

■ Trägheitsfusion – Durchbruch oder Werbegag?

Bei Experimenten an der National Ignition Facility haben Fusionsreaktionen mehr Energie freigesetzt, als zuvor im Brennstoff deponiert wurde.

Seit langem träumen Physiker davon, Energie aus der kontrollierten Fusion von Wasserstoff zu erzeugen. Die nahezu unbeschränkten Ressourcen, die große Energiedichte und die im Vergleich zur Spaltung fehlenden Gefahren und Endlagerprobleme sind eine starke Motivation für die Forschung. Grundsätzlich müssen bei der Fusion genügend Reaktionen stattfinden, um mindestens die zur Zündung notwendige Energie zurück zu gewinnen (Break-Even). Während sich die Forschungsarbeiten bislang darauf konzentriert haben, ein dünnes, brennendes Plasma mit Magnetfeldern über einen längeren Zeitraum einzuschließen, ist die Trägheitsfusion (Inertial Confinement Fusion) ein gepulstes Verfahren, bei dem der Brennstoff für jeden Zyklus eingebracht, komprimiert und gezündet wird [1].

Im Jahr 2009 wurde am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien die National Ignition Facility (NIF) fertiggestellt. Neben Forschung zur Trägheitsfusion dient NIF auch der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der hohen Energiedichten in Materie sowie der Sicherung des nuklearen Arsenal (Stockpile Stewardship). Der Laser von der Größe zweier Fußballfelder vereint 192 Laserstrahlen mit jeweils einem Querschnitt von $40 \times 40 \text{ cm}^2$ und einer Leistung von 500 TW (Abb. 1). Jeder Laserpuls lässt sich zeitlich präzise manipulieren und folgt exakt einer vorgegebenen Form. Ursprünglich für eine Energie von 1,6 MJ geplant, erreicht NIF inzwischen regulär Energien bis 1,9 MJ.

Bei den Experimenten zur Trägheitsfusion befindet sich ein gefrorenes Gemisch aus Deuterium und Tritium im Inneren einer zwei Millimeter großen Kapsel. Dieser Brennstoff lässt sich homogen von allen Seiten komprimieren und erhitzen, entweder direkt durch die Laserstrahlen oder indirekt mit weichen Röntgenstrahlen. Dazu

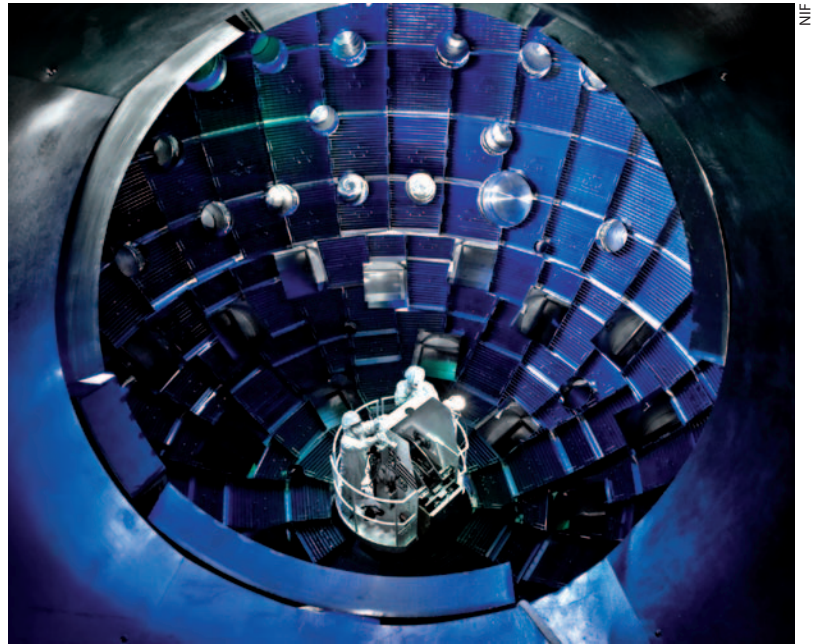


Abb. 1 Im Zentrum dieser sphärischen Kammer komprimieren und erhitzen 192 Laserstrahlen eine nur zwei Millimeter große Kapsel aus Deuterium und Tritium.

treffen die Laserstrahlen durch zwei Löcher auf die Innenseite eines Hohlraums, der die Kapsel wie ein Ofen umgibt, und erzeugen homogene, thermische Röntgenstrahlen. Diese indirekte Fusion ermöglicht eine homogenere Implosion, allerdings geht die Konversion in Röntgenphotonen mit Verlusten einher. Die Röntgenpulse erzeugen Schockwellen, die den Brennstoff komprimieren. Damit sie den Brennstoff nicht vorheizen, was die weitere Kompression auf tausendfache Festkörperdichte erschweren würde, dürfen die einzelnen Schockwellen nicht zu stark sein. Bei korrektem Timing überlagern sie sich im Zentrum der Kapsel und heizen diese bis auf Zündbedingungen, d. h. thermische Energien $k_B T$ in der Größenordnung von keV, auf. Die einsetzende Fusionsreaktion erzeugt α -Teilchen, die ihre Energie in dem Brennstoff, der den Kern umgibt, deponieren und diesen damit zünden (Selbstheizung). Die resultierende Brennwellen breitet sich schneller aus, als der Brennstoff durch seine Massenträgheit entweichen kann. Bei einer Zündung sollen so bis zu 200 MJ

an Energie frei werden. NIF kann theoretisch alle zwei Stunden ein Experiment durchführen, da das Lasermaterial abkühlen muss.

Die bisherigen Experimente haben das Ziel der Zündung verfehlt. Auch wichen die Vorhersagen und Berechnungen deutlich von den experimentellen Ergebnissen ab. Das Verhältnis aus gemessener und berechneter Ausbeute („Yield over Simulated“) lag nur bei ca. 15 Prozent. Bei der erstaunlichen Präzision des Lasers und der bestrahlten Proben stellt sich die Frage: Wenn es nicht am Experiment lag, woran dann? Ein wichtiges Problem sind kleine Inhomogenitäten zu Beginn der Implosion, die aufgrund der verschiedenen verwendeten Materialien entstehen. Diese lösen Instabilitäten aus (Raleigh-Taylor), die deutlich schneller anwachsen als erwartet.

Seit dem vergangenen Jahr läuft eine Messkampagne (High-Foot), um dieses wichtige Problem zu isolieren und zu identifizieren [2]. Eine höhere Leistung zu Beginn des Laserpulses geht zwar mit einer höheren Temperatur einher (gleichbedeutend mit einer geringeren

Kompression und damit dem Verzicht, zünden zu wollen), erlaubt aber eine homogenere Implosion. Wie kürzlich veröffentlichte Ergebnisse zeigen, war diese Kampagne extrem erfolgreich [3]. Als Maß für den Erfolg dient die bei der Implosion gemessene Neutronenzahl, die Aufschluss über die Menge an umgesetztem Brennstoff gibt. Die räumliche Verteilung der primären Neutronen zu den im kalten Brennstoff gestreuten Neutronen erlaubt einen Einblick in Form und Lage des „Hotspot“.

Hinsichtlich der Energiebilanz ist das Verhältnis der im Brennstoff deponierten Energie zu der bei der Fusion erzeugten Energie entscheidend. Gemeint ist hier weder die Energie des Lasers (1,8 MJ) noch die Energie aus der Steckdose (200 bis 300 MJ), sondern die am Ende des Prozesses verbleibende Energie im Brennstoff von etwa 7 bis 10 kJ. Bei den jetzt veröffentlichten Experimenten betrug die Energie aus den Fusionsreaktionen rund 17 kJ, was als „Scientific Break Even“ bezeichnet wurde [3].

Ist das nur ein Werbegag? Sind wir kurz vor der Zündung? Um es klar zu sagen: Nein. Zur Zündung ist es noch weit, aber es ist ein bedeutender Schritt auf diesem Weg gelungen. Erstmals stimmen die Berechnungen mit den Experimenten zu mehr als 90 Prozent überein. Da das Materialproblem deutlich besser verstanden wurde, ließen sich ein Aufbrechen der Schale und

eine Vermischung des Brennstoffes mit der Kapsel unterdrücken. Auch gelang es, die Symmetrie der Implosion besser zu kontrollieren. Außerdem hat die Energie aus der α -Teilchen-Heizung zum ersten Mal signifikant zur Energiebilanz beigetragen. Jedoch war der Zündfunke nicht stark genug, um die Reaktion am Leben zu erhalten, und der Brennstoff konnte nicht genügend komprimiert werden. Die Ausbeute und Reaktionsrate folgten aber exponentiell der Zahl der α -Teilchen, sodass kleine Steigerungen der Selbstheizung große Auswirkungen auf die Energiebilanz haben. Gegenüber der früheren Messkampagne gelang es, die Zahl der Neutronen von $8 \cdot 10^{14}$ auf $6 \cdot 10^{15}$ Neutronen pro Puls zu steigern (Abb. 2). Ab einer Ausbeute von 10^{16} Neutronen/Puls spricht man vom echter α -Teilchen-Heizung. Das Ergebnis ist also kein Werbegag, sondern vor allem deswegen wichtig, weil es das Verständnis der hochkomplexen Plasmaphysik deutlich nach vorne gebracht hat.

Wie geht es weiter? Die Frage lässt sich hier nur grob beantworten. Ein weiteres Experiment im Januar 2014 ergab $9 \cdot 10^{15}$ Neutronen, eine Energie von 27 kJ und damit eine gegenüber den veröffentlichten Ergebnissen gesteigerte Fusionsausbeute. Ein weiterer Versuch im März brachte zwar nicht viel mehr Neutronen, erreichte aber eine höhere Dichte. Zurzeit wird ein Kom-

schwach, um sie direkt nachzuweisen, aber sie beeinflussen den kosmischen Hintergrund: Und zwar würden Gravitationswellen die Strahlung vortexartig polarisieren. Genau dieses Muster der sog. B-Mode haben die Wissenschaftler nun entdeckt (Abb.) und damit den bislang stärksten direkten Hinweis auf die Existenz von Gravitationswellen geliefert. Die winzige B-Mode zu entdecken, erforderte es, den CMB mit einer Genauigkeit von einem Zehnmillionstel Kelvin zu messen. Sollte sich dieser Befund durch weitere Beobachtungen bestätigen, wäre dies der erste experimentelle Nachweis der Inflation. P. A. R. Ade et al. (BICEP2 Coll.), arXiv:1403.3985, <http://bicepkeck.org>

KURZGEFASST

Wellen des Urknalls?

Große Wellen hat im wahrsten Sinne des Wortes die Pressekonferenz geschlagen, in der Wissenschaftler der BICEP2-Kollaboration berichtet haben, sie hätten Zeichen von primordialen Gravitationswellen im kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB) entdeckt. Die Gravitationswellen sind zu

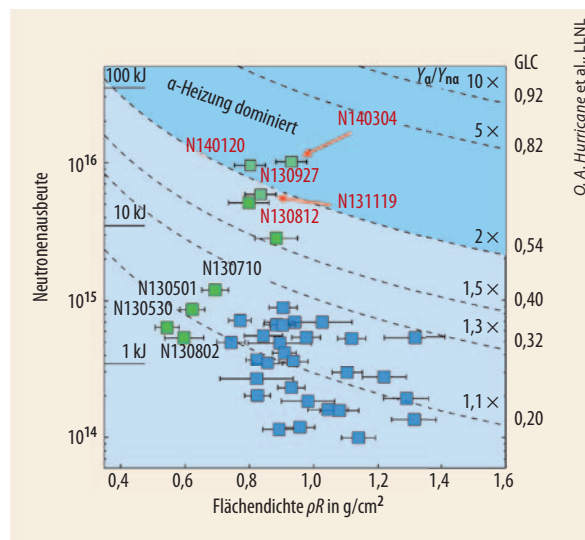
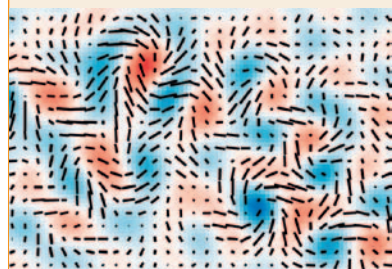


Abb. 2 Die aktuelle Messkampagne am NIF (grüne Werte) hat zwar geringere Werte für die Brennstoffkompression erreicht, dafür aber eine höhere Neutronenausbeute als zuvor (blau). Bei den neuesten Messungen war die Neutronenausbeute mit α -Heizung mehr als doppelt so hoch wie ohne ($Y_\alpha/Y_{na} > 2$), das Ziel liegt aber noch wesentlich höher, entsprechend einem verallgemeinerten Lawson-Kriterium $GLC > 1$.

promiss aus niedriger Entropie und Stabilität gegen RT-Instabilitäten berechnet. Darüber hinaus ist eine Diamantkapsel geringerer Dicke statt der Plastikkapsel in Diskussion. Ein neues Hohlraumdesign soll Konversionsverluste minimieren (Rugby-Hohlraum). Außerdem gibt es Ideen zum Einsatz von lasergetriebenen Magnetfeldern, der Verlängerung der Wellenlänge des Lasers (NIF hat bei 532 nm 5 MJ Energie) oder dem Einsatz eines externen Zünders („Fast Ignition“). Künftige Experimente werden zudem nicht mehr auf Lasertechnologie aus den 1970er-Jahren zurückgreifen. Der Einsatz diodengepumpter Laser oder Faserlaser wird nicht nur die Konversionseffizienz um einen Faktor 50 erhöhen, sondern auch Repetitionsraten von 20 Hz und mehr erlauben, um die Leistung eines Großkraftwerks zu erreichen [4]. Erste solche Laser werden zurzeit entwickelt, ein Prototyp eines Targetinjektors befindet sich im Test.

Markus Roth

- [1] J. Nuckolls et al., Nature **239**, 139 (1972)
- [2] T. R. Dittrich et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 55002 (2014)
- [3] O. A. Hurricane et al., Nature **506**, 343 (2014)
- [4] A. Bayramian et al., Fus. Sci. & Tech. **52**, 383 (2007)

Prof. Dr. Markus Roth, Laser- & Plasmaphysik, TU Darmstadt, Schlossgartenstr. 9, 64289 Darmstadt