

Fusion mit Laser und Teilchenstrahlen für die Stromerzeugung - Stand und Perspektiven



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

National Ignition Facility



Aktualität

NIF Fertiggestellt 2009

Beginn Experimente 2009

Erste Kampagne 2010

Ende der ersten Kampagne 2012

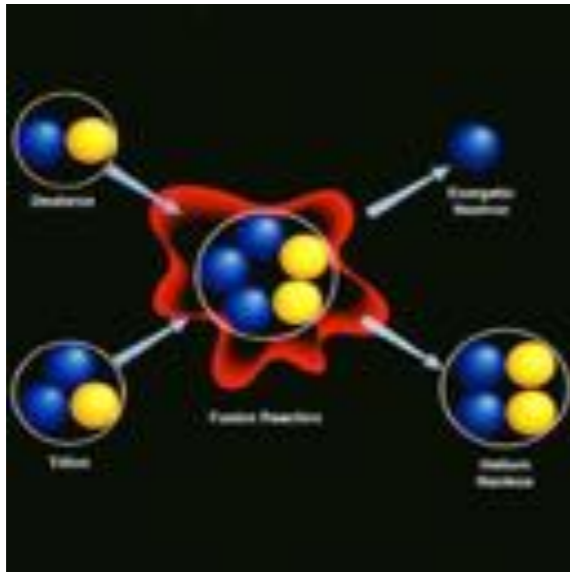
Workshop Science for Ignition @ NIF

High-Foot Kampagne 2013

Adiabate shaping 2015



Plasma Einschlussbedingung: Lawson Kriterium: $n\tau = 10^{14}$



Magnetic Confinement Fusion

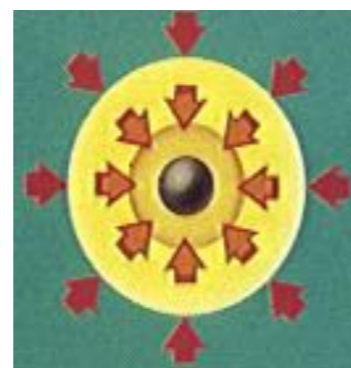
Dichte = 10^{14} cm^{-3}
Einschlusszeit = 1 Sekunde

Inertial Confinement Fusion

Dichte = 10^{25} cm^{-3}
Einschlusszeit = 10 Pikosekunden



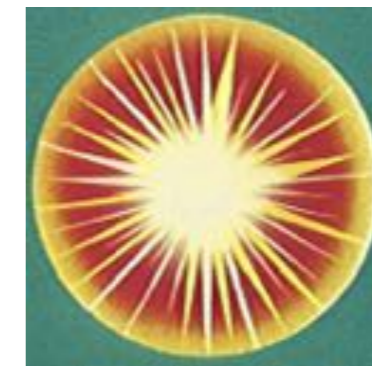
Bestrahlung
der
Oberfläche



Kompression
(Raketen-
prinzip)



Zentrale
Zündung



Burn

$$n \cdot \tau \geq 10^{14} \text{ s/cm}^3 \rightarrow \rho R > 1 \text{ g/cm}^2$$

n: Particle number density [cm^{-3}]

ρ : density [g/cm^3]

τ : Confinement time [s]

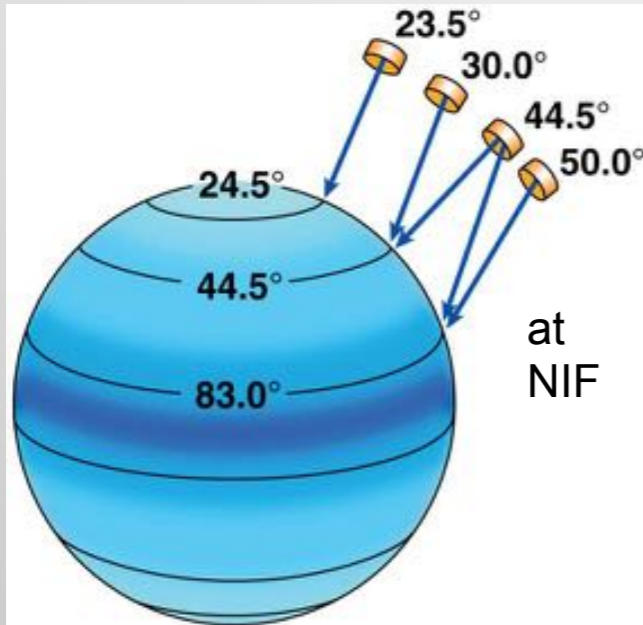
T: Temperature [keV]

R: compressed fuel radius

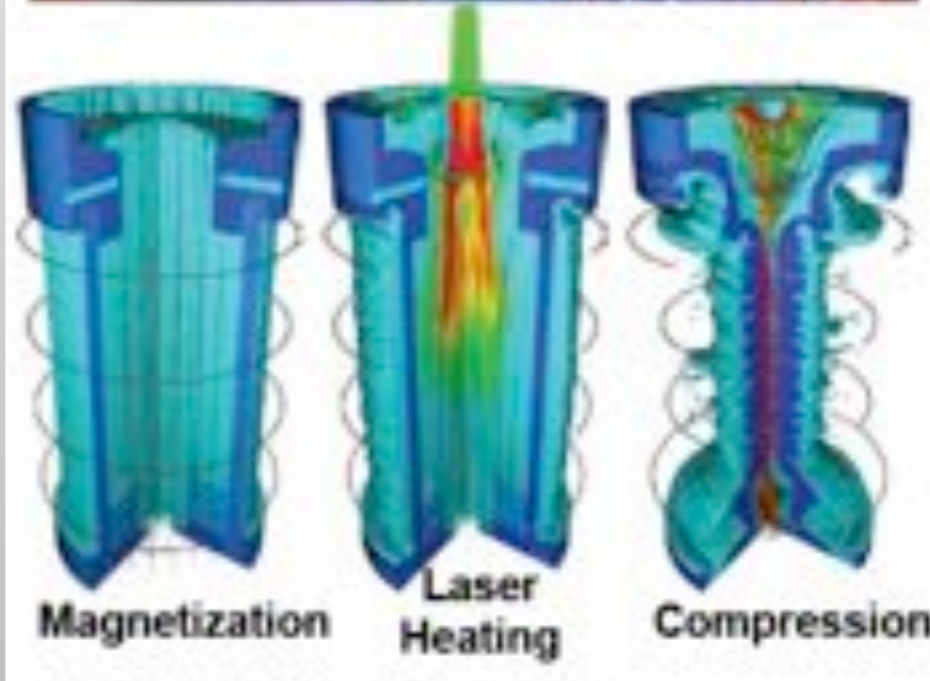
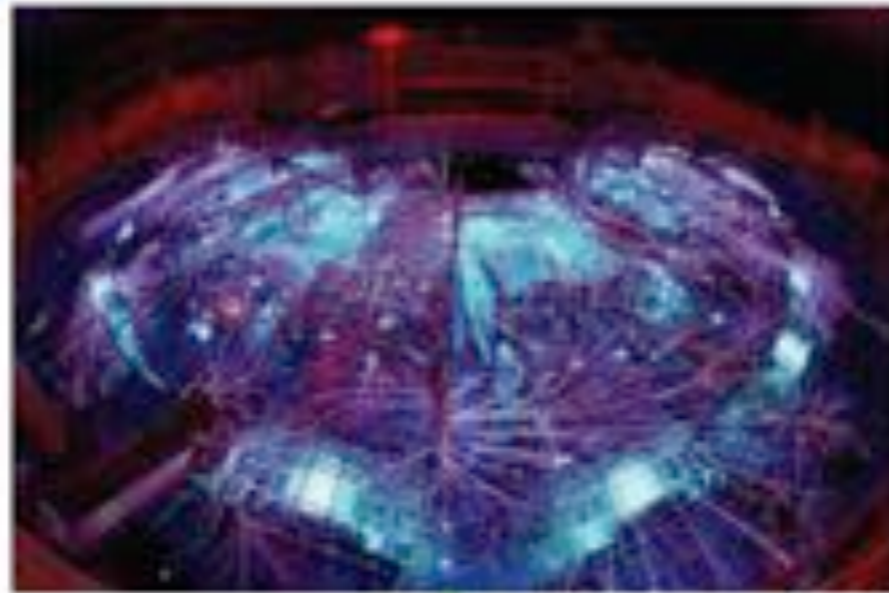
- Bei $\rho R = 3 \text{ g/cm}^2$ i.e. $f_b = 30\%$ $Y = 100 \text{ MJ/mg}$
- 1 mg DT muss komprimiert werden zu 336 g/cm^3 oder 1680 x Festkörperdichte (0.2 g/cm^3) für $\rho R = 3 \text{ g/cm}^2$.

Three approaches to ignition are being pursued, with implosions that are Laser, Magnetically or X-ray driven

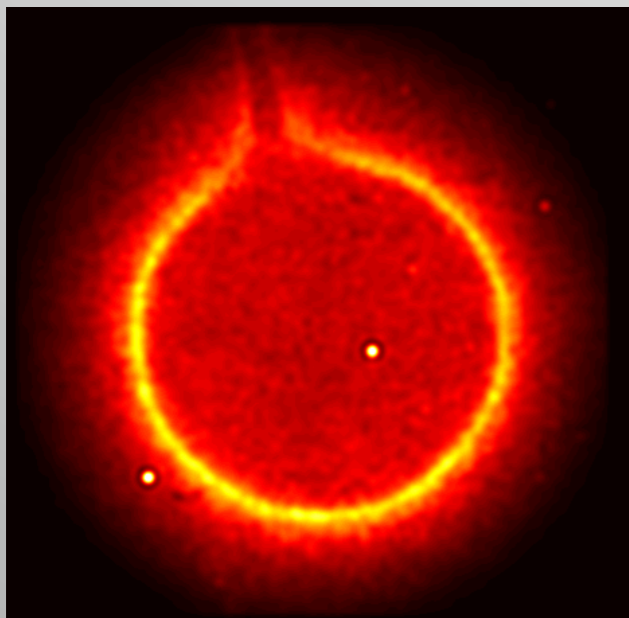
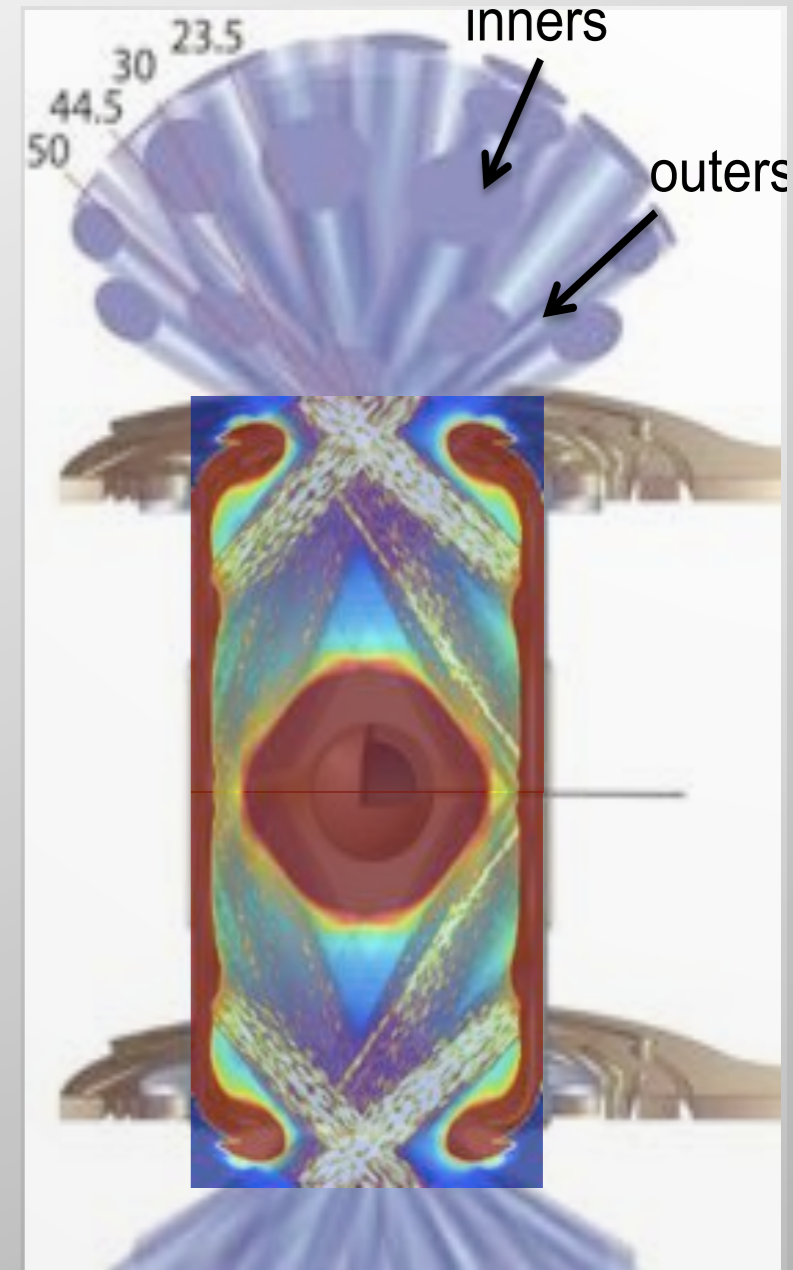
Laser: Directly Driven (Spherical on Ω , Polar on NIF) led by URLLE



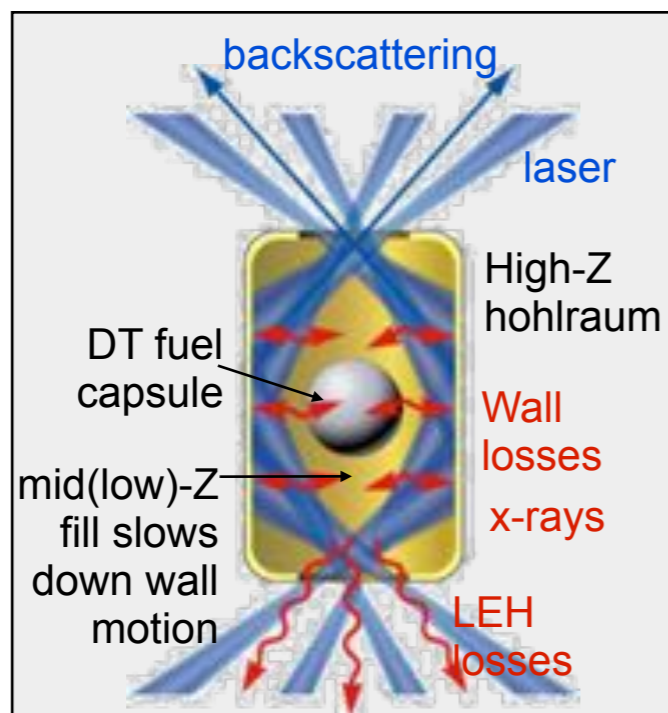
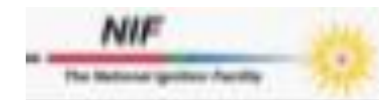
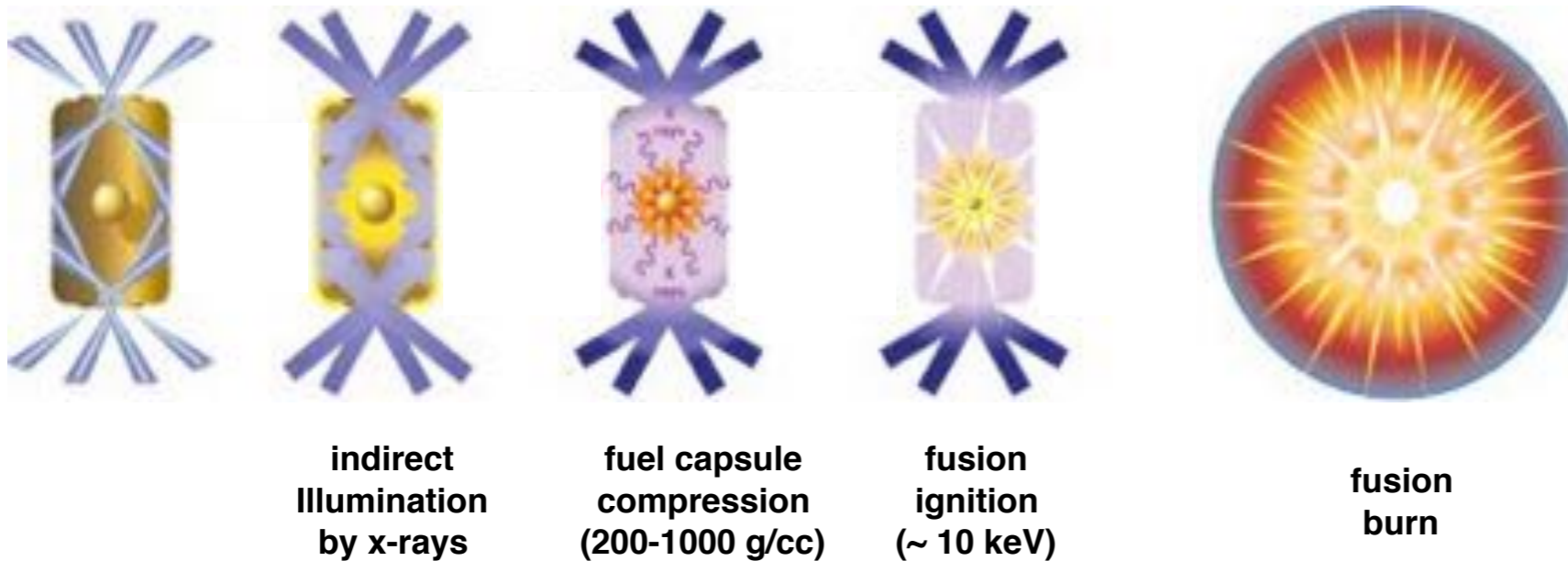
Magnetically: Magnetized Liner Inertial Fusion at Sandia Nat'l Lab



X-ray: Produced by NIF laser at LLNL with an Intern't'l team



Um die enormen Anforderungen an die Symmetrie zu gewährleisten wird in der ersten Kampagne die indirekte Zündung versucht



Zündung bedarf der Optimierung von:

- **Hohlraum Design:**
 - Laserabsorption/ -propagation, backscattering
 - Laser Konversionseffizienz in X-rays
 - Hohlraum Re-emissionseffizienz (Wand+LEH Verluste)
- **Implosiondynamik der Kompression**
 - shock timing, EOS ablator studies
- **Kompressionssymmetrie der Kapsel**

NIF



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



This work performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory under Contract DE-AC52-07NA27344

Aufgabe: Verlässliche Zündung einer Fusionsreaktion mit Gain bei niedrigster möglicher Laserenergie

NIF is
70,000
square meters



NIF-0705-11159 L39

NIF concentrates all the energy in a football stadium-sized facility into a mm³

Matter
Temperature > 10⁸ K
Radiation
Temperature > 3.5 × 10⁶ K
Densities > 10³ g/cm³
Pressures > 10¹¹ atm



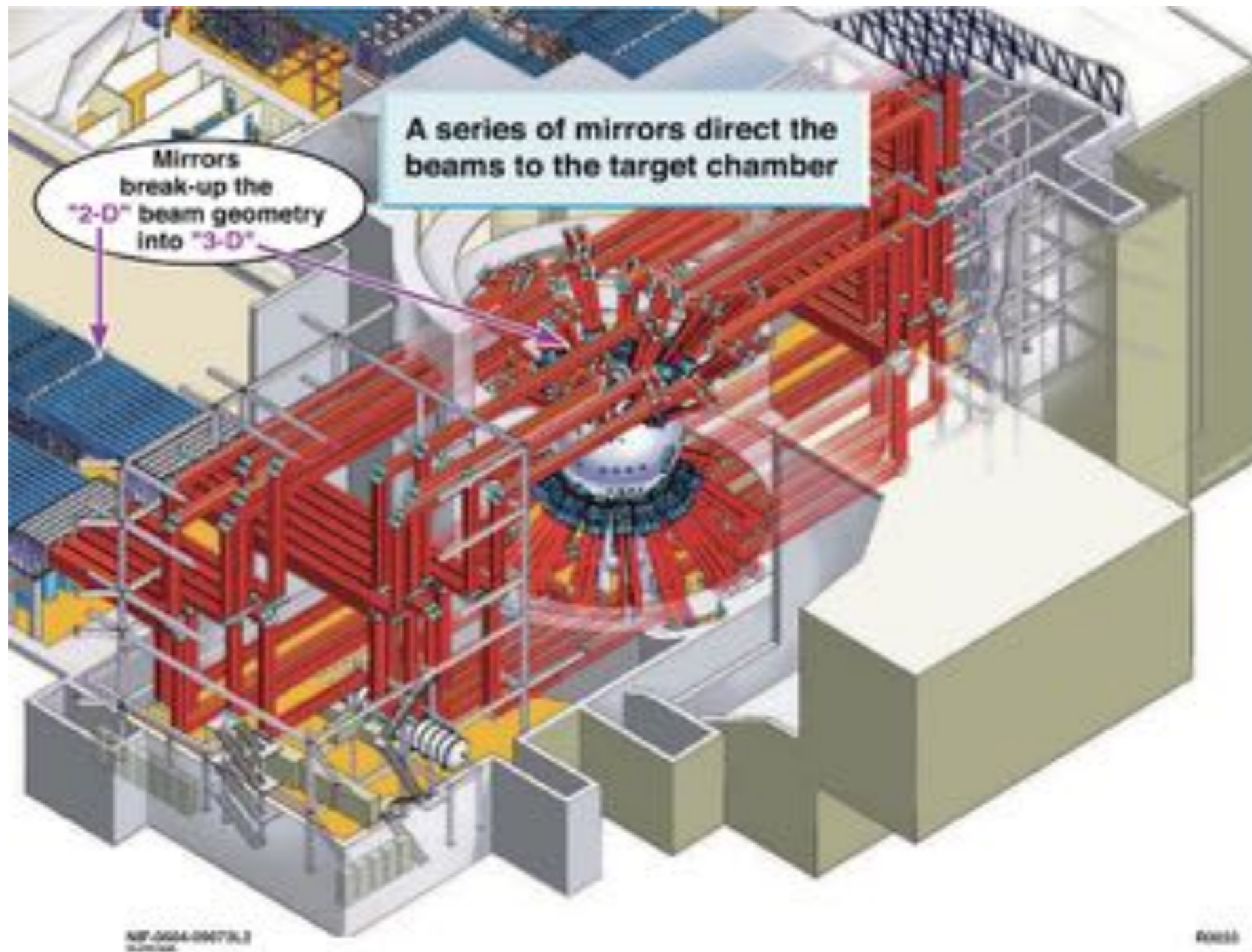
Eine von zwei Laserbays



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



NIF-0506-1195



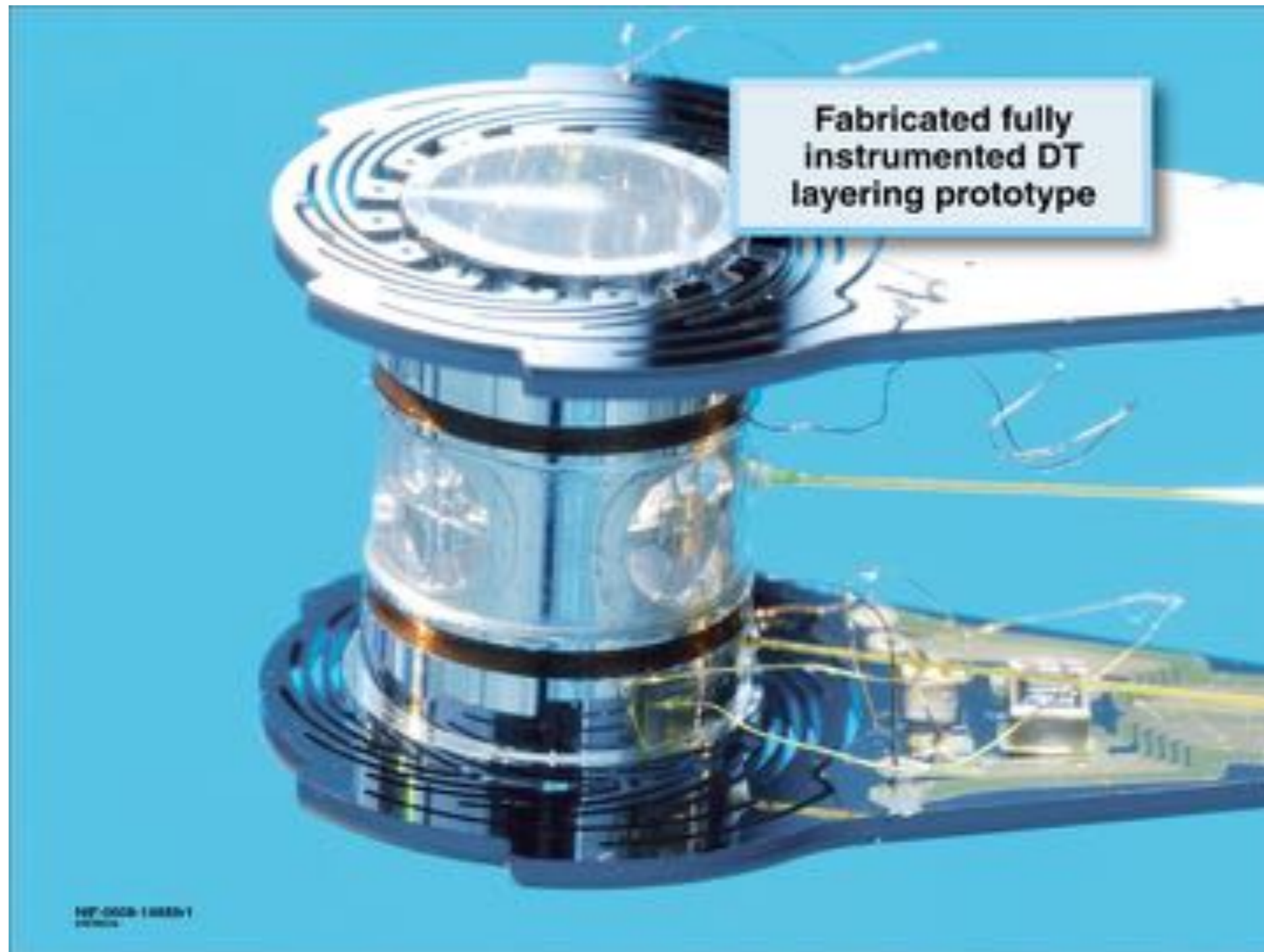
Targetkammer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT







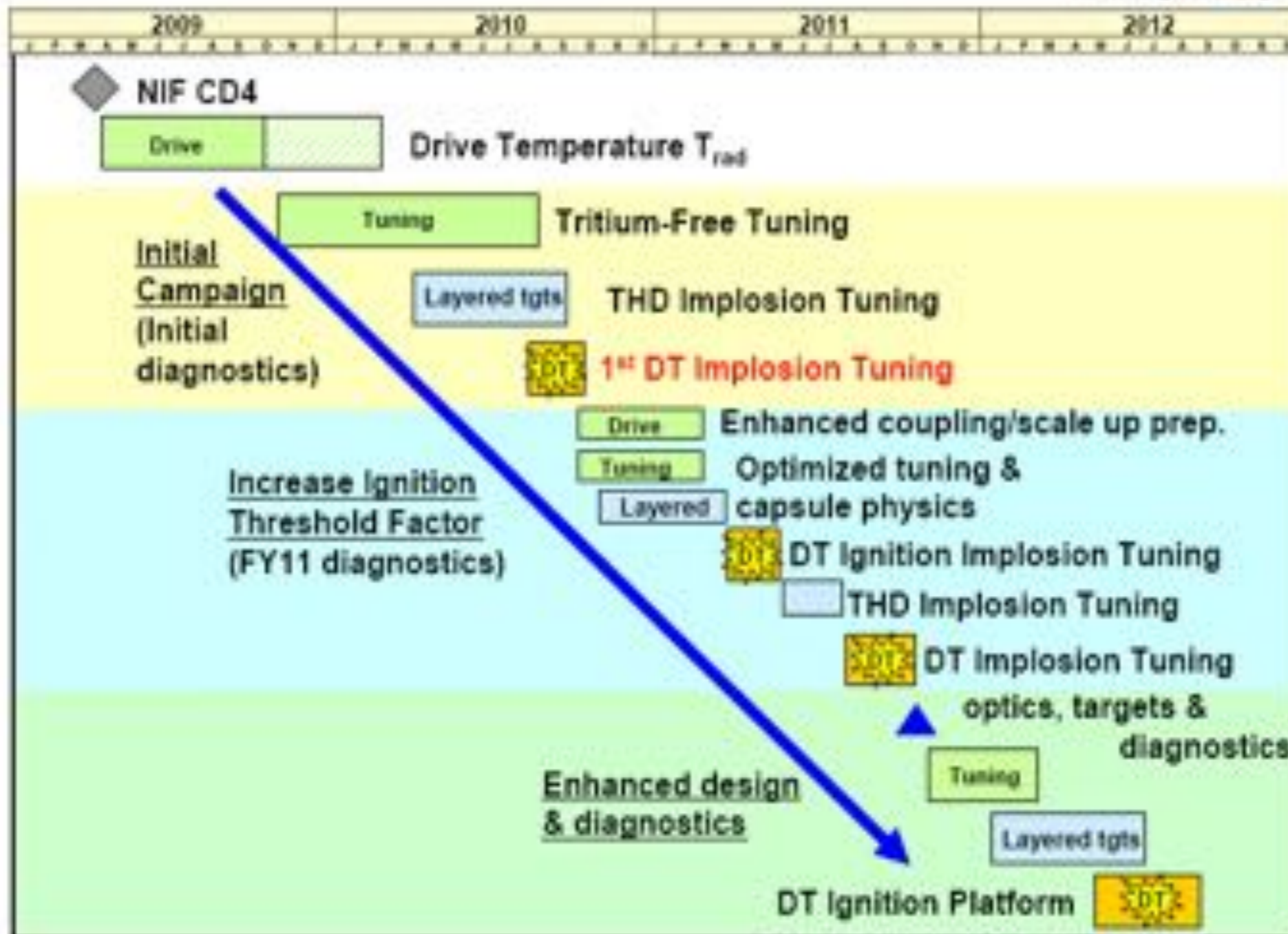
The NIC is structured to develop a robust burning plasma platform by the end of 2012

NIC

The National Ignition Campaign



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



NIF hat bislang keine Zündung erreicht was ging schief? wo stehen wir?....



NIF

Update on the pathway to ignition
at the National Ignition Facility (NIF)

Presentation to
LANSA, Yokohama
April 23, 2013

Dr Mike Dunne
Program Director, Laser Fusion Energy, LLNL

Lawrence Livermore National Laboratory • National Ignition Facility & Photon Science

NIF

Progress Toward Ignition
at the
National Ignition Facility

Presentation to
European Physical Society Meeting
Espoo, Finland
July 1, 2013

D. E. Hinkel

LLNL-PRES-640041

Lawrence Livermore National Laboratory • National Ignition Facility & Photon Science
This work performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory under Contract DE-AC52-07NA27344

The High-Foot Implosion Campaign

APS DPP Meeting

Q13.00004

Nov. 13, 2013

Omar A. Hurricane
Distinguished Member of the Technical Staff

Lawrence Livermore
National Laboratory

LLNL-PRES-645894
This work was performed under the auspices of the U.S. Department of Energy by Lawrence Livermore National Laboratory under contract DE-AC52-07NA27344. Lawrence Livermore National Security, LLC



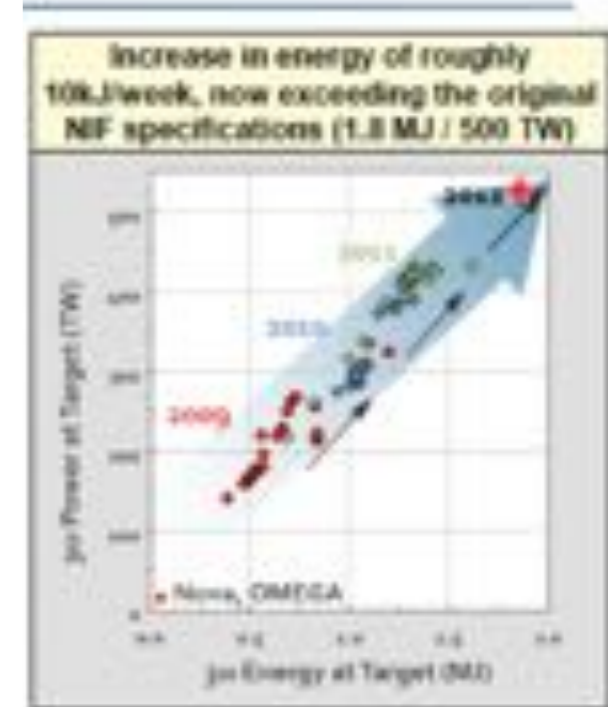
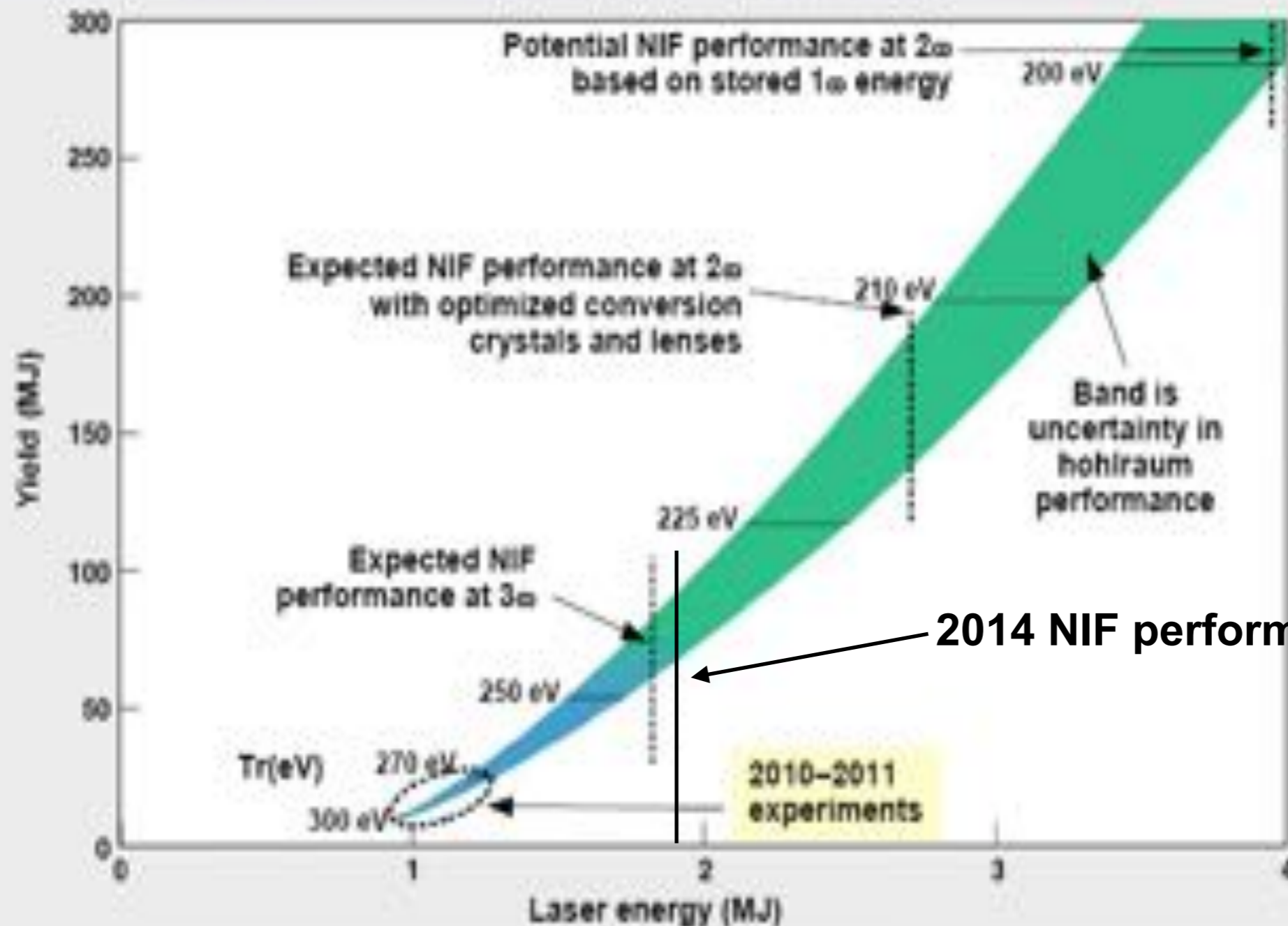
Quicklook for N140304-003-999
I_Abl_DT_HfootDU_S02
(March 4, 2014)

WCI
REACHING
THE FRONTIERS

H. -S. Park, D. Casey, T. Ma, T. Doegener,
O. Hurricane, D. Callahan, D. Hinkel, T. Dittrich
• High-Foot team

NIF hat seine Designparameter inzwischen weit übertroffen

Yields versus laser energy for NIF geometry hohlraums



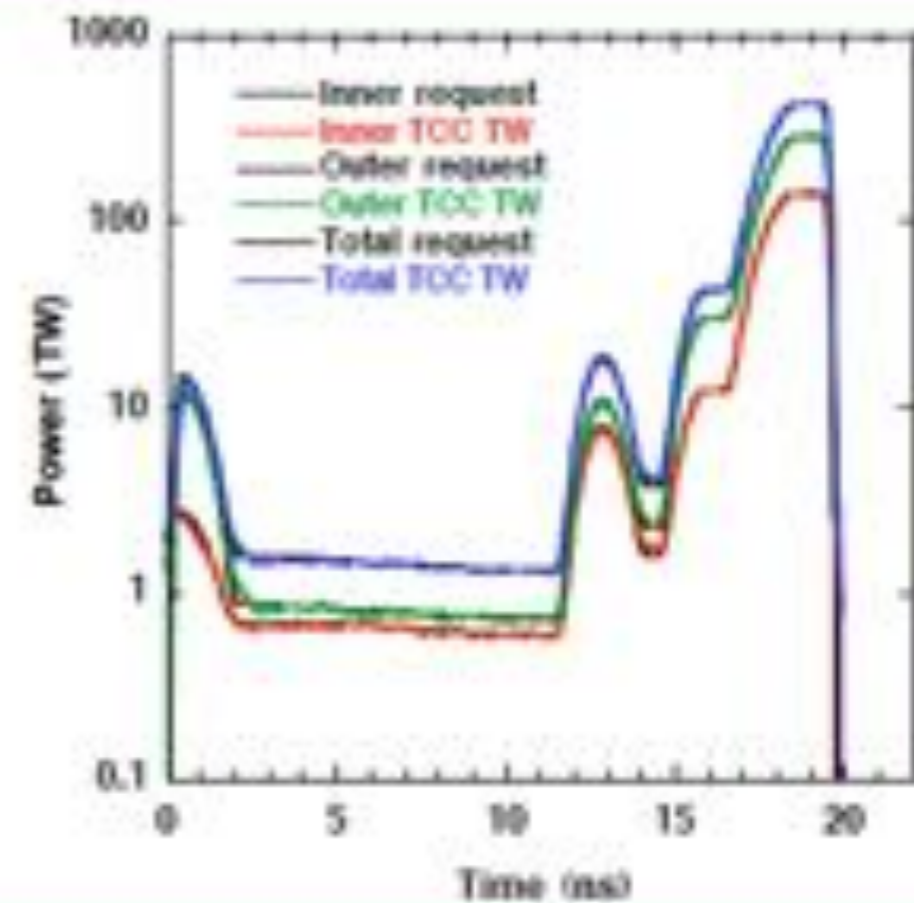
alle drei Monate
wird das bislang
stärkste Lasersystem
der Welt (NOVA) addiert

NIF Tests erfüllen (und oft übertreffen) die Design Spezifikationen, die für die Zündung erwartet werden

NIF surpassed its milestone of 1.8 MJ of 3ω energy, 500 TW on target



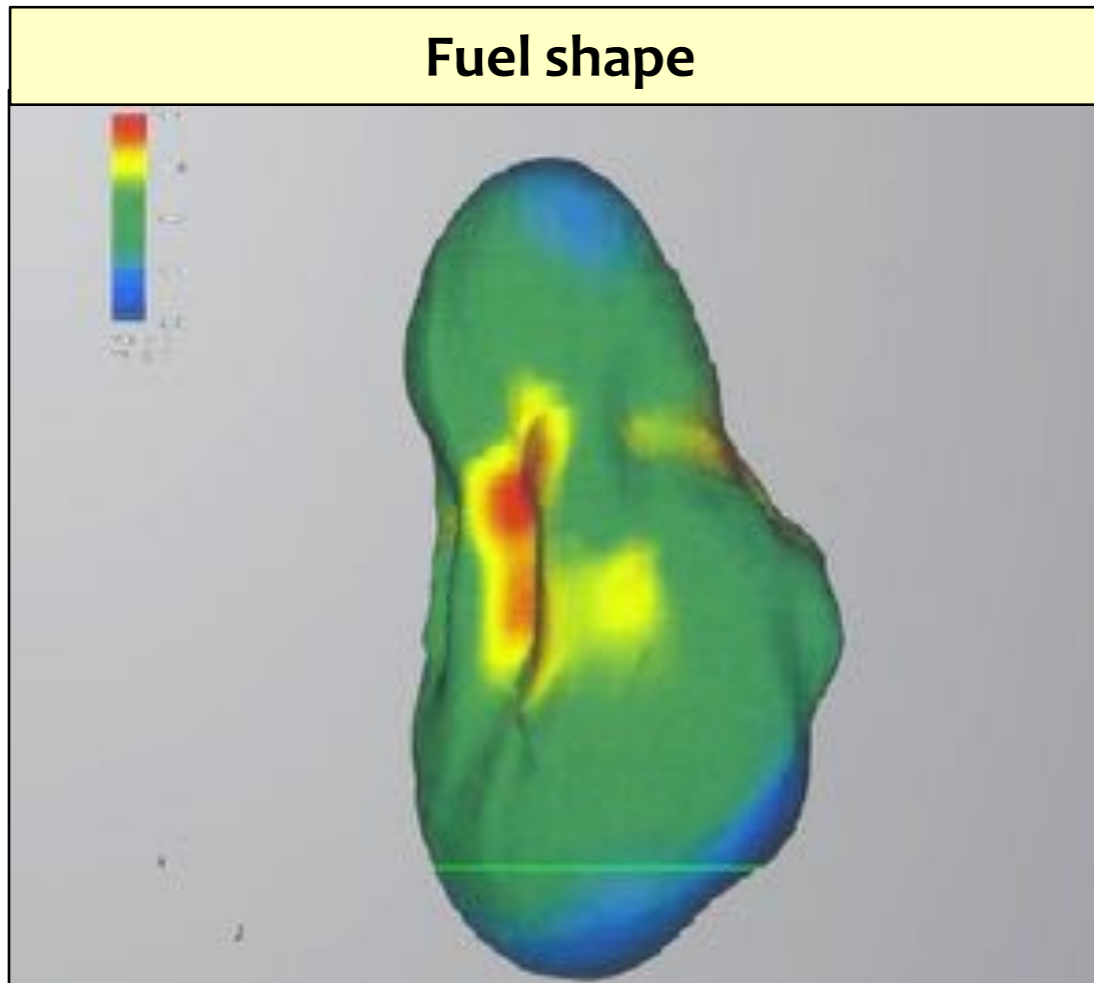
Precision at NIF enables tuning and reproducibility



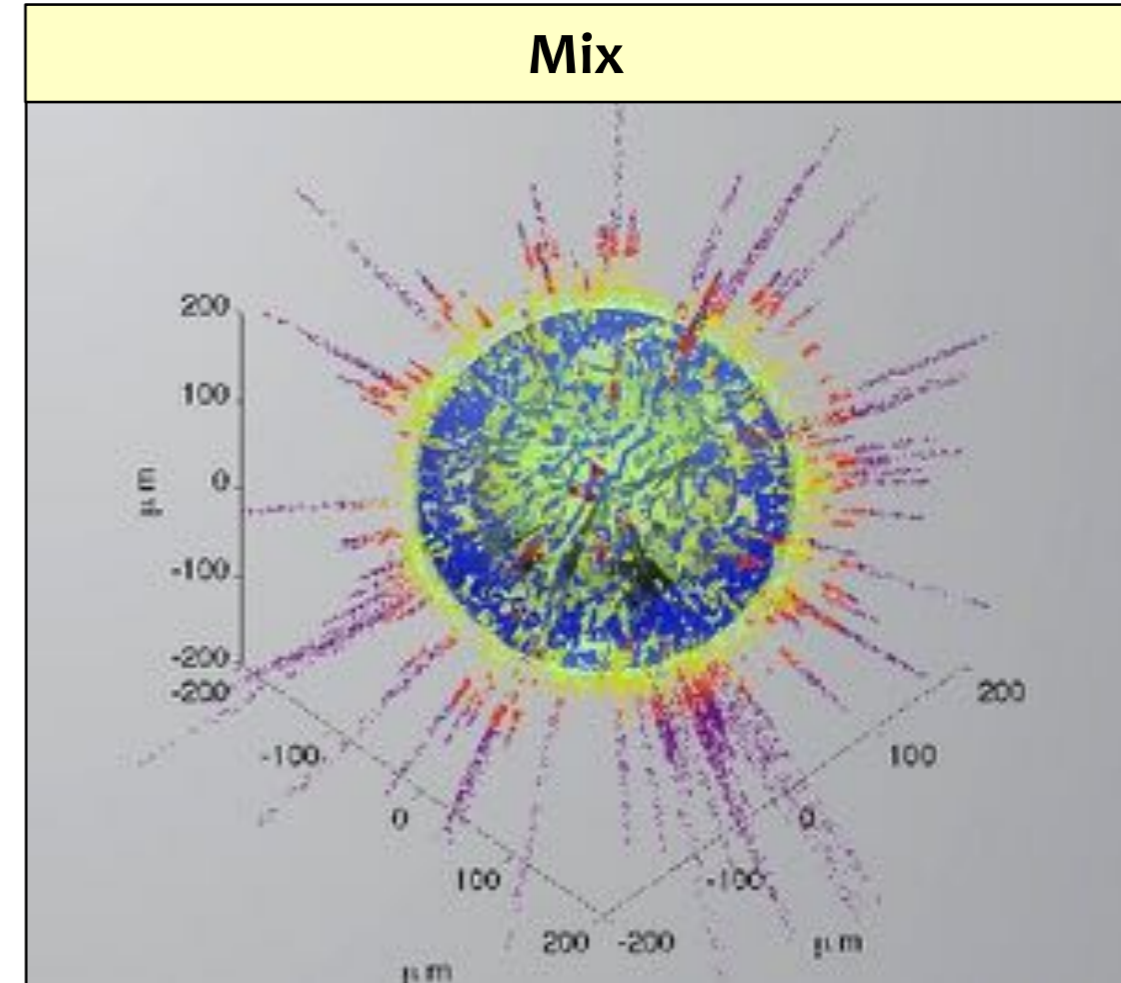
NIF ist das zuverlässigste Lasersystem das je gebaut wurde

Vermutete Hauptgründe für das Versagen bei der Zündung

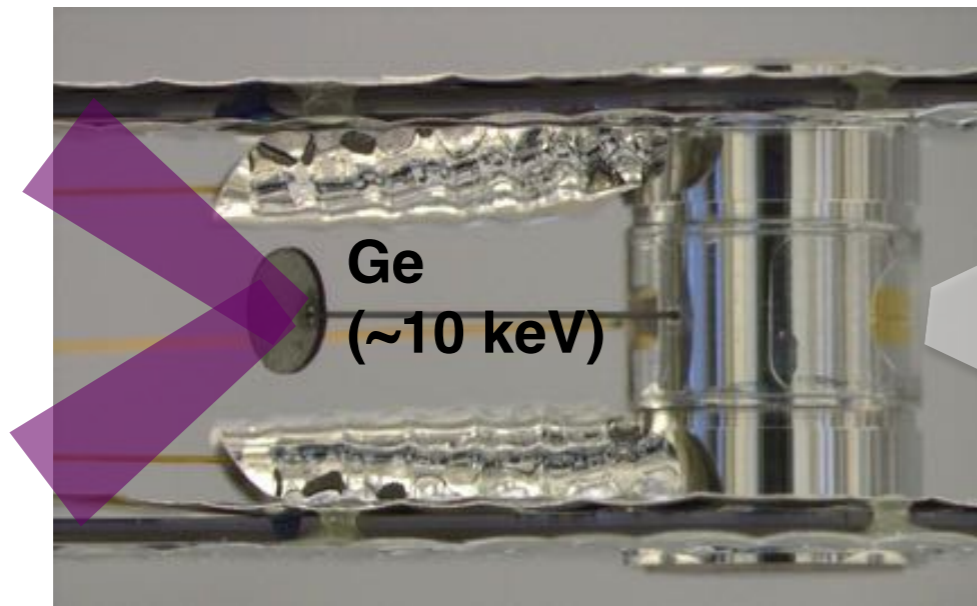
Fuel shape



Mix

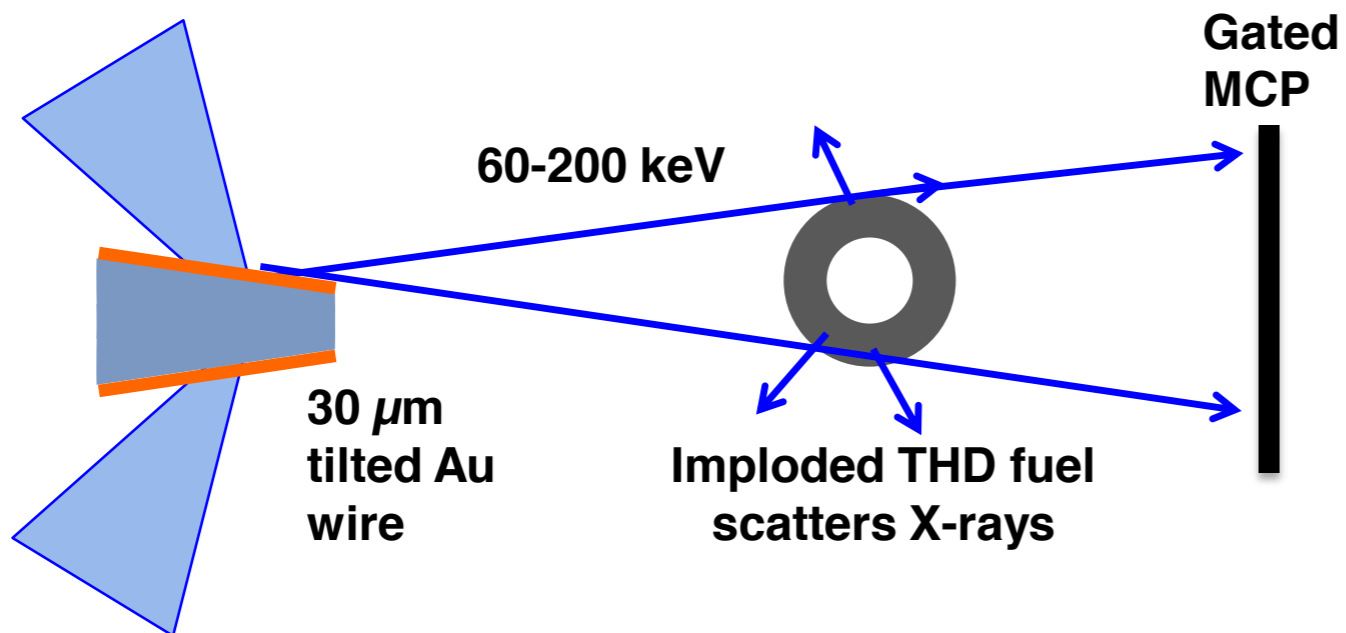
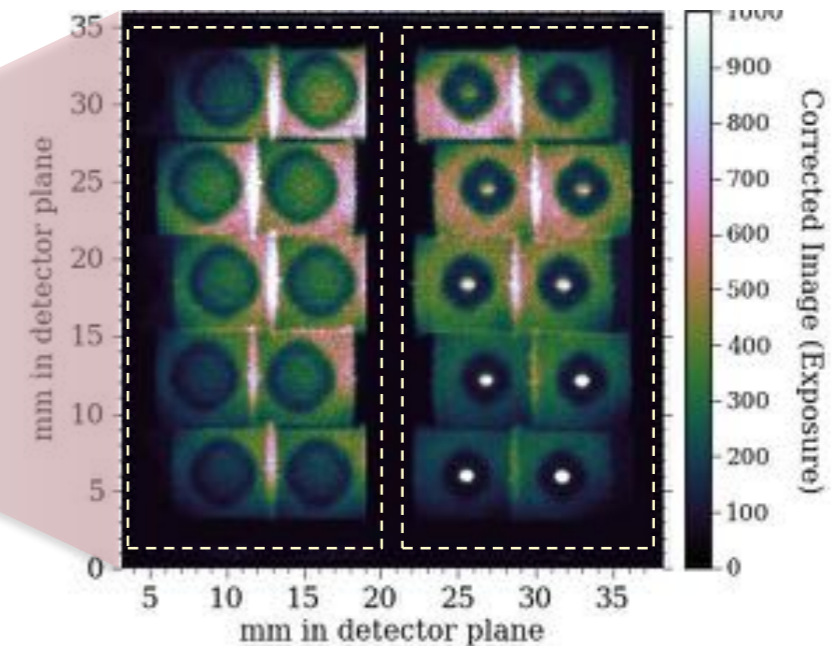


New radiography capabilities used to measure low mode fuel asymmetry (Oct 2012 - Mar 2013)

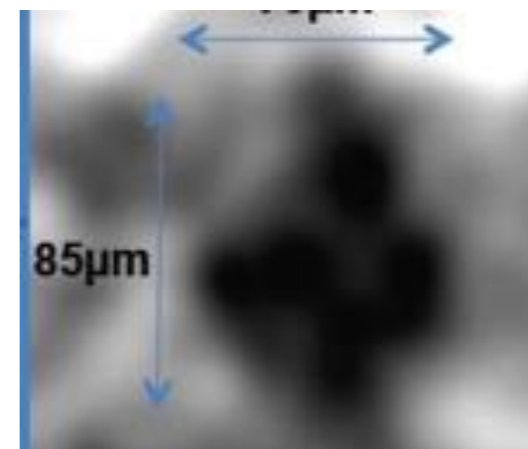


Pinhole array

Gated images N121004

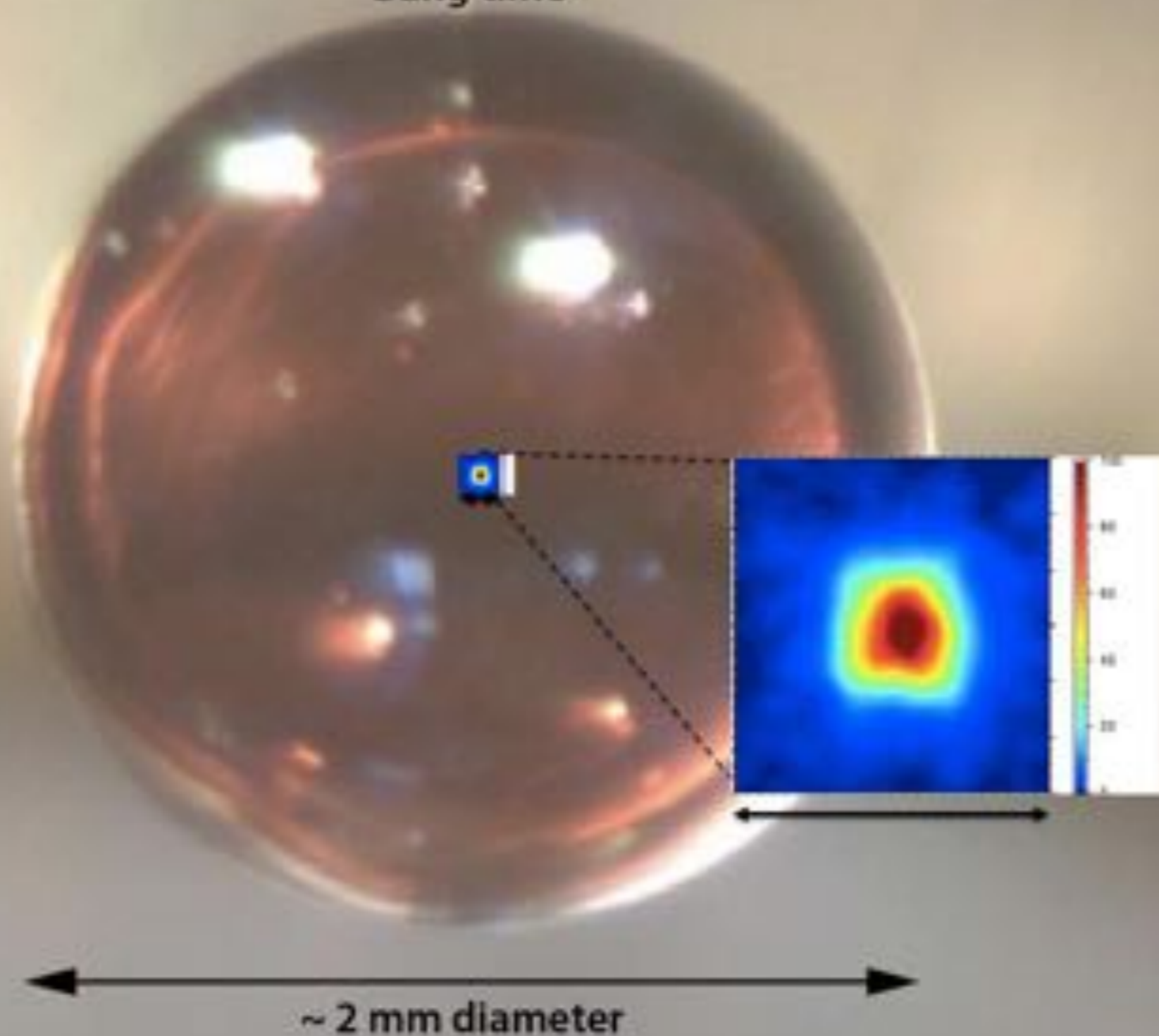


THD shot N121005



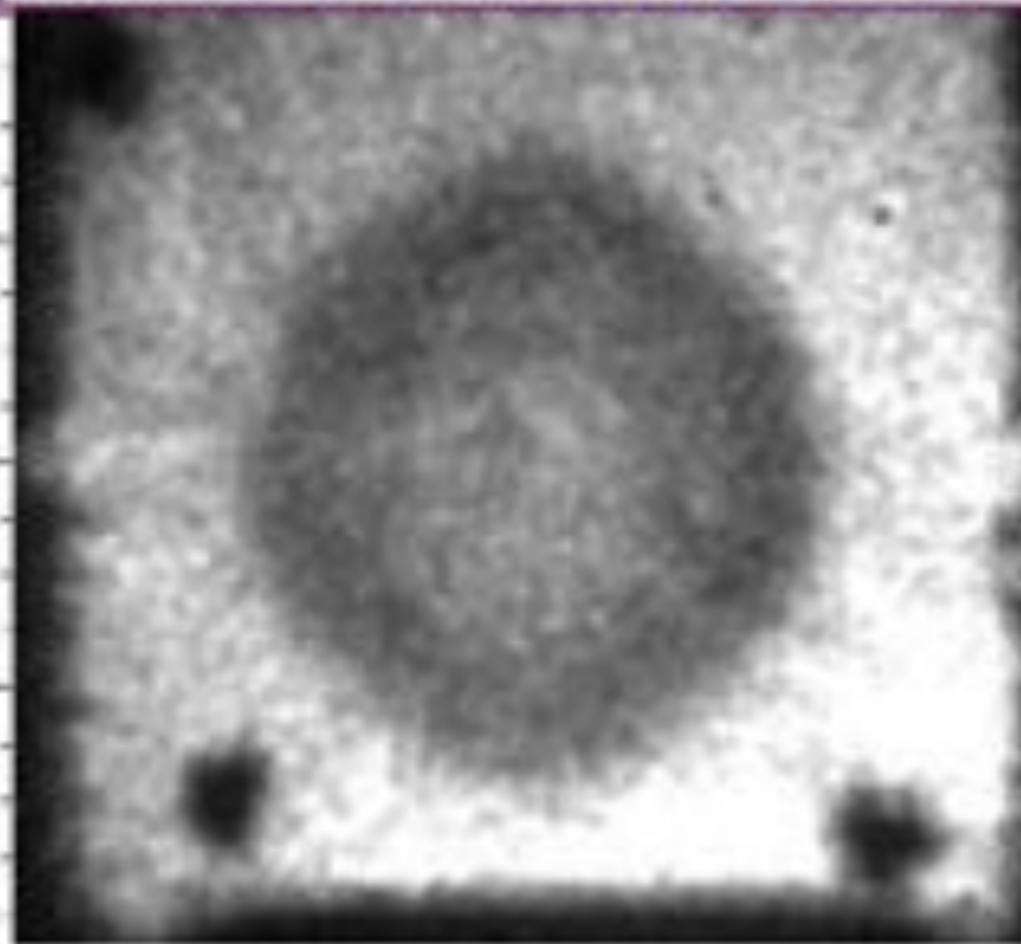
The hot spot looks quite round!

DT shot N120716
Bang time

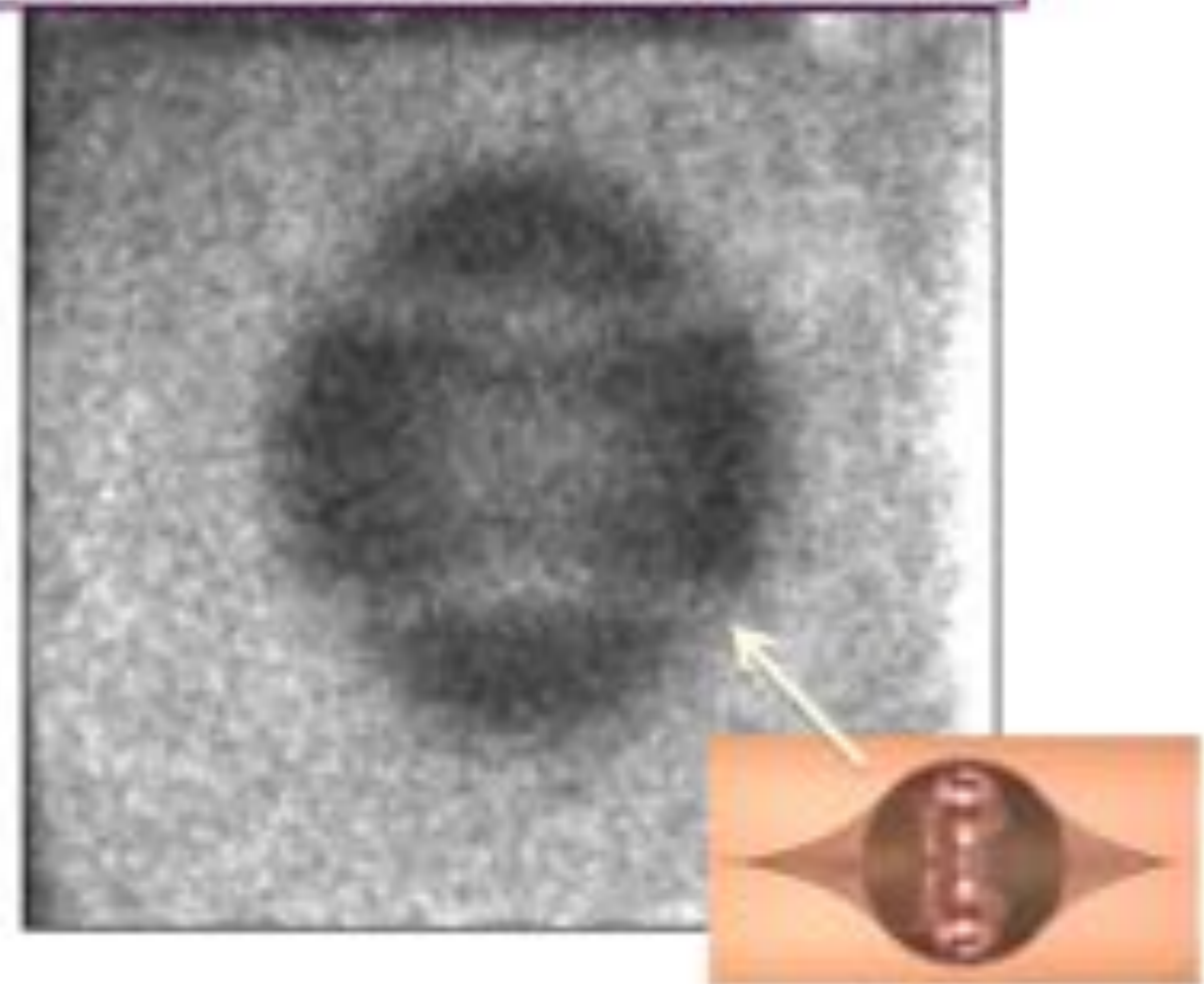


The capsule tent perturbs the implosion

Stalk-Mounted ($\sim 30 \mu\text{m}$) Capsule



Tent-Mounted ($\sim 100 \text{ nm}$) Capsule

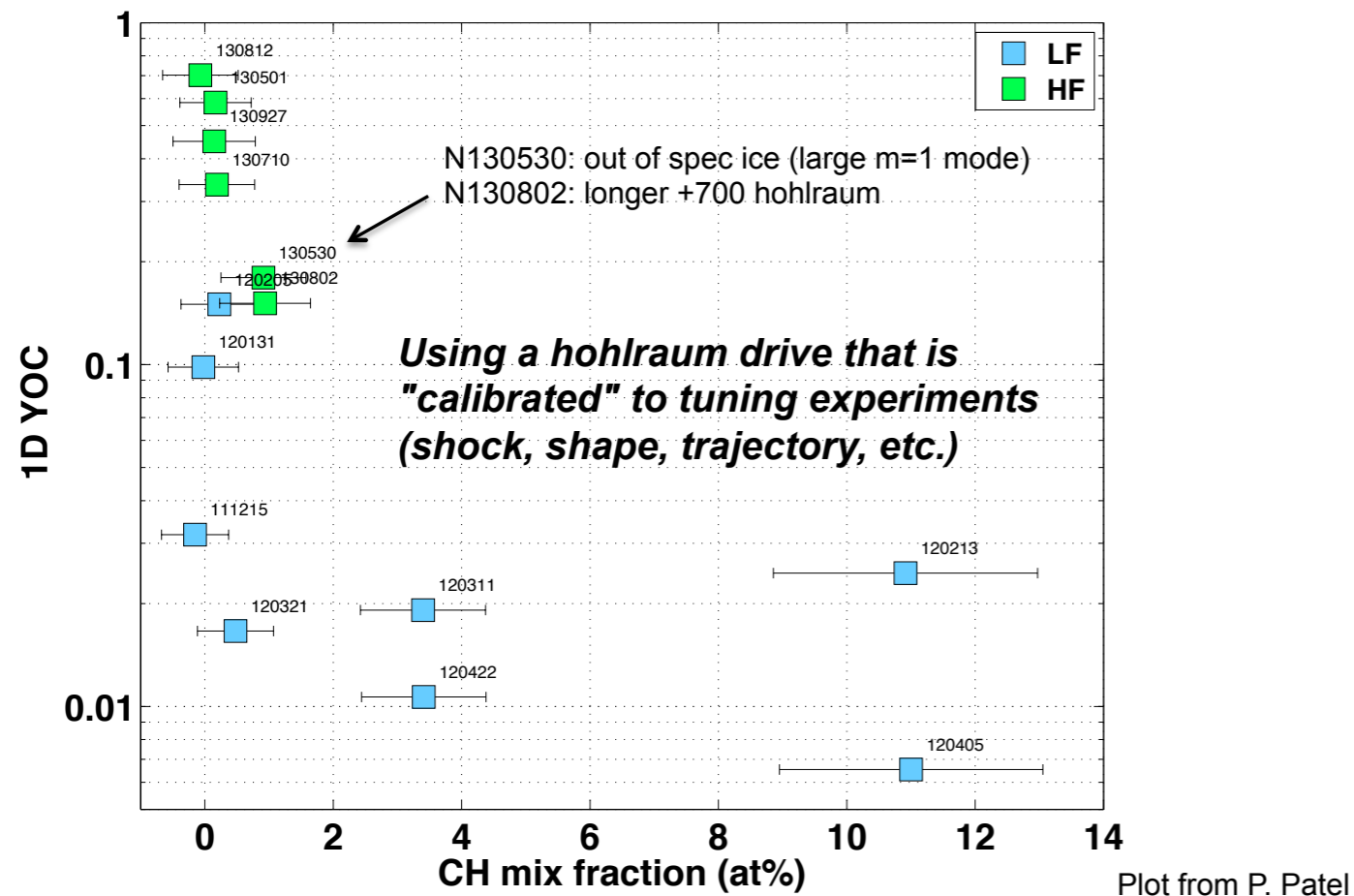


Ablation front
instability

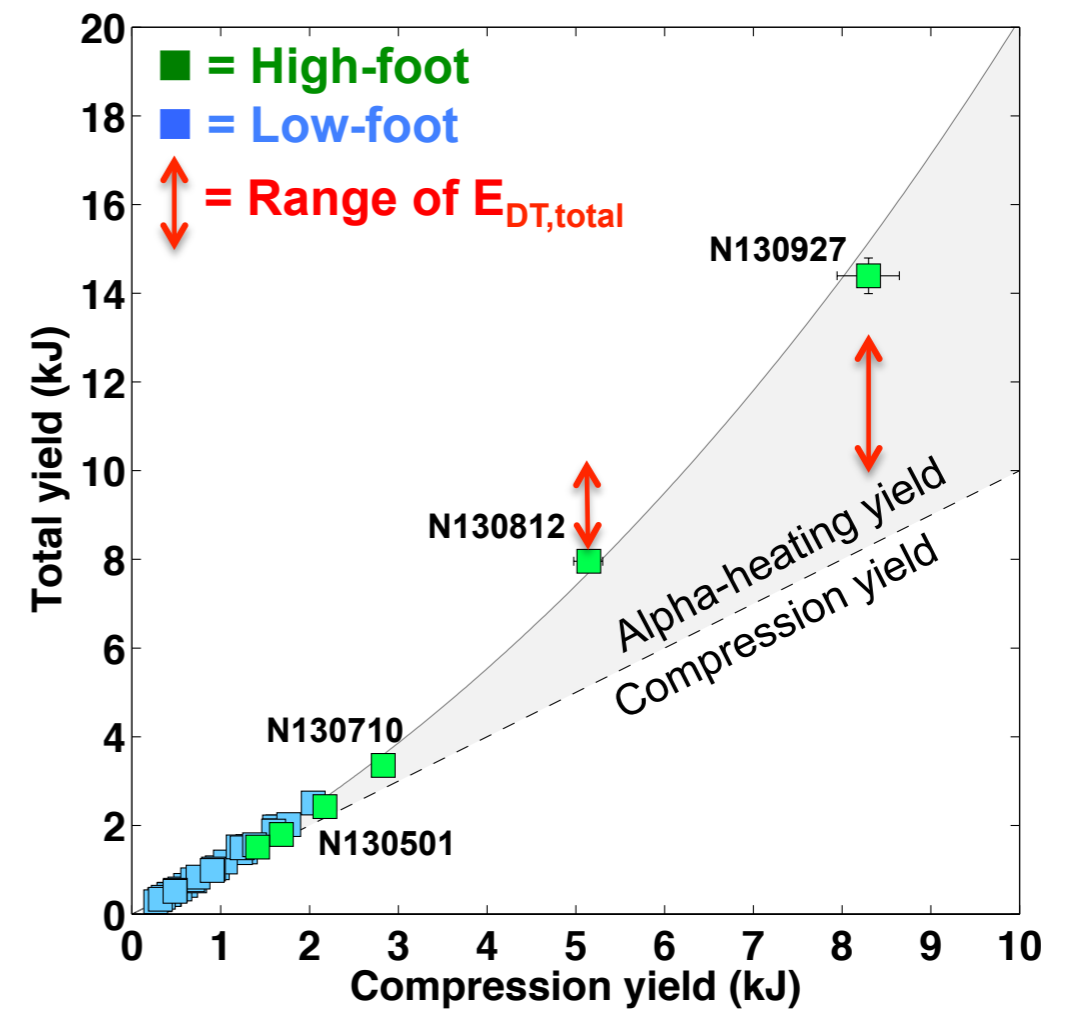


Mix radiates and
cools hot spot

Erstmals gute Übereinstimmung mit den Rechnungen (YOC)



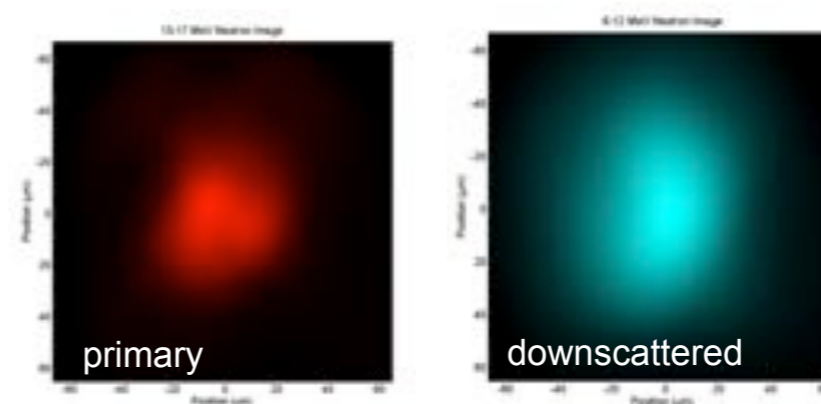
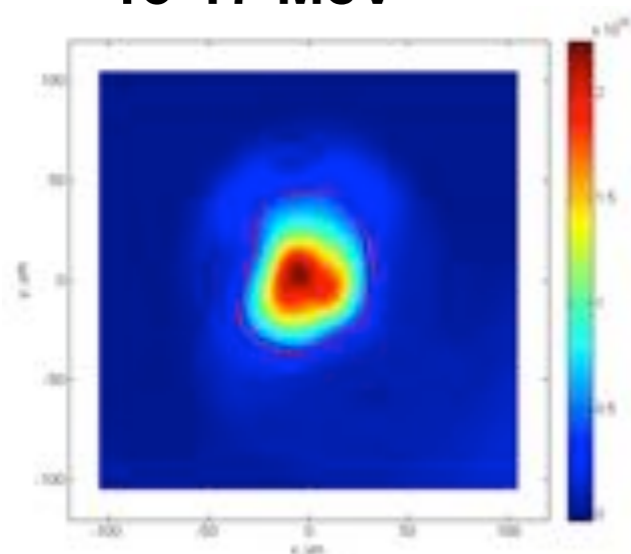
Beginn der alpha-Teilchen Heizung wird sichtbar



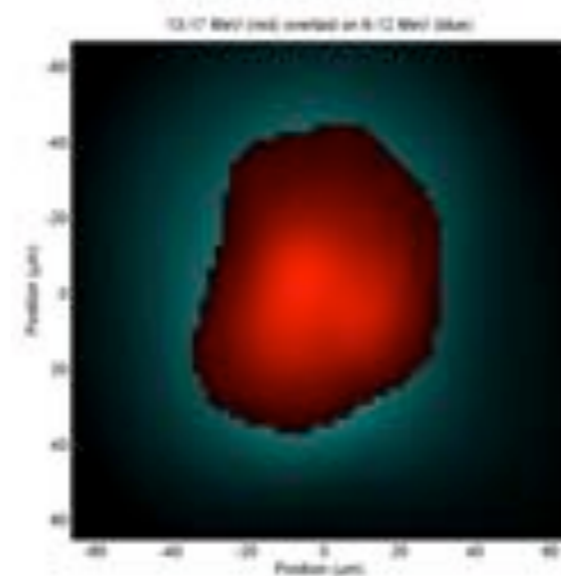
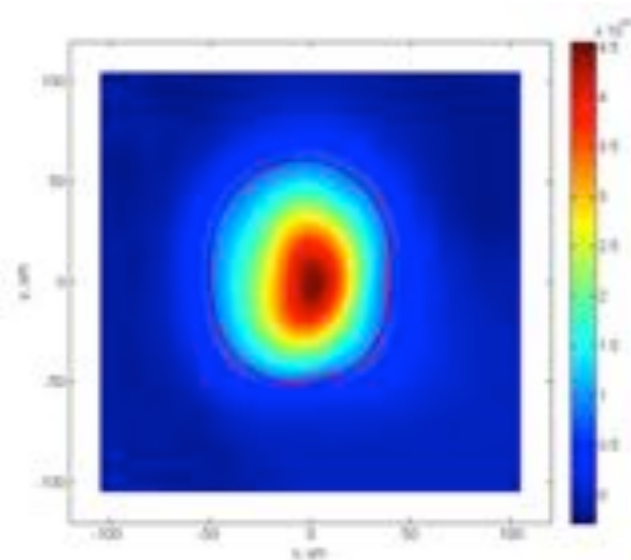
$$E_{\text{ablator absorbed}} = 150 \text{ kJ}$$

NIS zeigt Hotspot Form und Lage

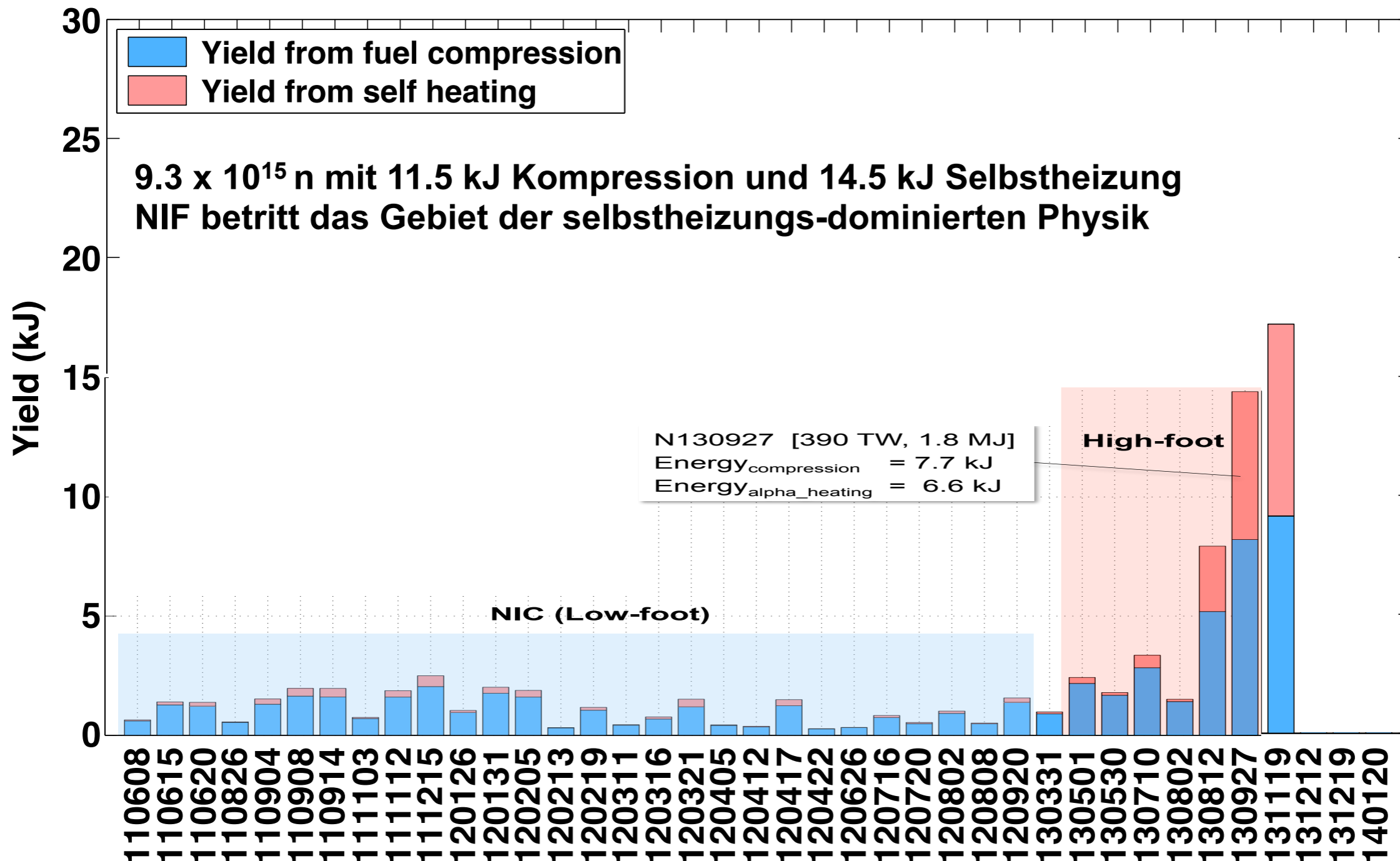
13-17 MeV



6-12 MeV

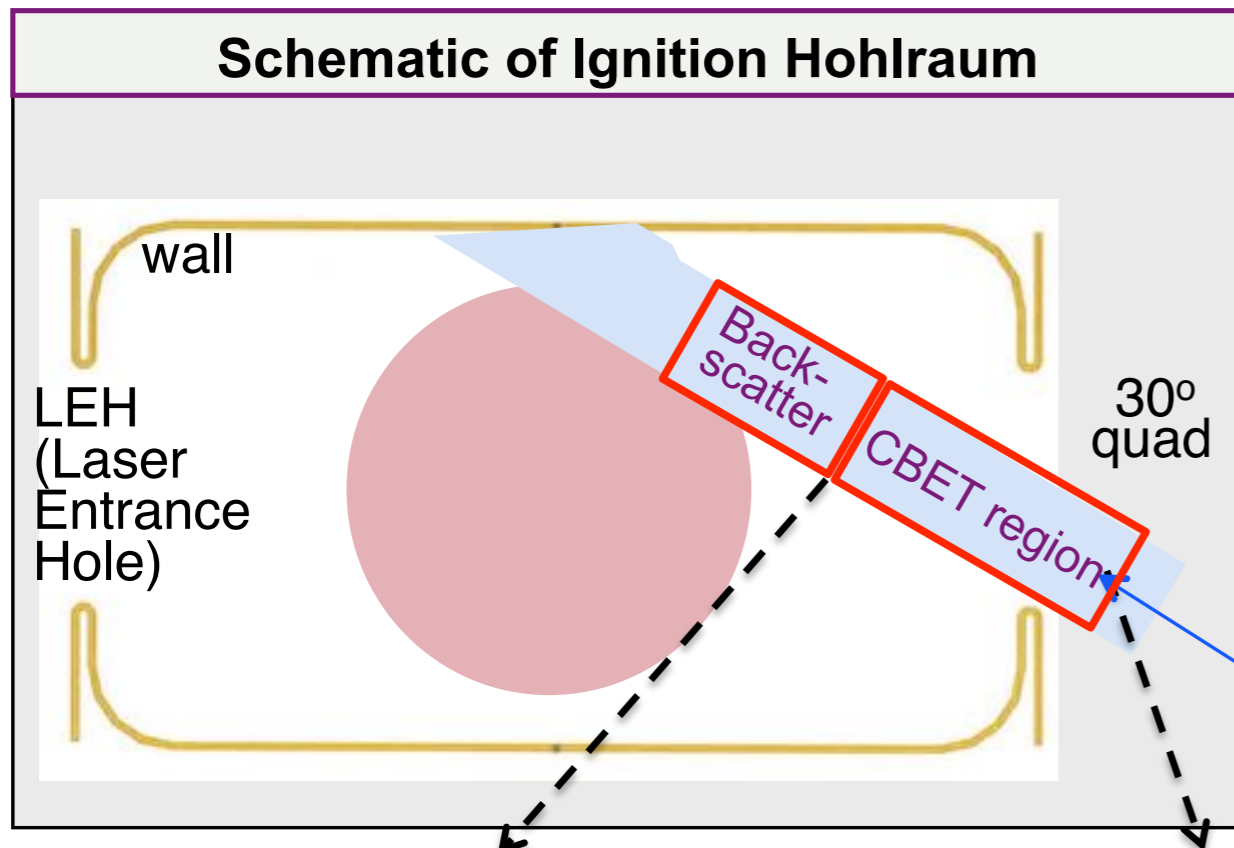


Resultat seit der NATURE Veröffentlichung

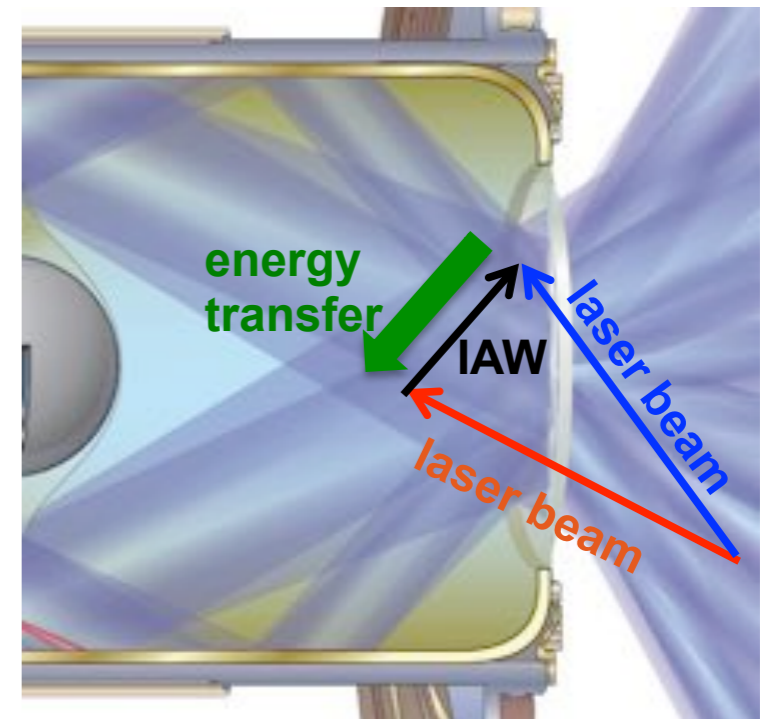


Cross-beam energy transfer results in a spatially non-uniform, time-dependent intensity distribution

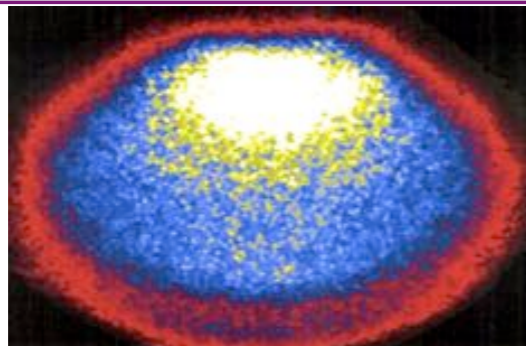
- $CBET \sim I \times n_e / T_e$
 - occurs at peak power (where laser intensity I is maximum)
 - occurs when laser beams burn through gas to wall (when T_e is low)



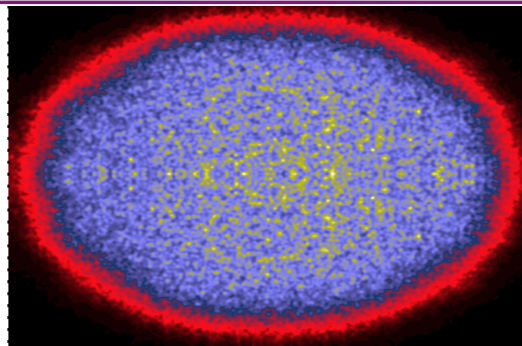
- Cross Beam Energy Transfer (CBET): laser forward scatters off ion acoustic waves (P. A. Michel *et al.*, PoP, May 2010)



Beam after xbt, refraction, absorption

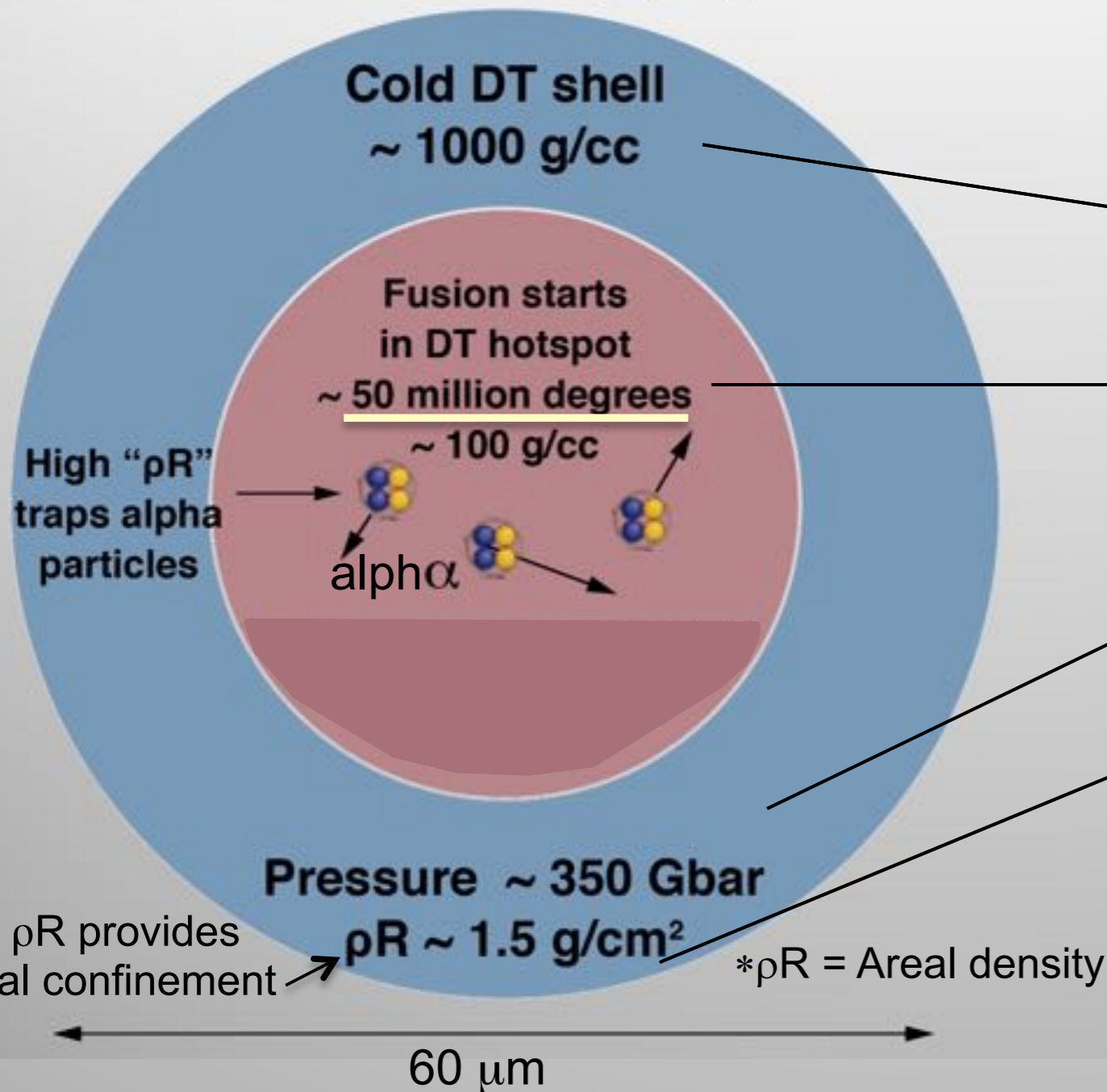


Beam before xbt, refraction, absorption



We're ~ 2x away from required ignition conditions

Deuterium-Tritium (DT) fuel



Best simultaneous
performance
on single shot

~ 27kJ

~ 500 g/cc

~ 40 g/cc

~ 180 Gbar

~ 0.75 g/cm²

50 million degrees achieved

$$E_{\text{ignition}} \sim \rho R^3 T \sim \frac{(\rho R)^3 T^3}{P_{\text{stag}}^2}$$

At the end of NIC in 2012, we were > 10x lower in Yield, and $P_{\text{stag}} \sim 130$ Gbar

Weitergehende Ansätze

- Verbessertes Hohlraum Design (Rugby Hohlraum)
- Optimierter Energietransfer äussere zu innere Strahlen -> Form der Implosion
- Optimierte Adiabate (zwischen 2.6 und 1.5)
- Diamant- Ablator, dünnerer Ablator
- Optimierte, isobarische Zündung (e.g. mit 2ω)
- Double shell (non-cryo solution?)
- Elektronen Fast Ignition (mit oder ohne Cone)
- Protonen Fast Ignition (2016?)

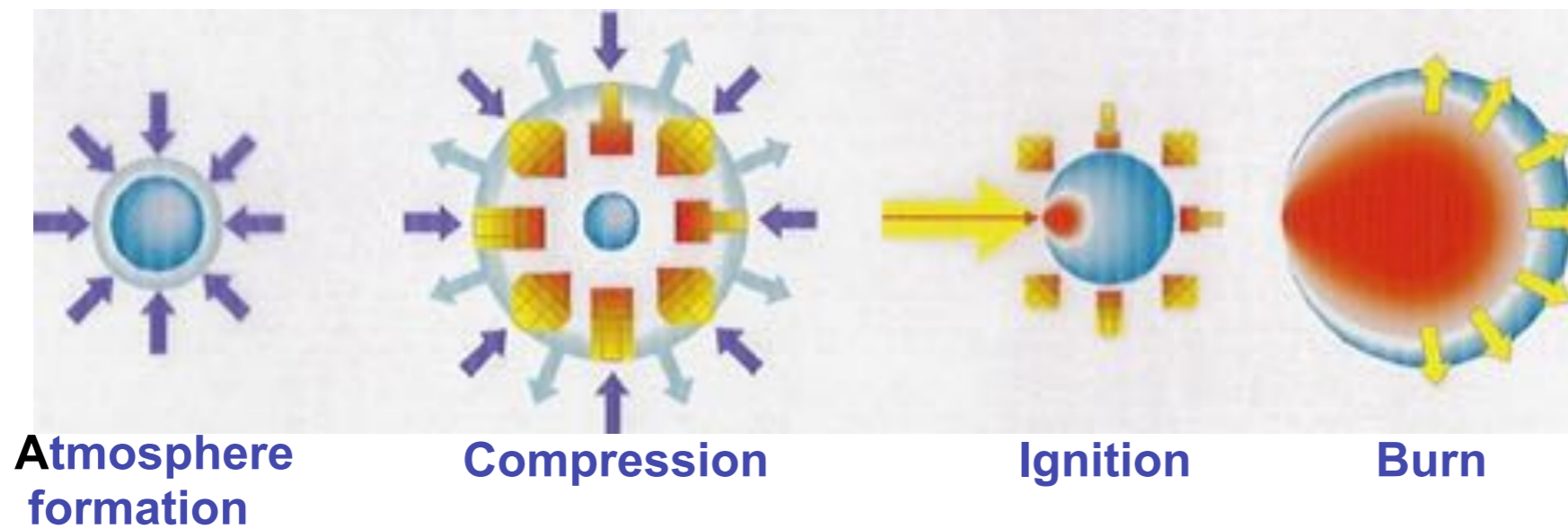
WARUM?

- kleinere Infrastruktur; höherer Gain;
- Verbesserte Toleranz gegen Laser/Target Nichtidealitäten
- Breitere Basis für Grundlagenforschung
- Möglichkeit Tritium zu vermeiden (oder zu reduzieren)

Für jeden Fall zu untersuchen:

- Pros/cons
- Facility (laser, targetry, delivery, reactor, waste)
- Level of confidence
- Compatibility between options (since confidence < 1)
- Required R&D plan

Fast Ignition

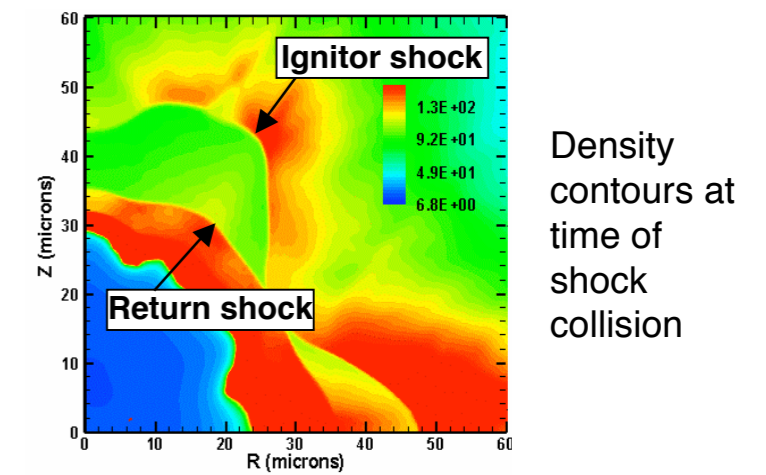
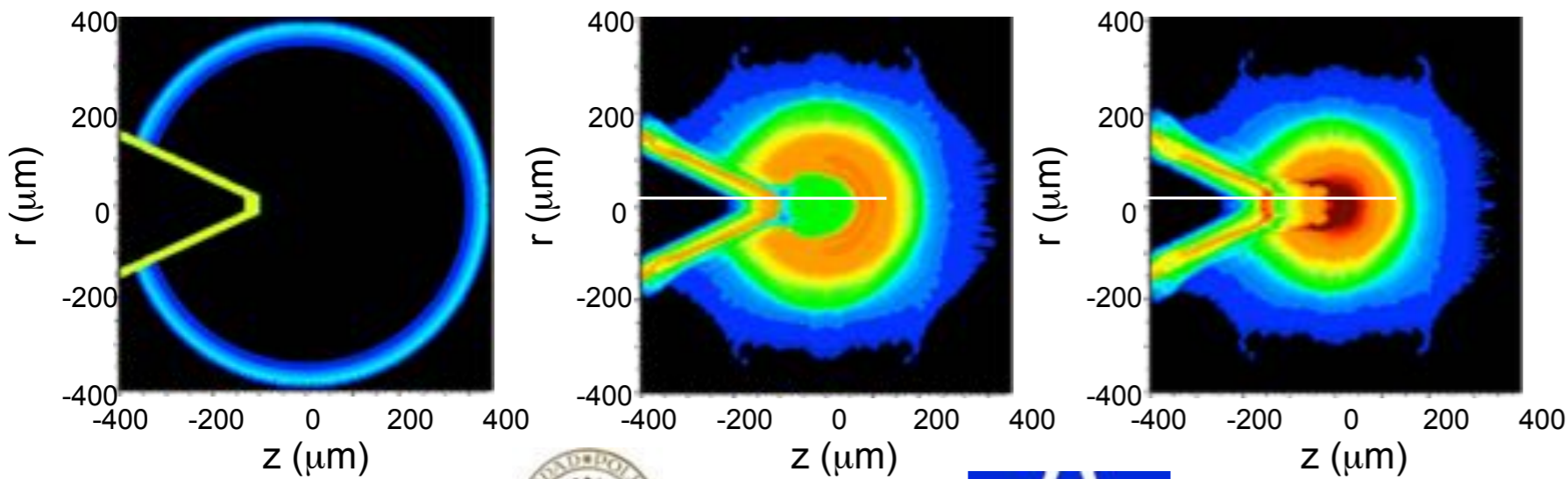
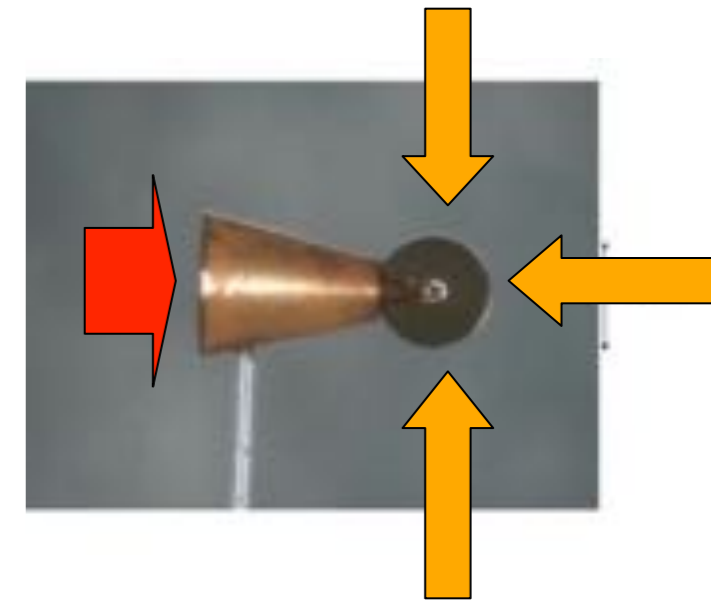
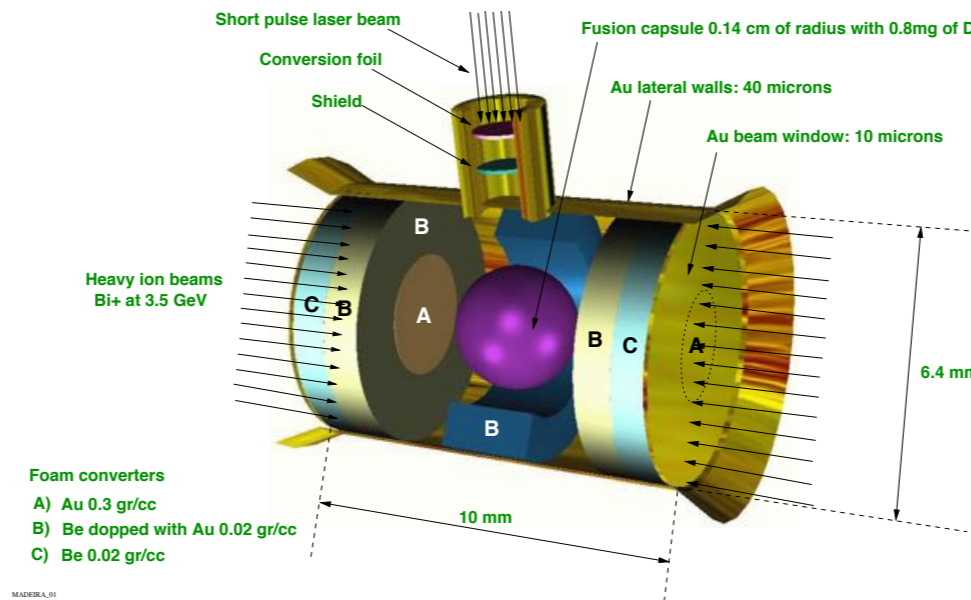
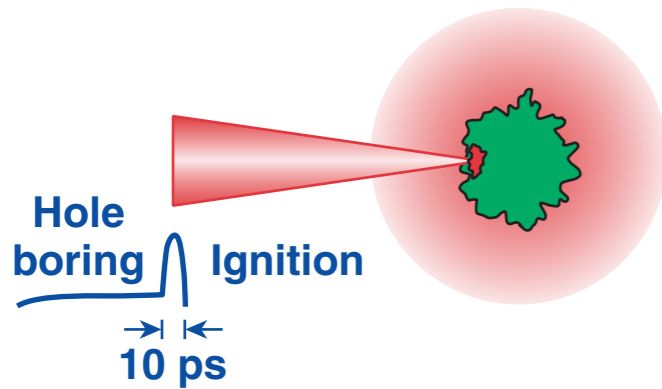


Fast Ignition separates the functions of compression & ignition of the fuel; less compression is required (more fuel can be assembled) and symmetry relaxed.

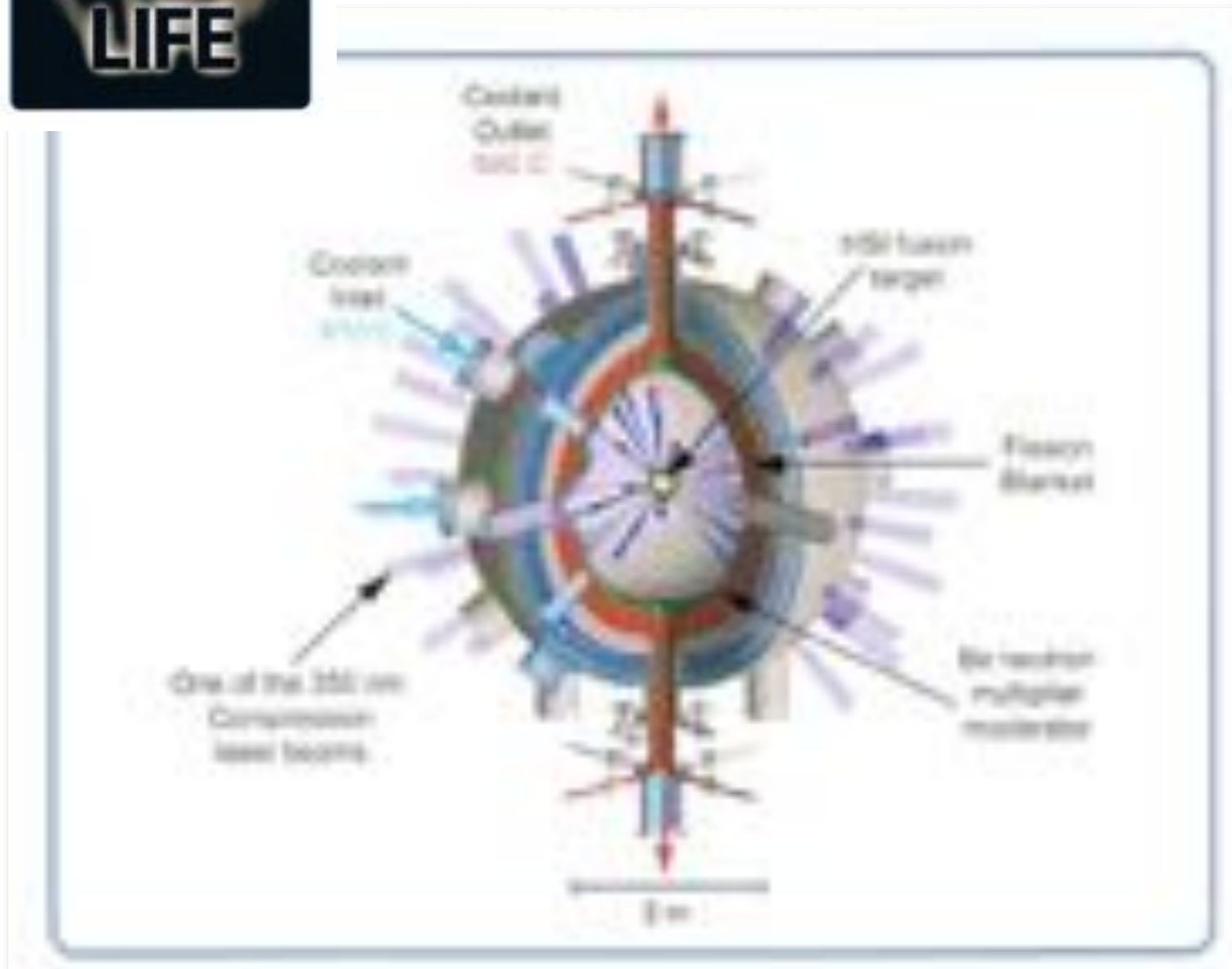
Think – Hot-Spot ignition = Diesel Engine, Fast-Ignition = Gas Engine (spark-plug)

Als Fast Ignitor wird untersucht: Elektronen, Protonen und Ionen, mit Konus und Schock-Ignition

Channeling concept



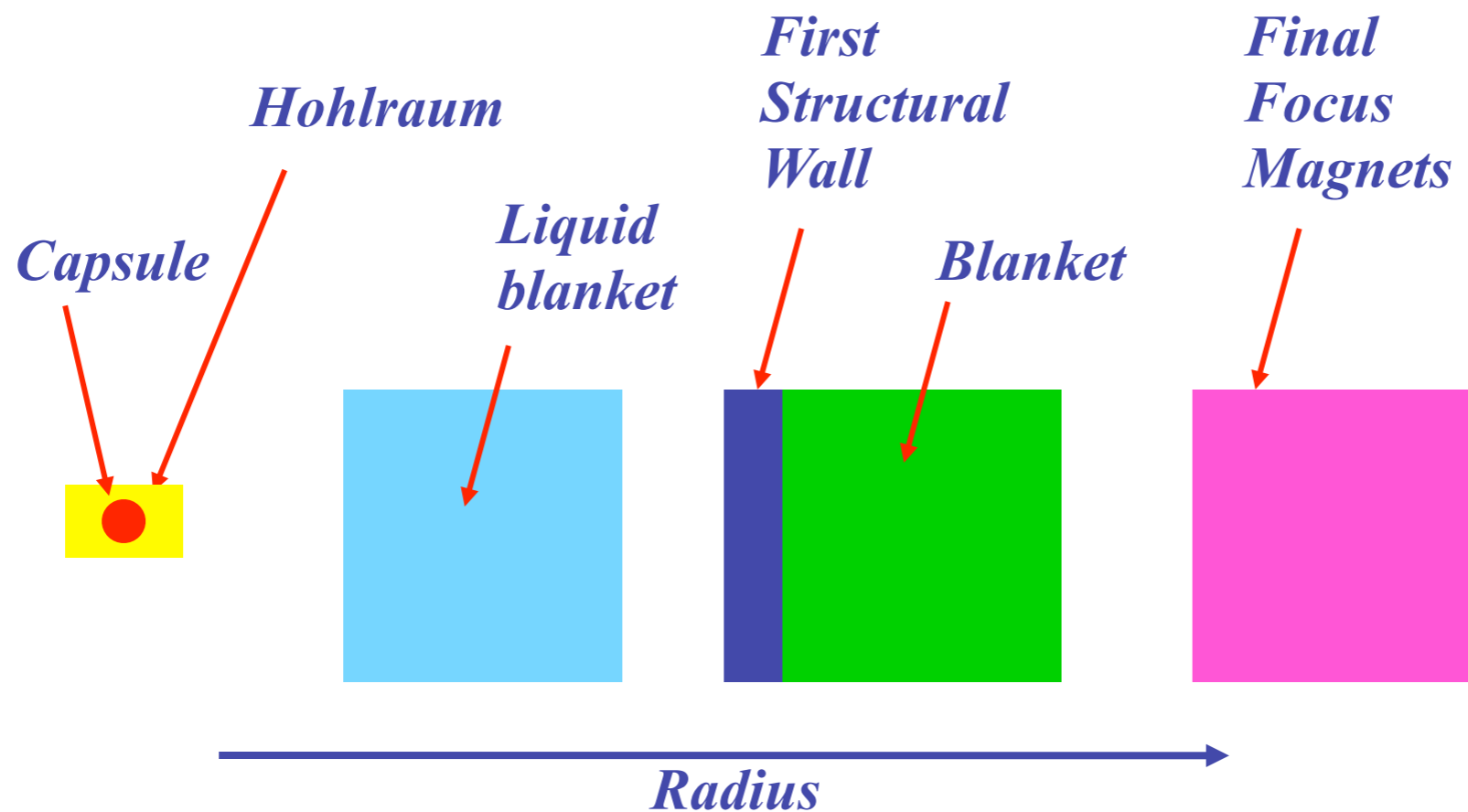
LIFE der nächste Schritt?



Fusion Fission Hybrid
burns nuclear Waste
low fusion gain needed (500 MW)
boosted to 3000 GW (thermal)

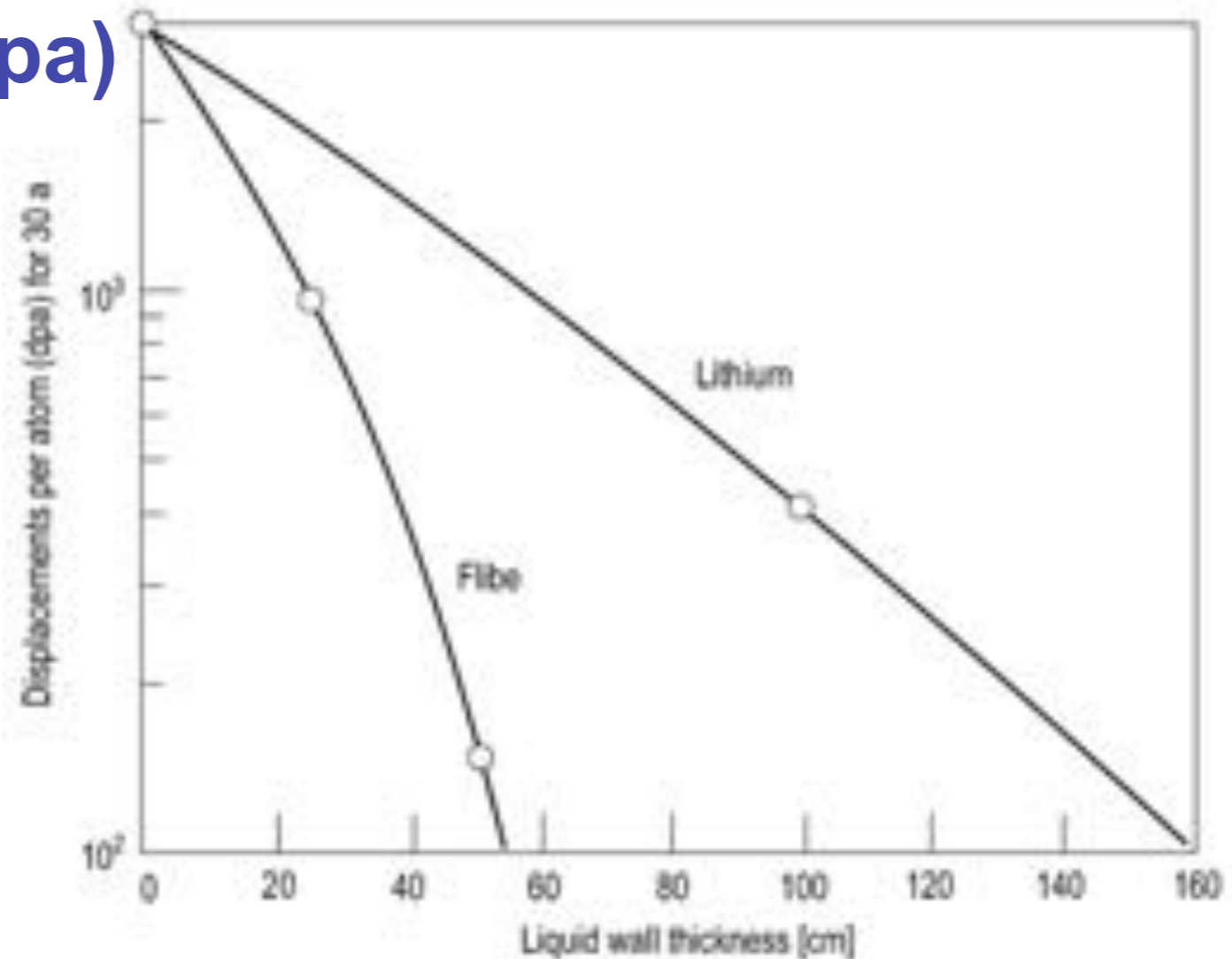
Folgeabschätzungen: Aktivierung und Sicherheit

Neutron transport affects a variety
of components and raises a set of issues



Folgeabschätzungen: Reaktorlebenszeit

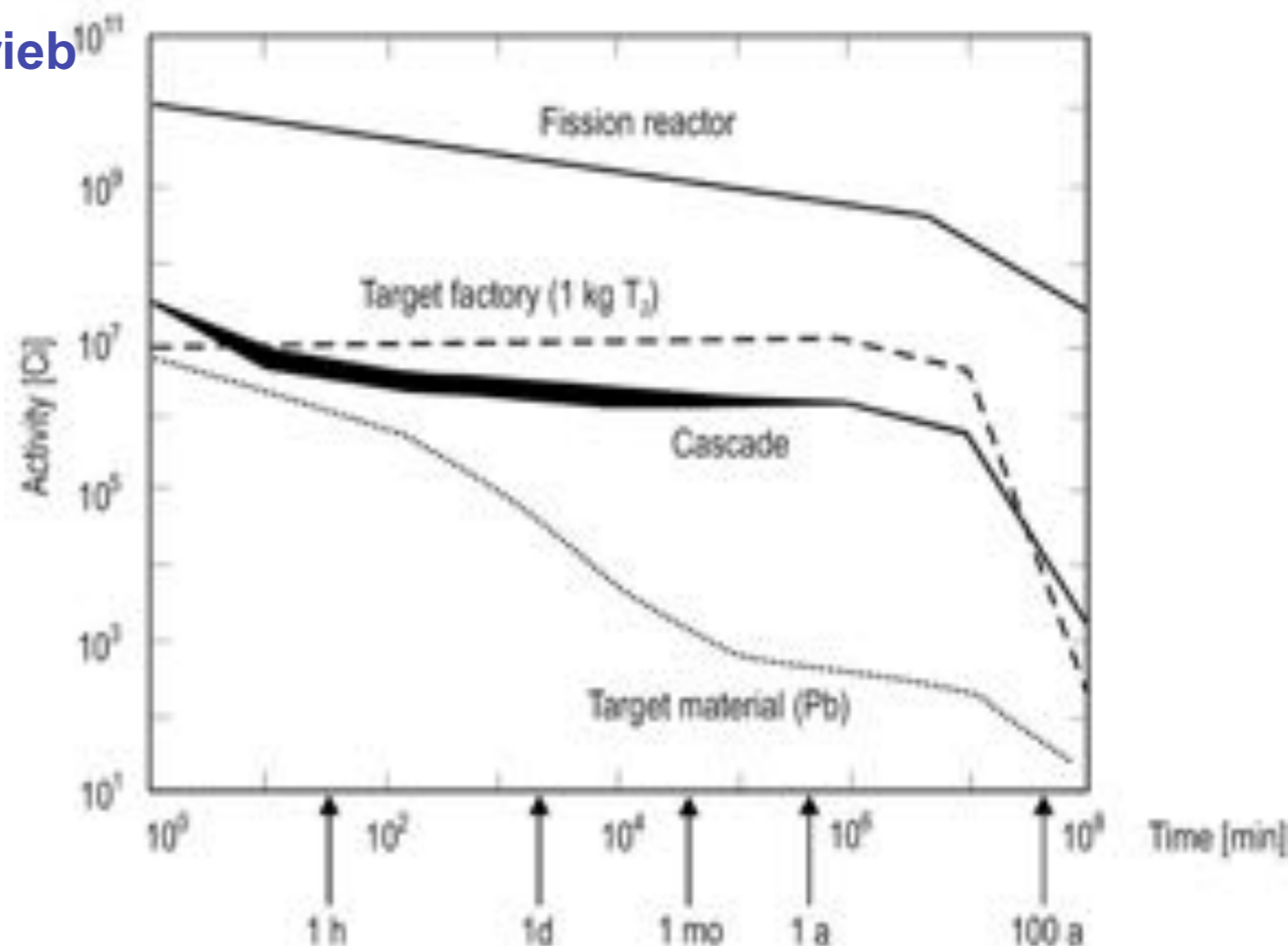
Displacement/atom (dpa)



Displacement per atom (dpa) für 30 Jahre Betrieb als Funktion der Dicke der flüssigen Wand. Ein Wert von 100 dpa ist das ungefähre Limit für Edelstahl. Bei der Magnetfusion wird dieser nach zwei Jahren erreicht. Abschätzungen basieren auf 3m Radius, 2700 MW Fusionsenergie und 80% Verfügbarkeit.

Spätfolgen

Radioaktivität (t) nach 30 Jahren Betrieb



Radioaktivität eines 1 GW (el) Fusionsreaktors (CASCADE) als Funktion der Zeit nach 30 Jahren Betrieb. Im Vergleich zu einem MCF Fusionsreaktor ist sie zu jeder Zeit mindestens 3 Größenordnungen kleiner.

- Es gibt eine Vielzahl von neutroneninduzierten Problemen die beachtet werden müssen:
 - Neutronenwechselwirkung im Target
 - Neutronenaktivierung & Transmutationsreaktionen
 - Isochores Heizen der Wand
 - Strahlungsschäden
- Diese Herausforderungen beeinflussen den Bau und die Akzeptanz eines Kraftwerkes:
 - Chamber clearing
 - Radiologische Sicherheit
 - Verlässlichkeit der Komponenten & Performance
 - Abfallmanagement
 - Wirtschaftlichkeit

Hier ist noch viel zu tun, besonders die Materialfrage ist hier entscheidend!

ICF bietet mehr Möglichkeiten durch die Trennung von Treiber und Reaktor, aber die Eigenschaften funktionaler Materialien unter diesen Bedingungen sind weitgehend unerforscht!!!