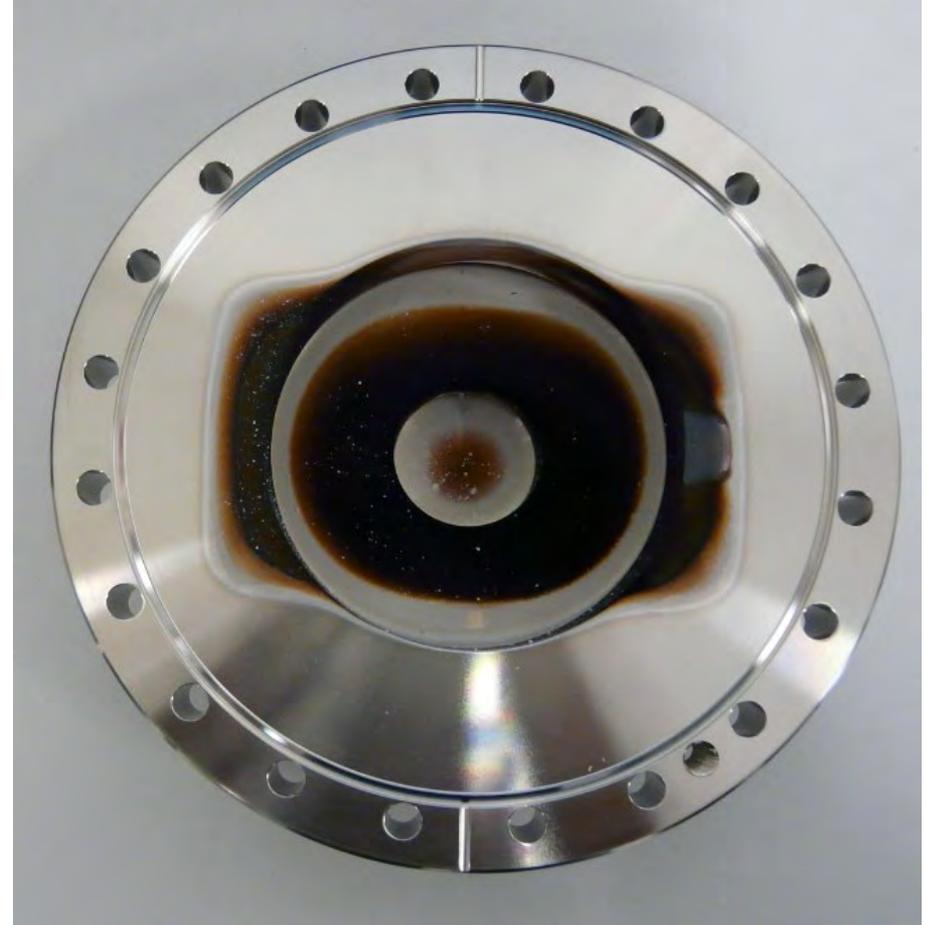
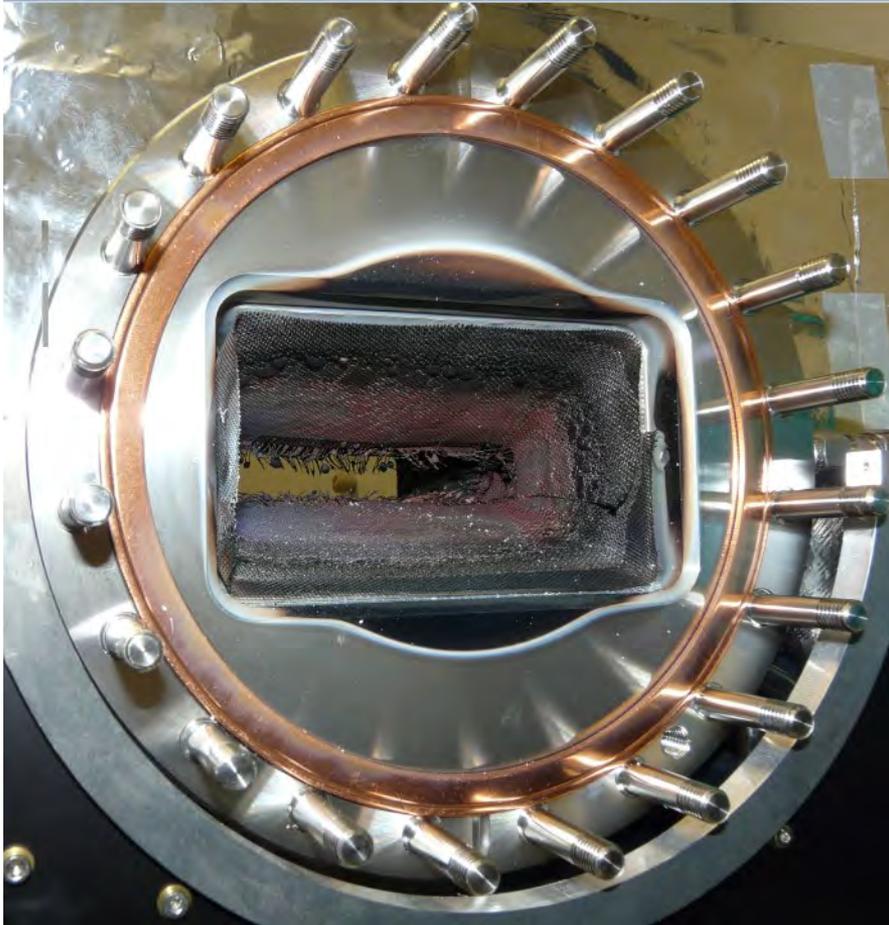
- Verrohrt und befüllt mit Stickstoff (Starke Absorption der Laserstrahlung durch Luftsauerstoff)



Sommer 2014: Die Plasmazelle ist fertig und wird vermessen



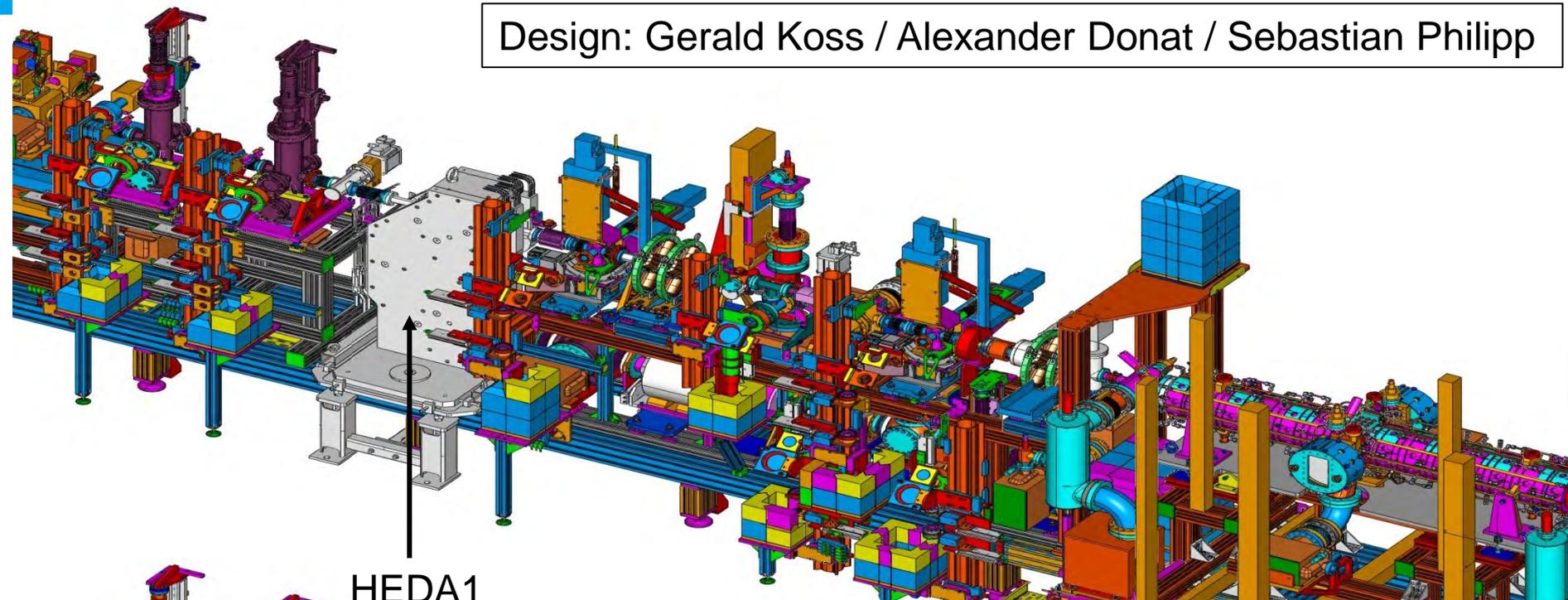
Winter 2014/2015: Ein Missgeschick beim Befüllen der Plasmazelle mit Lithium



➤ Also: Reinigen und von vorne anfangen (diesmal vorsichtiger...)

2014/2015: Es wird Platz geschaffen bei PITZ

Design: Gerald Koss / Alexander Donat / Sebastian Philipp



HEDA1

Plasmazelle

Elektronen Strahl

Quadrupole

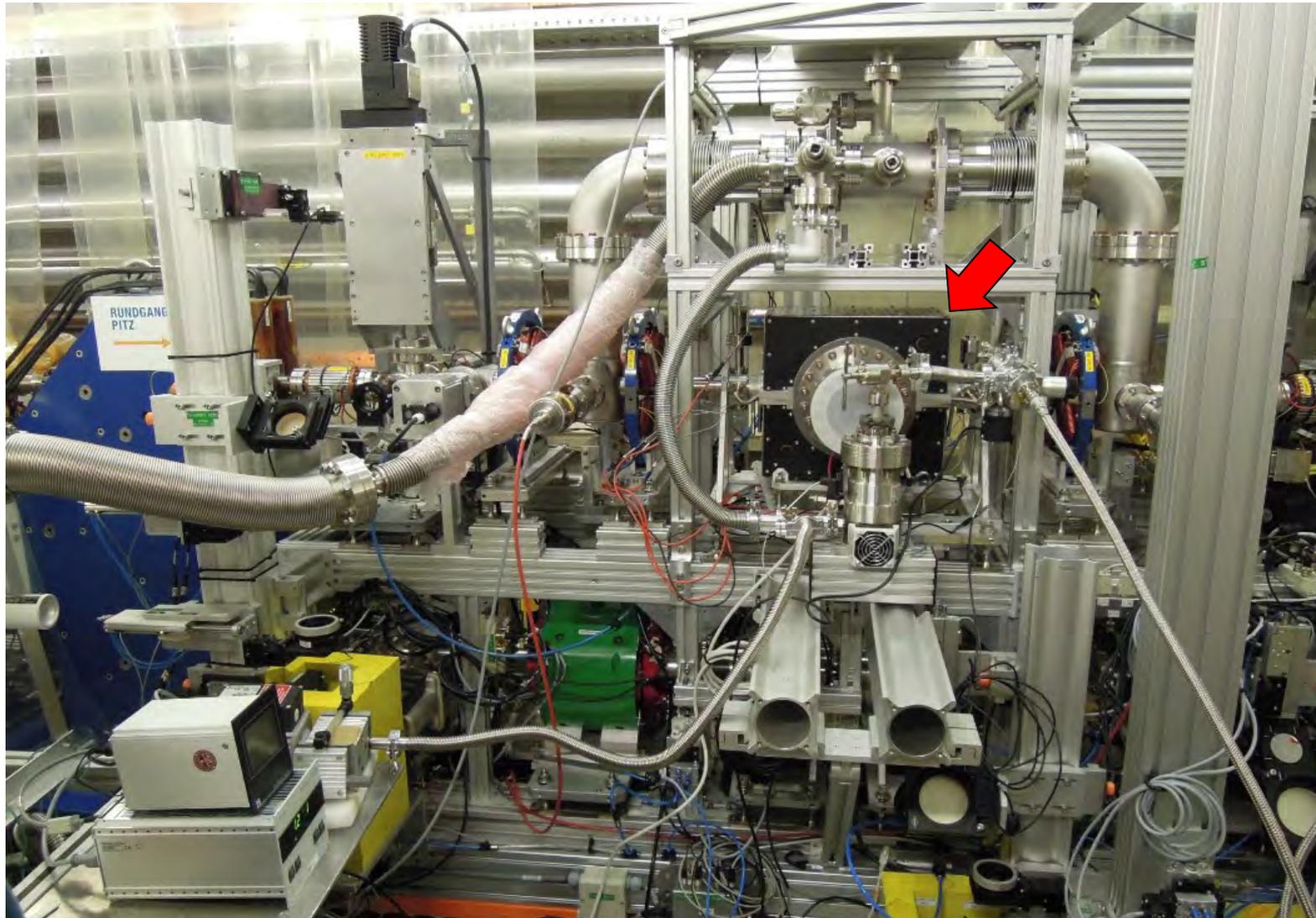
Ionisationslaser

ige 24

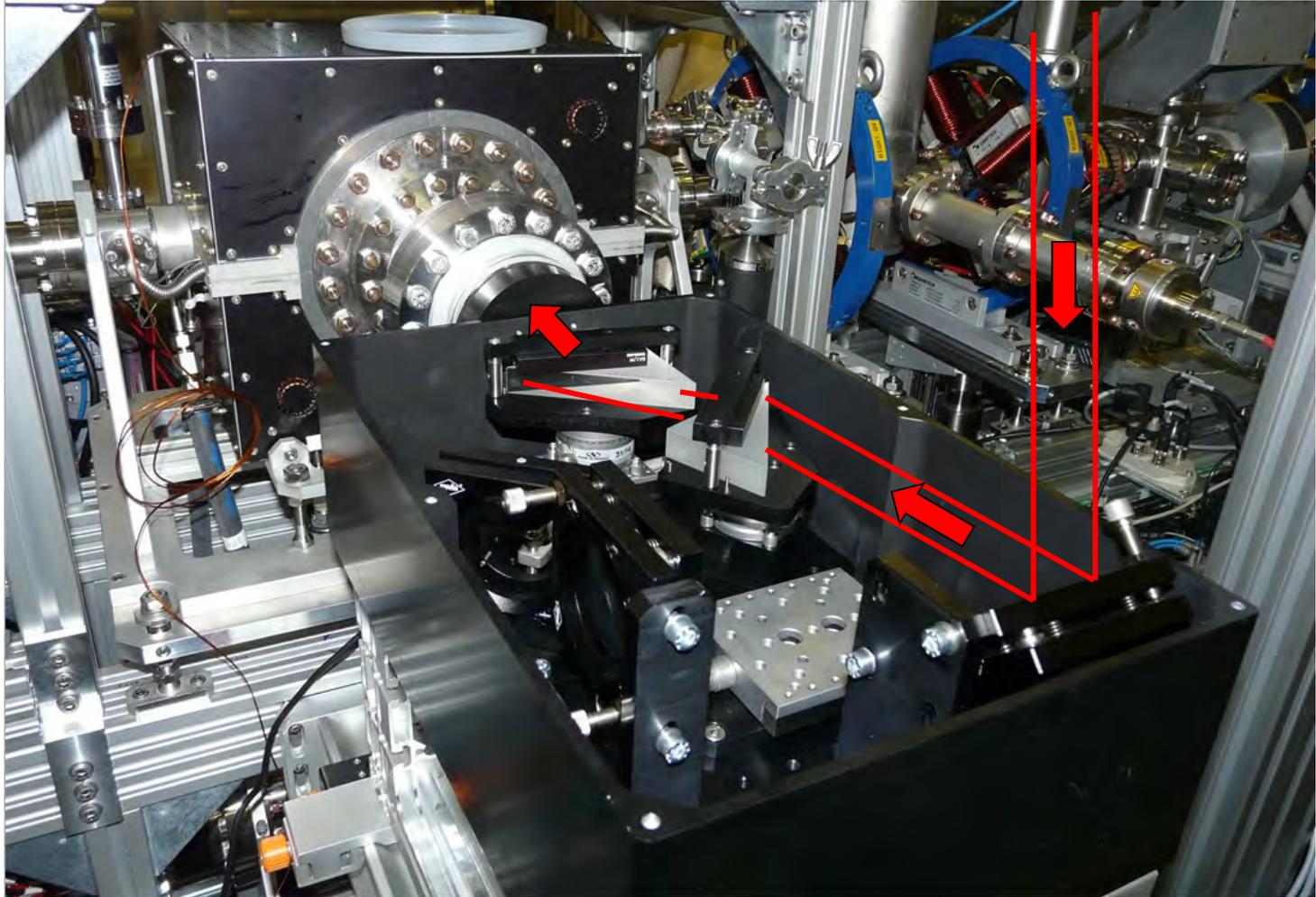


Sommer 2015: Die Plasmazelle wird zum ersten Mal bei PITZ eingebaut

➤ Hier: Befüllen mit Argon Puffergas



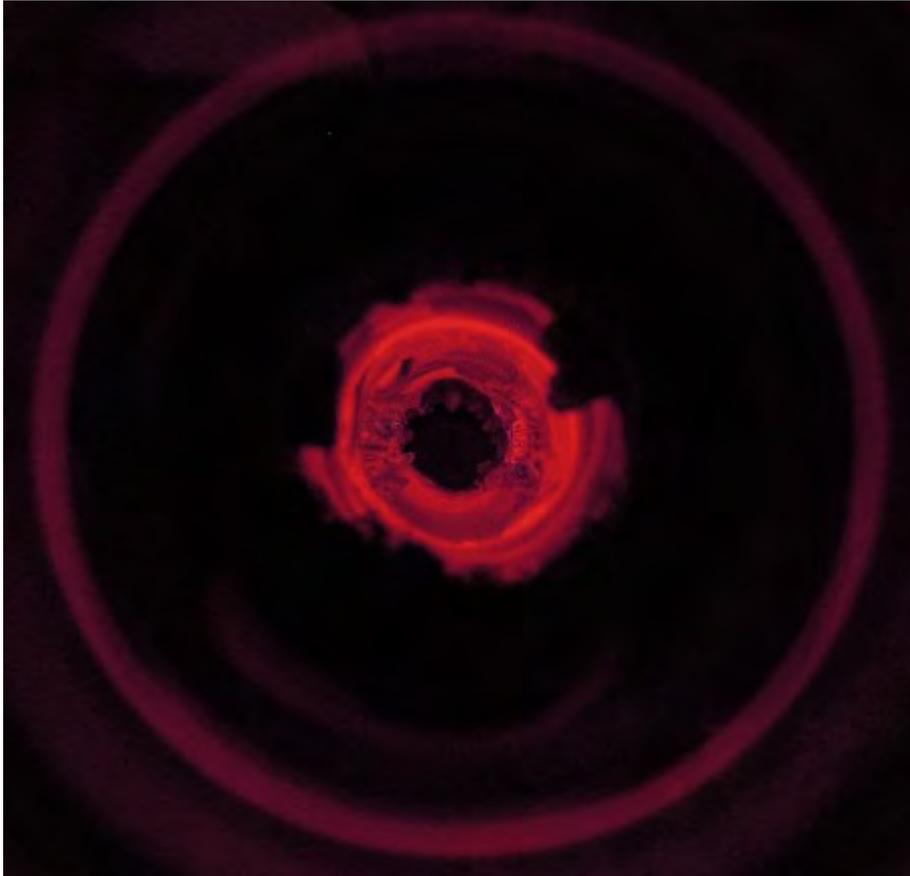
Wie kommen die Laserpulse in die Zelle?



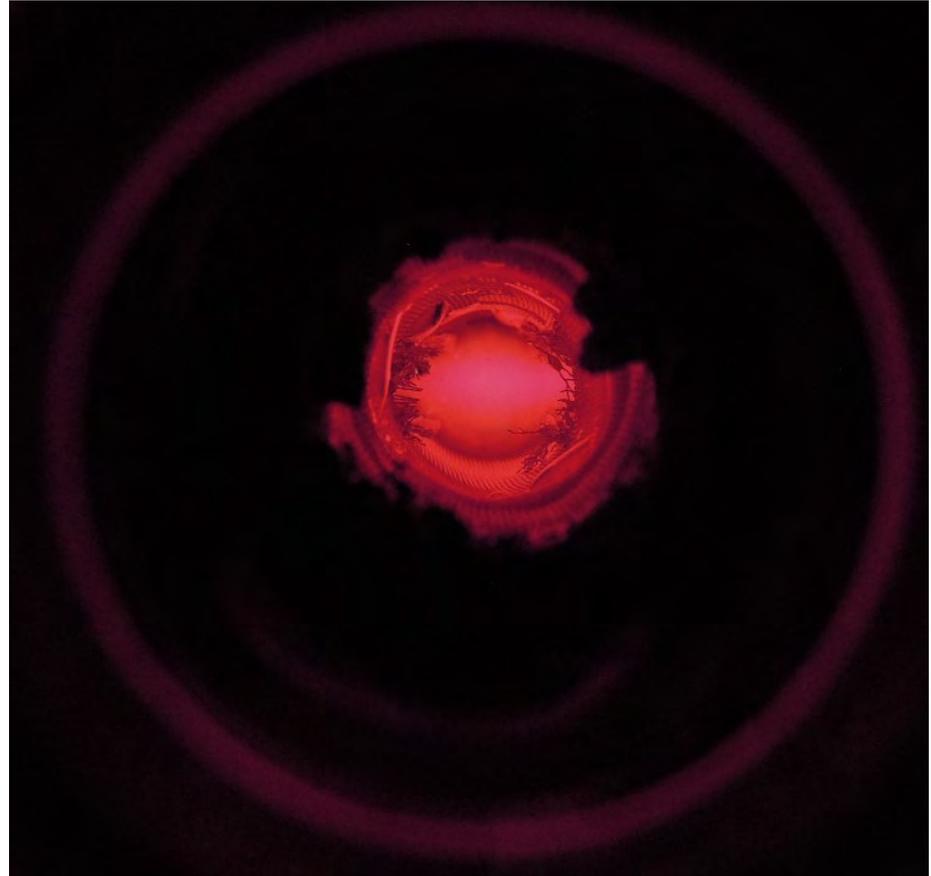
- Nach Schliessen des Deckels: Spülen der Beamline mit Stickstoff

Herbst 2015: Hurra, das erste Plasma!

> Laser aus (Glühen)



> Laser an (Plasma)



> Aber keine Selbstmodulation...

Was hat nicht funktioniert?

> Nach dem misslungenen Experiment:

- Alles genau analysieren, die Fehlerquellen isolieren und beheben:

> **Lithium Gasdichte** zu niedrig

- Besserer Lithiumtransport: Neue Plasmazelle mit Rillen ✓
- Puffergasdruck anpassen: etwas erhöht ✓

> Zu geringe **Ionisationslaser Pulsenergie**

- Verbessertes Strahltransport: Antireflexbeschichtete Zylinderlinsen ✓
- Weniger Absorption: bessere Abdichtung der Verrohrung ✓

> **Elektronenstrahl: Anstieg** nicht scharf genug?

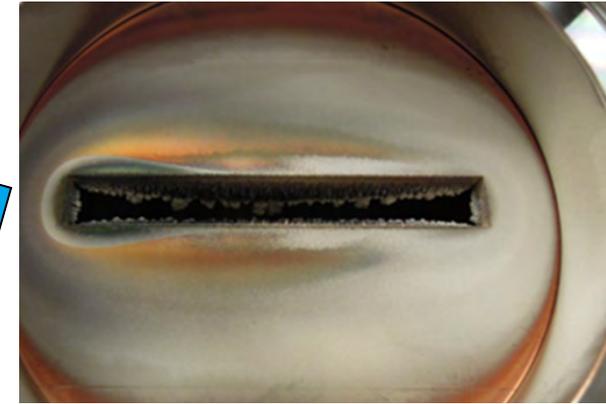
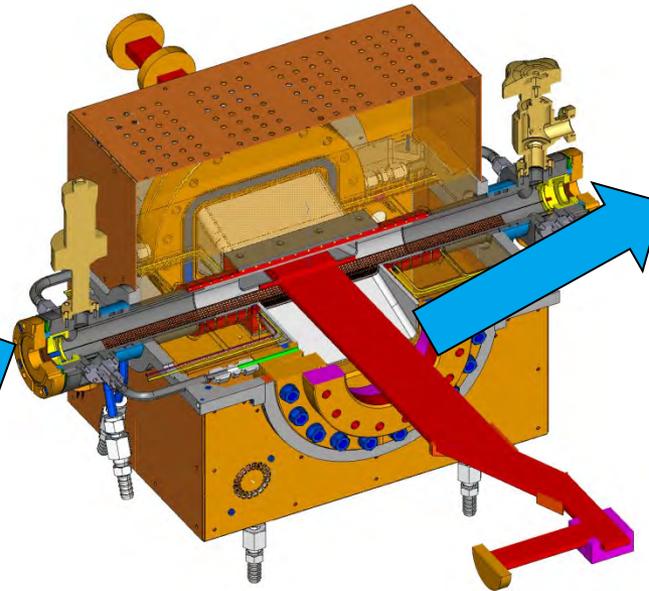
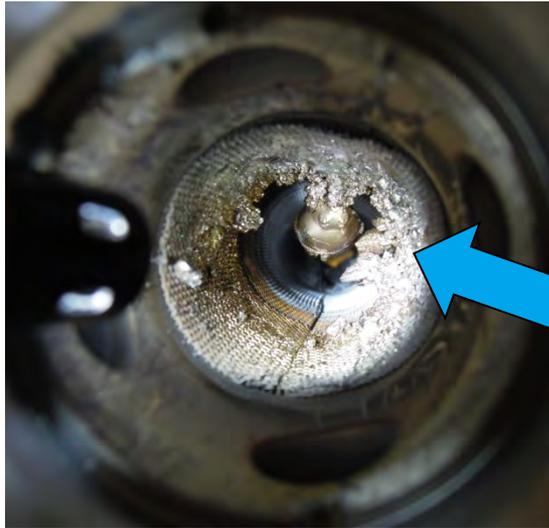
- Optimierung der zeitlichen Struktur mit Computerprogramm ✓

> Zu starke **Streuung des Elektronenstrahls** am Eingangsfenster der Zelle

- Dünnere Folie: von 8 μm auf 0,9 μm ✓

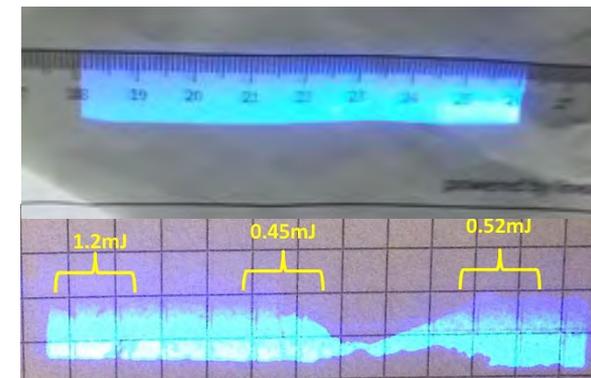


Ein Problem: Schlechter Lithium Transport



- > The problem of lithium condensation was partially solved by adjusting the buffer gas pressure and extending side arms.

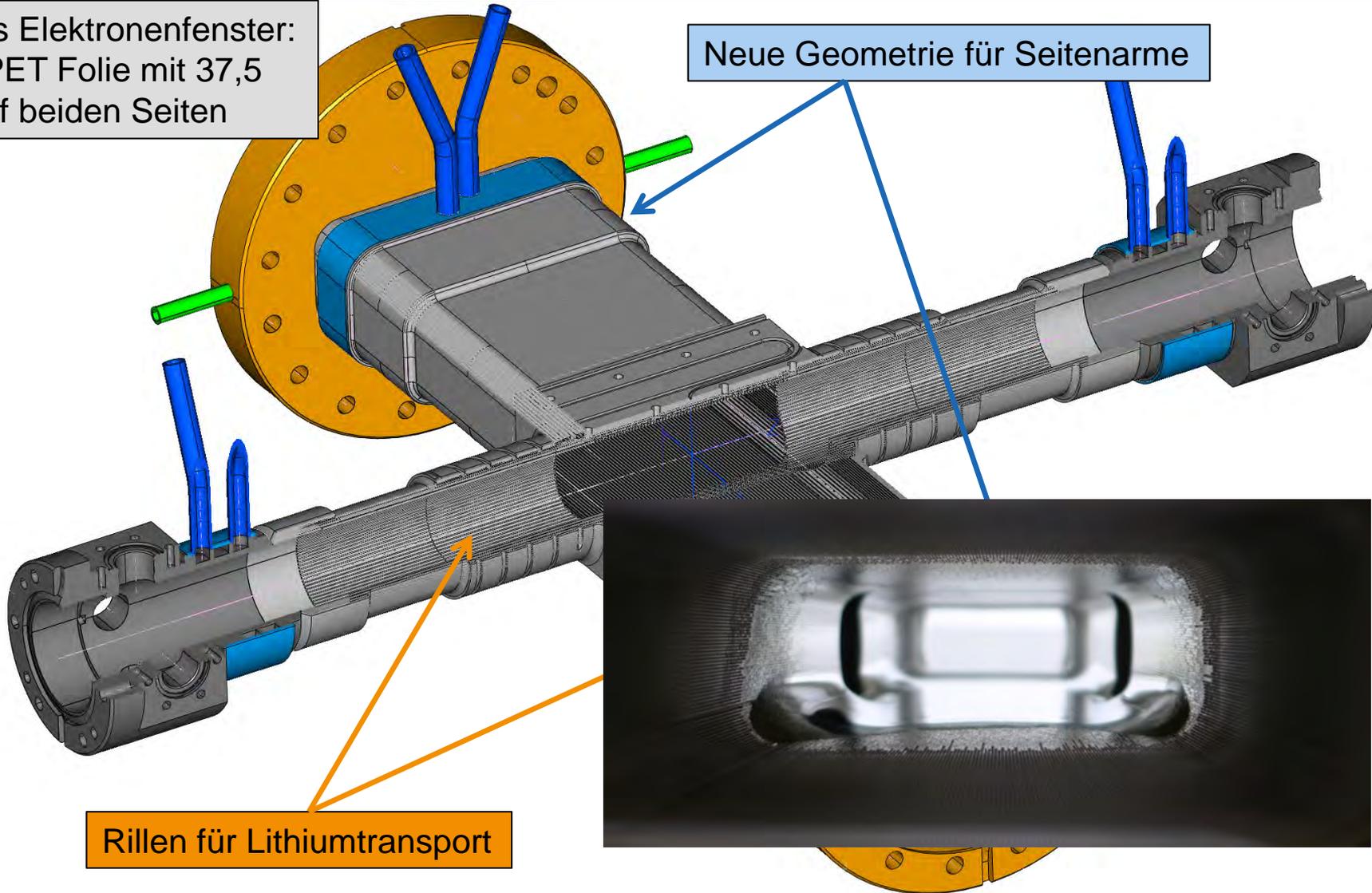
- > Ionization laser profiles before and after few days of operation:



Sommer 2016: Die neue, verbesserte Plasmazelle

Eingangsfenster:
0,9 μm PET Folie mit 37,5
nm Al auf beiden Seiten

Neue Geometrie für Seitenarme



Rillen für Lithiumtransport

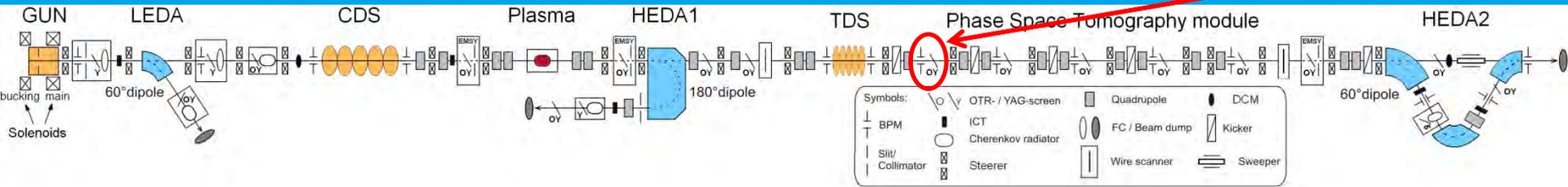
Design:
Gerald Koss

Was hat nicht funktioniert?

- > Nach dem misslungenen Experiment:
 - Alles genau analysieren, die Fehlerquellen isolieren und beheben:
- > **Lithium Gasdichte** zu niedrig
 - Besserer Lithiumtransport: Neue Plasmazelle mit Rillen ✓
 - Puffergasdruck anpassen: etwas erhöht ✓
- > Zu geringe **Ionisationslaser Pulsenergie**
 - Verbessertes Strahltransport: Antireflexbeschichtete Zylinderlinsen ✓
 - Weniger Absorption: bessere Abdichtung der Verrohrung ✓
- > **Elektronenstrahl: Anstieg** nicht scharf genug?
 - Optimierung der zeitlichen Struktur mit Computerprogramm ✓
- > Zu starke **Streuung des Elektronenstrahls** am Eingangsfenster der Zelle
 - Dünnere Folie: von 8 μm auf 0,9 μm ✓



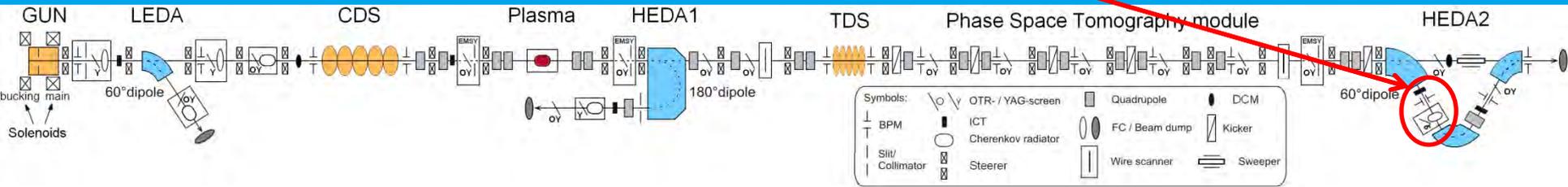
Oktober 2016: Erste Experimentelle Resultate



➤ Die weltweite erste Aufnahme eines selbstmodulierten Teilchenstrahls!

Q=0.97 nC
Plasmadichte: $\approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

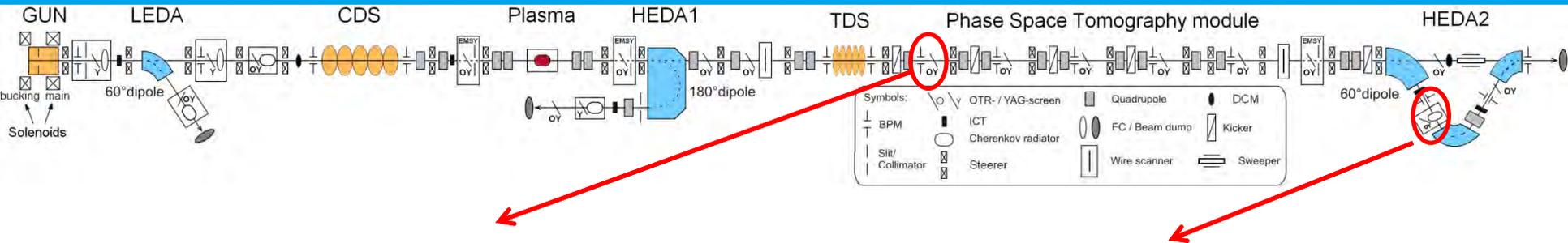
Oktober 2016: Erste Experimentelle Resultate



➤ Der ‚longitudinale Phasenraum‘ eines selbstmodulierten Teilchenstrahls

Q=0.97 nC
Plasmadichte: $\approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

Selbstmodulation vs. Plasmadichte



- Anpassung der Plasmadichte durch Verschieben der Ankunftszeiten von Ionisationslaserpuls und Elektronenstrahl (Plasma rekombiniert mit einer Halbwertszeit von einigen Mikrosekunden)

- Entwicklung eines Experiments zur Plasmabeschleunigung bei PITZ von 0 auf 100 innerhalb von 4 Jahren
 - Entwicklung einer neuartigen Plasmazelle
 - Aufbau der benötigten Peripherie (Vakuum, Laser etc.)
 - Erfolgreiche Durchführung eines Experiments zur Selbstmodulation
- Viele Details wurden aus Zeitgründen ausgelassen
- Ausblick: Experimente gehen weiter
 - Genauere Betrachtung der Selbstmodulation
 - Plasmabeschleunigung
 - Experimente mit Gasentladungs-Plasmazelle

Vielen Dank an alle Beteiligten, besonders:

- Daniel Bandke
- Alex Donat
- Johannes Engel
- Gerald Koss
- Osip Lishilin
- Gregor Loisch
- Ayri Myufti
- Gaurav Pathak
- Sebastian Philipp
- Mathias Reimann
- Dieter Richter
- Marc Schinkel
- Bert Schöneich
- Jörg Schultze
- Rico Schütze
- Frank Stephan
- Gunter Trowitzsch
- ...

