

Dieter Seeliger

Perspektivische Beiträge atomarer und nuklearer Prozesse zu einer künftigen kohlenstofffreien Energiewirtschaft

1 Einleitung

Das Thema dieses Symposiums ist der vielseitige Zusammenhang zwischen Technikentwicklung und Nachhaltigkeit. Insbesondere im Interesse der Nachhaltigkeit der weltweiten Entwicklung hat die 21. UN-Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 das Ziel beschlossen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst auf 1,5°C, zu begrenzen. Dazu müssen die Nettotreibhausgas-Emissionen weltweit zwischen 2045 und 2060 auf Null zurückgefahren werden. Erreichbar ist das Ziel nur mit einer konsequenten Klimaschutzpolitik, in deren Zentrum die Vermeidung oder drastische Reduzierung der Verbrennung von Kohlenstoff aus fossilen Energieträgern steht – ein gravierendes Beispiel für die tiefgreifenden Forderungen, welche das Gebot der Nachhaltigkeit an die Technikentwicklung stellt.¹

Die Bewertung der Technologieeinwirkungen aus dem Blickfeld der Nachhaltigkeit unterliegt dem Spannungsfeld der drei Dimensionen – ökonomische, ökologische und soziale Bewertung. Damit sind nicht nur Verfügbarkeit von Ressourcen, technische Machbarkeit und ökonomische Rentabilität dafür entscheidend, ob eine technologische Entwicklung den Kriterien der Nachhaltigkeit gerecht wird, vielmehr spielen im Zeitalter der weltweiten Kommunikation und Vernetzung auch öffentliche Akzeptanz und politische Durchsetzbarkeit eine zunehmende Rolle. Dies kann zu entscheidenden Veränderungen bei der Bewertung technologischer Prozesse im Hinblick auf deren Nachhaltigkeit führen.

Der vorliegende Beitrag betrifft einige Aspekte der Frage, ob atomare und nukleare Prozesse langfristig aus Sicht dieses Spannungsfeldes eine tragende Rolle bei der Dekarbonisierung der Energiewirtschaft und damit für die Erreichung der gestellten Klimaschutzziele spielen können.

1 Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/UN-Klimakonferenz_in_Paris_2015.

Zahlreiche industriell entwickelte Länder sehen auch in Zukunft die Nutzung von Kernenergie auf der Basis von Kernspaltung als unverzichtbare Technologie zur Reduzierung der Nutzung fossiler Energieträger. Deutschland und andere Staaten setzen vor allem auf den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieträger, nehmen die aus deren Volatilität resultierenden Schwierigkeiten in Kauf, um die radiologischen Risiken aus der Kernspaltung zu vermeiden. Im Folgenden wird der aktuelle Stand bei der weltweiten Nutzung der Technologie der Kernspaltung kurz angesprochen, mit einigen Zahlen belegt und deren Perspektiven aus Sicht ihrer Nachhaltigkeit diskutiert. Im Mittelpunkt des Beitrags steht die mögliche künftige Rolle der Fusionstechnologie in diesem Zusammenhang: Auf der 5. Jahreskonferenz der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften 2012 zum Thema „Energie- wende – Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag“ wurde u.a. die Frage aufgegriffen, ob Kernfusion die Bedarfslücke bei Elektroenergie im 21. Jahrhundert umweltverträglich schließen kann (vgl. Seeliger 2014). Der vorliegende Beitrag beleuchtet diese Frage erneut anhand der jüngsten Fortschritte der Fusionsforschung an den weltweit führenden Anlagen zur Magnet- und Trägheitshalterung von Fusionsplasmen. Kurz gestreift werden abschließend neuere Entwicklungen zur Energiefreisetzung in ultra-dichten Wasserstoffkondensaten an Metalloberflächen, über die in jüngster Zeit in der Fachpresse berichtet wird. Dieses soll als ein Beispiel dafür dienen, dass im Ergebnis aktueller naturwissenschaftlicher Forschung neuartige Prozesse ins Blickfeld der energetischen Nutzung gelangen könnten, welche nach wissenschaftlicher Validierung die Frage nach der Perspektive der Nutzung nuklearer Prozesse völlig neu beantworten.

2 Welche Perspektiven hat die Kernspaltungstechnologie?

Die hohe Wahrscheinlichkeit der Kernspaltung des natürlichen Isotops ^{235}U sowie des künstlich erzeugten Isotops ^{239}Pu durch thermische Neutronen ermöglichte die weltweit rasante Entwicklung der Kernenergie-technik auf der Basis von thermischen Reaktoren, so dass innerhalb weniger Jahrzehnte der Anteil der Kernenergie an der weltweiten Erzeugung von Elektroenergie bis auf 16 Prozent anstieg. Mit zunehmendem Umfang der Nutzung der Spalt-technologie rückten auch deren Risiken und Gefahren ins Bewusstsein der Öffentlichkeit, was in Deutschland schließlich zur Entscheidung über den Ausstieg aus der Atomenergie führte. Eine erhebliche Beschleunigung dieser Entwicklung erfolgte bekanntlich als Folge der Reaktorkatastrophen in Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011). Gleichwohl kann festgestellt

werden, dass die technologischen Möglichkeiten der Kernspaltung, auch im Sinne der Minderung ihrer Gefahren und Risiken, längst noch nicht ausgeschöpft sind, so dass heute zahlreiche Staaten – ausdrücklich auch mit Verweis auf die eingangs genannten anspruchsvollen Klimaziele – die Nutzung der Kernspaltungstechnologie auch künftig als unabdingbar ansehen. Kernenergie wird derzeit weltweit in 31 Ländern genutzt (siehe Tab. 1).

Der Tabelle 2 ist der langfristige Trend der Nutzung von Kernenergie seit 1995 zu entnehmen. In diesem Zeitraum ist die verfügbare elektrische Leistung annähernd konstant geblieben, ebenso wie die Anzahl der Reaktoren.²

Infolge der schnellen Entwicklung der Nutzung anderer Energiequellen² ist der Anteil von Kernenergie an der weltweiten Elektroenergieerzeugung allerdings derzeit bereits auf etwa 10 Prozent gesunken. Der Anteil unterschiedlicher Reaktortypen geht aus den Daten in Tabelle 3 hervor. Es dominieren nach wie vor die traditionellen Reaktortypen PWR und BWR, trotz jahrzehntelanger Entwicklung spielen Schnelle Brutreaktoren nach wie vor hinsichtlich der Produktion von Elektroenergie eine untergeordnete Rolle.

Verfügbarkeit: Im Zeitraum von 2012 bis 2014 waren weltweit 445 Reaktoren im Einsatz, mit einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von 74,6 Prozent. Bei den deutschen KKW lag dieser wirtschaftlich wichtige Parameter bei 89,4 Prozent. Der Anteil ungeplanter Verluste an der Verfügbarkeit betrug in Deutschland nur 3,3 Prozent – Beleg eines guten technischen Standes der Anlagen.

Abschaltung: Im März 2016 befanden sich 157 Reaktoren mit 61.395 MW Leistung im Zustand der dauerhaften Abschaltung, darunter 28 in Deutschland, 16 in Japan, 33 in den USA und 30 in Großbritannien.

Lebensalter: Das Alter der gegenwärtig betriebenen Reaktoren liegt im weiten Bereich von 0 bis zu 47 Jahren, mit einem ansteigenden Mittelwert! Allein in der Lebensalterspanne 30 bis 40 Jahre befinden sich 206 Reaktoren, die in den kommenden 10 bis 20 Jahren zu ersetzen wären, soll die Zahl in Betrieb befindlicher Anlagen konstant gehalten werden.

Neubau: Die derzeit im Bau befindlichen Reaktoren sind in Tabelle 4 aufgelistet. Es ist nach Jahren der Stagnation in jüngster Zeit erneut eine steigende Aktivität beim Bau neuer KKW zu beobachten. Angesichts der „Lebensalters-Struktur“ der in Betrieb befindlichen Anlagen ist jedoch festzustellen, dass gegenwärtiger Bau und bisherige Planungen bei weitem nicht

1 Darunter befinden sich allerdings auch Energieträger auf Kohlenstoff-Basis!

Tab. 1: Weltweit in Betrieb befindliche Reaktoren und deren elektrische Nettoleistung

| Staat | Anzahl Reaktoren | Nettoleistung /MW/ | KE-Anteil /%/ |
|------------------|------------------|--------------------|---------------|
| USA | 99 | 99.185 | 19,6 |
| Frankreich | 58 | 63.130 | 76,9 |
| Japan | 43 | 40.290 | 0 |
| Russland | 35 | 25.443 | 18,6 |
| China | 31 | 26.635 | 2,4 |
| Südkorea | 25 | 23.133 | 30,4 |
| Indien | 21 | 5.308 | 3,5 |
| Kanada | 19 | 13.500 | 16,8 |
| Ukraine | 15 | 13.107 | 49,4 |
| Großbritannien | 15 | 8.883 | 17,2 |
| Schweden | 10 | 9.648 | 41,5 |
| Deutschland | 8 | 10.799 | 15,8 |
| Spanien | 7 | 7.121 | 20,4 |
| Belgien | 7 | 5.913 | 47,5 |
| Taiwan | 6 | 5.052 | 18,9 |
| Tschechien | 6 | 3.930 | 35,8 |
| Schweiz | 5 | 3.333 | 37,9 |
| Slowakei | 4 | 1.814 | 56,8 |
| Ungarn | 4 | 1.889 | 53,6 |
| Finnland | 4 | 2.752 | 34,6 |
| Pakistan | 3 | 690 | 4,3 |
| Argentinien | 3 | 1.632 | 4 |
| Brasilien | 2 | 1.884 | 2,9 |
| Mexiko | 2 | 1.440 | 5,6 |
| Südafrika | 2 | 1.860 | 6,2 |
| Rumänien | 2 | 1.300 | 18,5 |
| Bulgarien | 2 | 1.926 | 33,6 |
| Iran | 1 | 915 | 1,5 |
| Armenien | 1 | 375 | 30,7 |
| Niederlande | 1 | 482 | 4 |
| Slowenien | 1 | 688 | 37,2 |
| <i>Insgesamt</i> | <i>442</i> | <i>384.057</i> | |

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand März 2016)

reichen werden, um den Anteil der Kernenergie an der Elektroenergie auf dem gegenwärtigen Stand zu halten.

Neuentwicklungen: Hingewiesen werden soll hier auf die Entwicklung von inhärent sicheren Kernreaktoren der 4. Generation, den Plutonium-freien Thorium-Brennstoffzyklus oder die Entwicklung von Beschleunigeranlagen zur Transmutation von Transuranen. Ohne im vorliegenden Beitrag auf diese aktuellen Richtungen der Kernenergie-technik eingehen zu können, soll hier lediglich festgestellt werden, dass die wissenschaftlich-technischen Potenzen der Kernspaltungstechnik bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind.

Tab. 2: Langfristiger Trend der weltweiten Kernenergienutzung seit 1995

| Jahr | Anzahl Reaktoren in Betrieb | el. Nettoleistung Jahresende in GW | Auslastungsgrad in % | prod. Elektroenergie in TWh |
|------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 1995 | 436 | 341,4 | 74,6 | 2.190,9 |
| 2000 | 438 | 344,9 | 80,6 | 2.443,9 |
| 2005 | 443 | 368,1 | 82,1 | 2.626,3 |
| 2010 | 442 | 375,3 | 80,5 | 2.629,8 |
| 2014 | 439 | 376,3 | 73,3 | 2.410,4 |

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand 13. März 2016)

Tab. 3: Anteil verschiedener Reaktortypen an der Nettoleistung

| Reaktortyp ^a | Anzahl | Nettoleistung (in MW) |
|-------------------------|------------|-----------------------|
| PWR | 283 | 265.020 |
| BWR | 78 | 75.208 |
| PHWR | 49 | 24.592 |
| LWGR | 15 | 10.219 |
| GCR | 14 | 7.685 |
| FBR | 3 | 1.369 |
| <i>insgesamt</i> | <i>442</i> | <i>384.093</i> |

a – *Erläuterung:* PWR – Druckwasserreaktor; BWR – Siedewasserreaktor; PHWR – Druck-Schwerwasser-Reaktor; LWGR – Graphit moderierter Leichtwasserreaktor; GCR – Graphit moderiert, Gas gekühlt; FBR – Schneller Brüter

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand 13. März 2016)

Tab 4: Weltweit im Bau befindliche Reaktoren und deren elektrische Nettoleistung

| Staat | Anzahl Reaktoren | Nettoleistung (in MW) |
|------------------|------------------|-----------------------|
| China | 24 | 24.128 |
| Russland | 8 | 6.582 |
| Indien | 6 | 3.907 |
| USA | 5 | 5.633 |
| VA Emirate | 4 | 5.380 |
| Südkorea | 3 | 4.020 |
| Taiwan | 2 | 2.600 |
| Japan | 2 | 1.325 |
| Ukraine | 2 | 1.900 |
| Weißrussland | 2 | 2.218 |
| Slowakei | 2 | 880 |
| Pakistan | 2 | 630 |
| Frankreich | 1 | 1.630 |
| Brasilien | 1 | 1.245 |
| Finnland | 1 | 1.600 |
| Argentinien | 1 | 25 |
| <i>Insgesamt</i> | 66 | 63.703 |

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand März 2016)

Versucht man im Sinne der Zielstellung dieses Symposiums die Frage nach der Perspektive der Kernenergie-technik auf Basis von Kernspaltung im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz zu beantworten, so fällt die Antwort ambivalent aus: Einerseits besitzt diese Energiequelle nach wie vor das Potenzial für gewaltige Einsparungen von CO₂-Emissionen, auch in der Zukunft. Andererseits führen die ungelösten Probleme bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, die großflächige Gefährdung der Umwelt und Lebensbedingungen bei Havarie sowie die potenzielle Anfälligkeit gegen terroristische Anschläge dazu, dass die Bedeutung der sozialen und politischen Dimension der Nachhaltigkeit in einer zunehmenden Zahl von Staaten und Regionen wächst und damit die Vorbehalte gegen die Nutzung der Kernspaltung weiter ansteigen. Hinzu kommt, dass im Laufe kommender Entwicklungen von Elektroenergiespeichern mit größeren Kapazitäten, verbesserter Verfügbarkeit und günstigeren ökonomischen Parametern die Nachteile der volatilen Energiequellen Windkraft und Solarenergie immer stärker ausgeglichen

werden können. Eine außerordentliche Konzentration von personellen und finanziellen Mitteln für die Implementierung einer neuen Reaktorgeneration oder innovativer Reaktorkonzepte, die vergleichbar wäre mit dem Boom der Kernenergie in den 1960er und 1970er Jahren, ist derzeit weltweit nicht erkennbar. So ist in diesem ambivalenten Umfeld, ungeachtet des weiteren Betriebs vorhandener und der Inbetriebnahme bereits geplanter Kernkraftwerke, am ehesten zu erwarten, dass die Kernspaltungstechnologie noch längere Zeit die Rolle einer wichtigen Brückentechnologie spielen wird, jedoch mit langsam abnehmendem Anteil an der weltweiten Elektroenergieerzeugung.

3 Einige Fortschritte und Herausforderungen der Fusionsforschung

3.1 Fusionsanlagen mit Magnethalterung

TOKAMAK ITER

Nunmehr seit fünf Jahrzehnten wird der Einschluss des heißen DT-Plasmas im Magnetfeld einer geschlossenen Torusspule als Weg zum Fusionsreaktor verfolgt. Infolge der prinzipiellen Inhomogenität des Torus-Magnetfeldes ist zur Plasmahalterung zusätzlich ein magnetisches Poloidalfeld erforderlich, erzeugt durch den induzierten Stromfluss im Plasma – das TOKAMAK-Prinzip. Es hat einen Nachteil: Den Phasen des Plasmaaufbaus und Anstiegs des poloidalen Magnetfeldes muss zwangsläufig eine Pause zur Rückkehr in den Ausgangszustand folgen – der Betrieb ist zwangsläufig gepulst.

Bis heute wird das TOKAMAK-Prinzip von vielen Plasmaforschern nach wie vor als aussichtsreichstes Verfahren zur Realisierung der großtechnischen, gesteuerten Kernfusion gesehen. Entsprechend groß waren die Erwartungen, als Anfang der 1990er Jahre mit der Schaffung einer auf diesem Prinzip beruhenden und international getragenen Demonstrationsanlage zum Nachweis der Nettoenergieproduktion, das TOKAMAK-Projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), begonnen wurde. Heute wird das Projekt wissenschaftlich, industriell und finanziell getragen von den sieben Partnern EU, USA, Russland, Japan, Indien, China und Südkorea. Schritt für Schritt werden seitdem die für die Realisierung des Projektes erforderlichen Komponenten, welche technischen Anforderungen und Belastungen in bisher nicht bekannter Art und Stärke genügen müssen, entwickelt, geplant, gefertigt und schließlich getestet. Nach erfolgter Standortwahl in Saint Paul-lez-Durance bei Cadarache im Jahr 2006 hat dort 2010

der Bau der eigentlichen Anlage begonnen.³ Die gewaltigen Dimensionen dieser Anlage werden anhand einiger Zahlen in Tabelle 5 verdeutlicht.

Tab. 5: Einige Parameter der TOKAMAK-Anlage ITER

| Komponente | Parameter | Größe/Gewicht |
|------------------|--------------------------|------------------------------|
| Gesamte Maschine | Gewicht | 23.000 t |
| | Höhe | 60 m |
| Vakuumkammer | Volumen | 840 m ³ |
| | Hauptradius | 6,2 m |
| | Gewicht | 8.000 t |
| | Druck | 10 ⁻⁶ bar |
| Cryostat | Volumen | 16.000 m ³ |
| Plasma | Temperatur | 150 Mill. Kelvin |
| | Druck | 10 ⁻⁶ Normaldruck |
| | Strom | 15 MA |
| | Brennstoffmasse | 0,1 ... 1 g |
| | Brenndauer | 8 min |
| Magnet | Temperatur | 4 K (-269°C) |
| | Supraleiterstränge Nb3Sn | 100.000 km |
| | Gespeicherte Energie | 51 GJ |
| | Feldstärke | 5,3 Tesla |
| Leistungsbilanz | Leistungsaufnahme | 50 MW |
| | Ausgangsleistung | 500 MW |

Quelle: nach <http://www.iter.org>

Welche Fortschritte wurden in den vergangenen drei Jahren, seit dem Bericht auf der Jahreskonferenz der Leibniz-Sozietät im Jahr 2012 (vgl. Seeliger 2014) erzielt:

- *Zielstellungen:* Die wesentlichen Zielstellungen sind unverändert geblieben, das heißt
 - Freisetzung von 500 MW Leistung, bei einer Eingangsleistung von 50 MW ($Q > 10$);
 - Demonstration des Zusammenspiels aller Technologien, die auch für ein künftiges Demonstrations-Fusionskraftwerk erforderlich sind, ein-

2 Vgl. <http://www.iter.org>.

- schließlich der Möglichkeit des Studiums des Plasmas und der erforderlichen Technologien, wie Heizung, Steuerung, Kryotechnik, ferngesteuerte Instandhaltung u.a.;
- Realisierung eines Deuterium-Tritium Plasmas, in welchem die Fusionsreaktion infolge der inneren Erhitzung durch Reaktionsprodukte aufrechterhalten wird („Burning Plasma“).
 - *Planungen:* Software-Pakete ermöglichen eine durchgängige 3D-Simulation aller Komponenten, Teilsysteme und Aggregate und die Koordination des Designs tausender Komponenten, die für das Fusionsexperiment erforderlich sind. Nur dadurch ist die Detailfülle beherrschbar, werden alle Entwürfe des Designs geprüft, Design und Möglichkeiten des Zusammenbaus getestet, d.h. die Optimierung des Aufbaus und technische Abläufe der späteren Instandhaltung.
 - *Technologieentwicklungen:* Die außerordentlich umfangreichen und vielseitigen Technologieentwicklungen erfolgen nach dem Prinzip, dass alle Partner gleichberechtigt zu wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen beitragen und gemeinsam die Komponenten des ITER bauen. Die Verteilung der Aufgabenbereiche unter den teilnehmenden Partnern ist Tabelle 6 zu entnehmen. Sie zeigt eine weit verzweigte weltweite Kooperation, bei der Entwicklungen teilweise parallel laufen, eng ineinander greifen und aufeinander aufbauen müssen. Dieses komplexe und komplizierte Geschehen ist derzeit voll entfaltet, zahlreiche Komponenten befinden sich in einer fortgeschrittenen Entwicklungsphase bzw. bereits in der Fertigung.

Tab. 6: Beteiligung der ITER-Partner am Bau von Hauptkomponenten

| | EU | Russland | USA | Japan | China | Korea | Indien |
|--------------|----|----------|-----|-------|-------|-------|--------|
| Solenoid | | | X | X | | | |
| Kryostat | | | | | X | | X |
| Magnetspulen | X | X | X | X | X | X | |
| Divertoren | X | X | | X | | | |
| Kühlung | | | X | | | | X |
| Plasmagefäß | X | X | | | X | X | |
| Heizsystem | X | X | X | X | | | X |
| Vakuumkammer | X | X | | | | X | X |
| Wärmeschild | | | | | | X | |

Quelle: nach Sonnabend 2016a

- *Baufortschritt:* Seit 2010 läuft auf dem 42 Hektar großen ITER-Gelände das Baugeschehen. Die Fertigungshalle ist errichtet. In diesem erfolgen die Vormontage von Teilen des Plasmagefäßes und der supraleitenden Spulen. Das Plasmagefäß ruht auf einer starken Bodenplatte mit 500 anti-seismischen Federungen. Gegenwärtig wächst die Betonhülle, die später das Vakuumgefäß des Fusionsexperiments ITER umgibt, das unterste der sieben Stockwerke wird gerade fertiggestellt. Erst nach Aufbau des Plasmagefäßes wird das siebenstöckige ITER-Gebäude endgültig fertiggestellt. Daneben entstanden oder entstehen zahlreiche kleinere Gebäude: Cleaning Facility, Kryotechnik, Büro- und Empfangsgebäude und Gebäude für das Wickeln der Spulen, die bereits seit 2012 fertiggestellt wurden.
- *Zeitplan:* Die Projektrealisierung weist große Verzögerungen auf. Der ursprüngliche Zeitplan (Stand 2006) sah die erste Plasmazündung für 2016 vor. Nach mehreren nachfolgenden Verzögerungen, wird die Inbetriebnahme mit Wasserstoffplasma aktuell für das Jahr 2025 prognostiziert und die angestrebte Demonstration einer annähernd zehnfachen Energieausbeute mit DT-Plasma ab 2030, mit einer Brenndauer des Plasmas von 8 Minuten, als Zielstellung festgelegt. Nach einer Lernphase am ITER und Übergang zum Test von Komponenten für DEMO soll die Anlage außer Betrieb genommen werden, aus heutiger Sicht ist das gegen 2040 zu erwarten. An der Planung und Design der DEMO-Anlage soll bereits parallel zu den ITER-Experimenten ab 2028 gearbeitet werden, so dass ab 2035 bis 2045 das Demonstrationskraftwerk aufgebaut und ab 2050 in Betrieb genommen werden könnte. Soweit der derzeitige Zeitplan. Bis zum Jahr 2050 soll also die Produktion von Elektroenergie in einem Demonstrationskraftwerk erreicht sein. Diese Prognose ist teilweise spekulativ – da nicht alle technischen und politischen Probleme in den kommenden Jahrzehnten bekannt sein können. Andererseits kann erst mit Betrieb des Demonstrationskraftwerkes die Frage nach der ökonomische Konkurrenzfähigkeit gegenüber alternativen Verfahren der Elektroenergieerzeugung beantwortet werden.
- *Organisation und Kosten:* Die Kosten des Vorhabens sind immens und deren Prognosen stetig steigend, gegenwärtig werden sie mit 13 bis 17 Milliarden Euro allein für die EU angegeben. Immer wieder ist es bisher infolge des Preisanstiegs für Rohstoffe und Dienstleistungen, bedingt durch die komplexe internationale Organisations- und Entscheidungsstruktur, wegen partieller Interessen einzelner Partner oder technischer Probleme zu Verzögerungen und Abschmelzungen an den Zielstellun-

gen gekommen. Eine Evaluation im Jahr 2014 zeigte Fehlentwicklungen beim Management auf und führte zur Neubesetzung der Position des Generaldirektors (vgl. Sonnabend 2016a).

Trotz aller genannten Einschränkungen und finanziellen Unsicherheiten ist aus heutiger Sicht ITER das „Flaggschiff“, mit dem sich die Erwartung auf die Beherrschung der gesteuerten Kernfusion und ihre Nutzung zur Produktion von Elektroenergie in der Zukunft in erster Linie verbindet. Wie ist diese Entwicklung aus Sicht ihrer Nachhaltigkeit zu bewerten?

- Die DT-Fusion nutzt als Rohstoffe Wasser (Deuterium) und Gestein (Lithium), die auf der Erde praktisch unbegrenzt verfügbar und nachhaltig zu gewinnen sind. Theoretisch können aus der Fusion von einem Gramm Deuterium und Tritium 90 MWh Energie freigesetzt werden, das entspricht der Verbrennung von elf Tonnen Kohle (vgl. HELM 2006).
- Bei der DT-Fusion entstehen keine langlebigen Transurane und Spaltprodukte. Damit entfällt das Problem der notwendigen Endlagerung der Abfälle über tausende Jahre. Gleichwohl entsteht durch die Neutronenstrahlung in den Strukturen des Reaktors aus Reaktionen vom Typ $(n,2n)$, (n,p) , (n,α) , (n,γ) u.a. Radioaktivität, die jedoch durch wesentlich kürzere Halbwertszeiten charakterisiert ist. Weiterhin wird als ein Brennstoffnuklid des Plasmas aus dem Element Lithium in einer Brutzone um das Plasma das radioaktive Tritium erzeugt. Beide Arten von Radioaktivität sind jedoch einfacher zu handhaben und aus Sicht der Nachhaltigkeit wesentlich weniger belastet als die Radioaktivität in Brennstoffen von Spaltungsreaktoren.
- Im DT-Fusionsreaktor entsteht in wesentlich geringerem Umfang und nur für kürzere Zeiträume Nachwärme aus dem Zerfall der o.g. Radionuklide. Die Kühlung nach Abschaltung der Plasmaprozesse ist daher einfacher, gefährliche Prozesse wie die Kernschmelze können durch geeignete Materialien praktisch vollkommen ausgeschlossen werden. Der Reaktor lässt sich zu jedem Zeitpunkt sicher abschalten, es gibt keine Kritikalität, der Reaktor kann also auch nicht spontan überkritisch werden.
- Selbst bei schwersten Havarien könnten keine so weiträumigen Umweltgefährdungen entstehen, wie dies beim GAU eines Kernspaltungsreaktors der Fall ist, flüchtige Radionuklide wie ^{137}Cs und ^{90}Sr treten im Inventar eines Fusionsreaktors nicht oder nur marginal auf.
- Ein DT-Fusionsreaktor wäre gegenüber terroristischen Angriffen leichter zu schützen und sie würden im schlimmsten Fall vergleichsweise geringere Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Ungeachtet aller genannten Vorteile bleibt die Bewertung der Nachhaltigkeit der Fusionstechnologie in ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension nicht trivial und wird erst mit deren Test in einer Demonstrationsanlage endgültig zu beantworten sein. Dies gilt auch für andere Fusionskonzepte, insbesondere solange sie Tritium als Brennstoff und energiefrei-setzende Reaktionen verwenden, in denen Neutronen entstehen.

STELLARATOR Wendelstein 7-X

Theoretisch können auch bestimmte stationäre Magnetfelder einen dauerhaften Plasmaeinschluss ermöglichen: Es existieren rechnerisch Magnetfeldkonfigurationen, bei denen die Teilchen im Plasma beim Umlauf unterschiedlich orientierte stationäre Magnetfelder in der Weise durchlaufen, dass ihr stabiler Einschluss für längere Zeit gewährleistet ist. Das darauf beruhende Verfahren erhielt die Bezeichnung STELLARATOR-Prinzip. Es handelt sich dabei um sehr komplizierte, unregelmäßige Magnetfeldstrukturen, deren gerätetechnische Umsetzung sich als äußerst anspruchsvoll erweist (vgl. Klinger/Kemnitz 2015).

Die Montage der auf diesem Prinzip beruhenden Anlage Wendelstein 7-X begann im April 2005 am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Teilinstitut Greifswald.⁴ Die wesentlichen Parameter dieser Anlage können Tabelle 7 entnommen werden.

Ein Ring aus 50 supraleitenden, etwa 3,5 Meter hohen Magnetspulen ist das Kernstück der Anlage. Ihre speziellen Formen sind das Ergebnis ausgefeilter Optimierungsrechnungen. Die Spulen sind auf ein stählernes Plasmagefäß montiert und von einer ringförmigen Stahlhülle als Vakuumgefäß umschlossen. Die Spulen werden mit flüssigem Helium auf Supraleitungstemperatur gekühlt. Der von ihnen erzeugte Magnetfeldkäfig hält im Inneren des Plasmagefäßes das 30 Kubikmeter füllende ultradünne Plasma. Die Komplexität der Strukturen von Wendelstein 7-X ist in der Darstellung einer Computersimulation in Abbildung 1 zu erkennen.

Der Betriebsstart erfolgte am 10. Dezember 2015, seitdem hat Wendelstein 7-X bis März 2016 mehr als 300 Entladungen mit dem Edelgas Helium erzeugt und diese vor allem zum Reinigen des Plasmagefäßes genutzt. Das erste Wasserstoff-Plasma, gezündet am 3. Februar 2016, markiert den Beginn des wissenschaftlichen Experimentierbetriebs an Wendelstein 7-X. Die ver-

3 Vgl. www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/.

Tab. 7: Angestrebte Technische Daten von Wendelstein 7-X

| | |
|--------------------------------------|---|
| mittlerer großer Radius des Plasmas | 5,5 m |
| mittlerer kleiner Radius des Plasmas | 0,53 m |
| Plasmavolumen | 30 m ² |
| Masse des Plasmas | 5-30 mg |
| Plasmadichte | bis $1,5 \cdot 10^{20}$ Teilchen / m ³ |
| Temperatur der Elektronen | 150 Millionen K |
| Temperatur der Ionen | 50 Millionen K |
| Einschlussdauer (Langpuls-Betrieb) | 30 min |
| Volumen des Plasmagefäßes | ≈ 50 m ³ |
| Vakuumgefäß | Durchmesser: 16 m; Höhe: 5 m |
| Magnetfeldstärke auf der Achse | 3 Tesla |
| Plasmaheizung (Langpuls-Betrieb) | 10 MW Mikrowellen + max. 10 MW Neutralteilchen |

Quelle: nach www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/

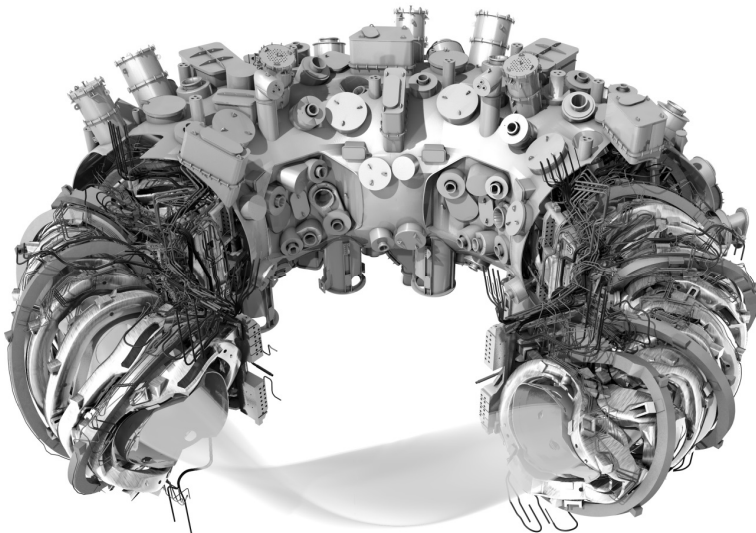


Abb. 1: Computermodell eines Querschnitts durch den Kern der STELLARATOR-Anlage Wendelstein 7-X

Quelle: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

öffentlichsten ersten Ergebnisse besagen, dass Plasmatemperaturen von 80 Millionen K und eine Brenndauer des Plasmas von 0,25 Sekunden erreicht wurden (vgl. WEND 2016). Bis September 2016 konnte die Brenndauer des Plasmas bis auf 6 Sekunden und die Temperatur der Plasmaelektronen bis auf 100 Millionen K, bei einer Iontemperatur von 10 Millionen K, gesteigert werden (vgl. Sonnabend 2016b). In der nun laufende Phase bis Mitte 2017 wird die Anlage weiter ertüchtigt, indem die Wärme ableitenden Platten im Vakuumgefäß aus Cu-Cr-Zr-Legierung mit Kacheln aus Kohlenstoff bedeckt werden, um höhere Heizleistungen zu erlauben. So sollen schrittweise die Zielparameter zu erreichen sein, insbesondere eine Brenndauer des Plasmas von 30 Minuten bei einer Iontemperatur von 100 Millionen Kelvin. Erst nach einer längeren Experimentierphase mit Wasserstoff sollen durch Beimischungen von Deuterium Betriebserfahrungen mit dem schweren Wasserstoffisotop gewonnen werden, die für die Extrapolation auf den DT-Betrieb in einer nachfolgenden DEMO-Anlage von Bedeutung sind. Durch die Deuterium-Beimischungen wird Wendelstein 7-X zu einer nuklearen Anlage, da erstmals in geringem Umfang DD-Reaktionen stattfinden und somit Neutronen freigesetzt werden.

Die von Bund, Land und EU getragenen Investitionskosten für Wendelstein 7-X beliefen sich auf 370 Millionen Euro. Die Bauteile fertigten Firmen in ganz Europa; Aufträge im Wert von weit über 70 Millionen gingen an Unternehmen in der Region. Zahlreiche Forschungseinrichtungen im In- und Ausland waren am Aufbau der Anlage beteiligt. So trug im Rahmen der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren das Karlsruher Institut für Technologie die Verantwortung für die Mikrowellen-Plasmaheizung; das Forschungszentrum Jülich baut Messgeräte und fertigte die aufwändigen Verbindungen der supraleitenden Magnetspulen. Den Einbau übernahmen Spezialisten der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Kraków. Die US-amerikanischen Fusionsinstitute in Princeton, Oak Ridge und Los Alamos trugen u.a. mit magnetischen Zusatzspulen und Messgeräten zur Ausrüstung von Wendelstein 7-X bei.⁵

Erweist sich das STELLARATOR-Prinzip als geeignet für die Halterung des heißen Plasmas und die sichere Beherrschung von Turbulenzen, so öffnet sich hier eine Perspektive für die Magnethalterung alternativ zum TOKAMAK-Prinzip. Bei positiver Antwort auf viele plasmaphysikalische Fragen dieses Einschlusstyps mit Hilfe von Wendelstein 7-X könnten nachfolgend die nächsten beiden Etappen – nukleare Demonstrationsanlage und

4 Vgl. www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/.

DEMO-Kraftwerk – folgen, parallel oder gegebenenfalls auch als eine Alternative zum TOKAMAK.

Hinsichtlich der Bewertung seiner Nachhaltigkeit gilt für einen künftigen Reaktor nach dem STELLARATOR-Prinzip Gleiches, wie für den TOKAMAK-Reaktor: Er würde zahlreiche Vorteile gegenüber Kernspaltungsreaktoren aufweisen. Bestehen bleiben dagegen auch beim STELLARATOR die bereits genannten prinzipiellen Nachteile der DT-Reaktion.

3.2 Fusion mit Inertialhalterung

Laserfusion NIF

Beim konzentrischem Beschuss eines DT-Pellets mit zahlreichen intensiven Laserstrahlen kommt es infolge der starken Erhitzung des Materials zur Verdampfung (Ablation) der Oberflächenschicht. Der Rückstoßimpuls der abgelösten Teilchen komprimiert und erhitzt das Pellet, so dass sich in diesem kurzzeitig Fusionsbedingungen gemäß Lawson-Kriterium einstellen – dies ist das Prinzip der Laserfusion (vgl. Nuckolls et al. 1972). Infolge der Trägheit der massebehafteten Deuterium- und Tritiumionen bleibt das heiße Plasma für kurze Zeit auf kleinstem Raum konzentriert, die ausreicht, um einen Teil dieser Ionen zu Helium zu verschmelzen, daher spricht man vom Trägheitseinschluss oder Inertialhalterung des Plasmas.

Der Weg zur Auslösung der Fusion in DT-Pellets mittels Laserkompression wird ebenfalls seit Jahrzehnten verfolgt, insbesondere in den USA, Frankreich und Japan, auch in China laufen intensive Arbeiten zur Laserfusion. Die gewaltige Steigerung der Laserleistung bei Gewährleistung höchster optischer Präzision markiert den bisher erreichten Fortschritt.

Die vordere Front der Entwicklung wird durch die Anlage NIF (National Ignition Facility) im Lawrence Livermore Laboratory präsentiert, die im Jahr 2009 in Betrieb ging und an der im Jahr 2012 das Erreichen eines Laserimpulses von 15 Nanosekunden Dauer und einer Leistung von 1,89 Megajoule, verteilt auf 192 Strahllinien, berichtet wurde (vgl. LLNL 2012). Diese transportieren die Energie in die evakuierte Targetkammer, in deren Zentrum sich der Fusionsbrennstoff, ein Gemisch aus Deuterium und Tritium als dünne, gefrorene Schicht auf einer zwei Millimeter Kunststoffkapsel befindet, die mittig in einem kleinen vergoldeten Metallzylinder platziert ist. Die Laserstrahlen treten durch die Stirnflächen des Zylinders, an der Brennstoff-Kapsel vorbei (indirect drive), auf die innere Oberfläche des Gold-Zylinders, auf der sie absorbiert werden und das Metall so stark erhitzen, dass der Innenraum des Zylinders sich mit intensiver Röntgenstrahlung

(Hohlraumstrahlung) füllt. In diesem Strahlungsfeld verwandelt sich die Oberfläche der Kapsel in ein schnell expandierendes Plasma. Der Rückstoß der Expansion beschleunigt die Kugelschale auf eine Geschwindigkeit von einigen hundert km/s nach innen. Bei symmetrischer Kompression werden im Zentrum des Pellets Temperaturen von 50 bis 100 Millionen Kelvin und eine extrem hohe Dichte erzielt, mit dem Ziel, die Zündschwelle für eine selbsterhaltende Fusionsreaktion zu übertreffen. Dann würde die Fusionszone innerhalb von etwa zehn Picosekunden von innen nach außen wandern, etwa die Hälfte des DT-Materials verschmelzen und dabei mehr Energie freisetzen, als zur Zündung benötigt.⁶

Die Erwartung, dass mit der verfügbaren Laserenergie von 1,8 MJ die Zündung erreicht wird, haben sich bisher jedoch nicht erfüllt. Die gegenwärtigen Arbeiten am NIF orientieren drauf, eine höhere Dichte bei der Kompression zu erreichen.⁷ Damit soll die Absorption der Alphateilchen aus der DT-Reaktion im Bereich des „Hot-Spot“ erreicht werden – ein wesentlicher Prozess für die Auslösung einer selbsterhaltenden Fusionsreaktion. Weitere Verbesserungen sind gegenwärtig auf Struktur und Material der Brennstoffkapseln und der Hohlraum-Zylinder gerichtet. Auf diesem Wege wurde im Februar 2016 über Einzelereignisse berichtet, bei denen etwa 5×10^{15} DT-Neutronen freigesetzt wurden, das entspricht einer Neutronenenergie von mehr als 8 kJ – beachtlich, aber noch weit entfernt von der Einschussenergie 1,8 MJ!

Ein neuerdings verfolgter Ansatz bei den Experimenten trägt die Bezeichnung „Schnelle Zündung“ (Fast Ignition, FI). Bisher wurde das Ziel verfolgt, im Zentrum des Pellets gleichzeitig höchste Temperatur und höchste Kompression zu erreichen, um die Zündschwelle zu überschreiten – der sogenannte „Hot-Spot“-Ansatz (HS). Beim FI-Ansatz werden Kompression und Zündphase getrennt herbeigeführt, indem zu der bisher üblichen Kompression und Erhitzung ein hochintensiver, extrem kurzer Laserimpuls in die Pellet-Oberfläche eingeschossen wird, welcher durch zusätzliche Erhitzung quasi den Zündfunken für die Auslösung der Fusion liefert. Das DT-Pellet wird also zunächst durch Laser zu höchster Dichte komprimiert und danach wird der komprimierte Kern durch weitere Energiezufuhr gezündet. Bei dieser Art der Zündung sind die Anforderungen an Druck und Dichte geringer als bei zentraler HS-Kompression. Dieser Weg verspricht außerdem günstigere Werte für das Verhältnis von aufgewandter zu freigesetzter

5 Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/National_Ignition_Facility.

6 <https://lasers.llnl.gov/science>.

Energie. Experimentelle Ergebnisse, welche die Vorteile dieser Methode bestätigen, bleiben abzuwarten.

Ein weiterer neuer Ansatz für die Experimente besteht darin, das Target in ein starkes Magnetfeld einzubetten, welches geladene Teilchen in der Nähe des Hot-Spot hält und den Wärmetransport vom Target hinweg bremst, was das Erreichen der Zündschwelle erleichtern soll. Dieser Ansatz basiert auf dem ursprünglich am Argonne National Laboratory entwickelten Konzept der „Magnetized Target Fusion“ (MTF), welches im nächsten Punkt näher beschrieben wird. Eine Weiterentwicklung dieses Konzepts, Magnetized Linear Inertial Fusion genannt, war im Rahmen des Programms an der Z-Maschine im Sandia National Laboratory entstanden und erfolgreich getestet worden. Es soll in nächster Zeit auch im Rahmen des NIF eingesetzt werden, um bei der Laserfusion die Zündschwelle zu erreichen.

Erst wenn die Zündung gelingt, sind die Voraussetzung für den Beginn der eigentlichen, sehr schwierigen Reaktorentwicklung gegeben – mit periodischen kurzen Wärme- und Strahlungsimpulsen höchster Leistung, Nettoenergieproduktion und Brutmantel zur Gewinnung der Tritium-Brennstoffs sowie hinreichend großer Wiederholffrequenz der Fusionsimpulse. Auch auf diesem Wege sind noch immense technologische Probleme zu überwinden, die insbesondere aus der Verknüpfung von höchster optischer Präzision mit der periodischen Freisetzung enormer thermischer und nuklearer Impulsleistung verbunden sind. Die Zerstörung der Strukturen in unmittelbarer Nähe des Pellets infolge der enormen Energiefreisetzung bei der Zündung ist dabei nur ein Problem. Der Zeithorizont für die Lösung der Probleme ist noch unbestimmt, er könnte bei günstiger Entwicklung jedoch auch kürzer als beim Demonstrationskraftwerk auf TOKAMAK-Basis sein. Die bisherigen Kosten für dieses Projekt wurden bereits im Jahr 2012 mit 3,5 Milliarden US \$ angegeben und liegen kumulativ derzeit deutlich über diesem Wert.

Röntgenfusion Z-Maschine

Auf der Suche nach einer alternativen Lösung, im Vergleich zur Kompression mittels Laser, entstand das Prinzip der Trägheitsfusion von DT-Pellets mittels Röntgenstrahlung. Genutzt wird dabei der sogenannte Pinch-Effekt, nach dem beim Stromfluss durch eine Plasmaschnur das entstehende Magnetfeld zur Einschnürung und extrem starken Erhitzung des Plasmas führt.

Die Technologie zur Kompression von DT-Pellets mittels kurzzeitigen intensiven Röntgenimpulsen wurde in der sogenannten Z-Maschine im San-

dia Laboratory in Albuquerque entwickelt.⁸ Das Herzstück der Anlage befindet sich in einem Metallzylinder mit 32 Meter Durchmesser und sechs Meter Höhe, zu dem 36 radial angeordnete Kupferleiter mit jeweils einem Meter Durchmesser hinführen. Durch diese radialen Leiter wird ein sehr kurzer (< 100 ns) Stromimpuls mit einer Stromstärke bis zu 20 Millionen Ampere aus Kondensatorbatterien in das Zentrum der Anlage geleitet. Im Zentrum befindet sich eine Vakuumkammer, auf deren Achse wiederum der Z-Pinch angeordnet ist. Letzterer besteht aus einer zylindrischen Anordnung von 300 dünnen Wolframdrähten (Durchmesser $10 \mu\text{m}$, Länge 20 cm), die parallel zur Zylinderachse aufgespannt sind. Im Zentrum des Z-Pinch befindet sich die etwa zwei Millimeter große Plastikkugel mit D+T-Gemisch, welche zur Fusion gebracht werden soll. Zur Zündung wird der gewaltige Stromimpuls durch die dünnen Wolframdrähte geschickt, was zu deren augenblicklicher Umwandlung in ein extrem heißes Plasma führt. Der Stromfluss durch das Wolfram-Plasma erzeugt ein sehr starkes Magnetfeld, welches das Plasma komprimiert und weiter erhitzt (das ist der Pinch-Effekt). Die vom Pinch emittierte Strahlung führt zur Erhitzung und infolge der weitgehenden Ionisation der Metallatome zur Ausbildung eines kurzen Röntgenblitzes mit bis zu 290 TW Leistung. Der durch die Röntgenstrahlung ausgeübte Strahlungsdruck erhitzt und komprimiert die Kapsel im Zentrum mit dem Ziel, die Zündung der DT-Fusion auszulösen. Die Zeit zur erneuten Aufladung der Kondensatoren beträgt einige Minuten. Die Z-Maschine stellt bisher die Anlage mit der weltweit größten elektrischen Impulsleistung und mit der größten Röntgen-Impulsleistung dar.

Durch die bereits 2003 erzielte Leistung von 120 TW im Röntgenimpuls stieg die Teilchendichte im Pellet auf das zweihundertfache, die Temperatur auf weit über 100 Millionen Kelvin. Im Jahr 2006 wurden sogar Temperaturen bis zu 2 Milliarden Kelvin berichtet. Dennoch war das Niveau von „Break-even“ damit nicht erreicht. Es wurden keine neuen Ergebnisse über den derzeitigen Stand der Röntgenfusion an der Z-Maschine gemeldet, obgleich diverse andere Forschungsprojekte an der Anlage weiter betrieben werden.⁹ Die kurzzeitige und exakt gleichzeitige Bereitstellung von gewaltiger Stromleistung zur Verdampfung der Metallfäden und Zerstörung der Strukturen in der Nähe des Z-Pinch wird auch bei einer Reaktorentwicklung nach diesem Prinzip ebenfalls enorme technologische Probleme mit sich bringen. Die zeitliche Prognose für das Erreichen der Zündbedingung ist derzeit extern kaum möglich, sie liegt vermutlich noch hinter der Laserfusion,

7 Vgl. <http://www.sandia.gov/z-machine/>.

8 Vgl. <http://www.sandia.gov/z-machine/>.

schnellere Entwicklungen in Zukunft sind jedoch nicht ausgeschlossen, wenn das Projekt weiter verfolgt wird.

3.3 Magnetized Target Fusion

Die Magnetized Target Fusion (MTF) ist eine Form der Fusion, die hinsichtlich Zeit- und Dichteskalen zwischen Magnethalterung (Magnetic Confined Fusion, MCF) und Trägheitsfusion (Inertial Confined Fusion, ICF) angesiedelt ist. Sie besteht aus zwei Stufen:

- (1) Formierung eines warmen (200 eV), magnetisierten, von der Wand entfernten Plasmas;
- (2) nachfolgende quasi-adiabatische Kompression durch eine implodierende treibende Kraft, wie beispielsweise ein magnetisch getriebener Liner, bis zur Zündung.

MTF stellt faktisch ein Hybrid dar zwischen der Magnethalterung und der Inertialhalterung. Diese Kombination verspricht die Umgehung einiger Schwierigkeiten, mit denen die Fusion mit Magnethalterung und die Laserfusion konfrontiert sind und darüber hinaus kleinere und bedeutend kostengünstigere Lösungen für Reaktoranlagen (zum Vergleich typischer Parameter siehe Tab. 8). Während bei der MCF mit Plasmen sehr geringer Dichte gearbeitet werden muss und bei der ICF mit extrem gekühlten Proben und höchster Zeitschärfe, gestattet MTF wesentlich günstigere Ausgangsbedingungen für das Erreichen der Zündung. In der MTF bietet das Magnetfeld zusätzlich den Vorteil der Verringerung thermischer Verluste aus dem Plasma in die Wand. Ein bei relativ geringer Temperatur und geringer Dichte magnetisch gehaltenes Plasma wird zu thermonuklearen Bedingungen komprimiert, wobei es sich um eine relativ zur Laserfusion langsamere Kompression handelt und eine geringerer Peakdichte ausreichend ist. Bei der MTF sind weder supraleitende Magneten noch Leistungslaser erforderlich. Ebenso wie MCF und ICF orientiert MTF bisher meist auf die Realisierung der DT-Fusion (vgl. Siemon et al. 1997).

Die auf diesem Prinzip basierende Plasmaanlage FRX-1 ist am Los Alamos National Laboratory seit 2001 in Betrieb. Mit D- und T-Ionen beladene Plasmaringe (sogenannte Spheromaks) werden durch äußere Feldeinwirkung insgesamt komprimiert, wodurch Magnetfeldstärke, Dichte, Druck und Temperatur im Inneren des Plasmas bis zum Erreichen von Fusionsbedingungen steigen sollen.

Tab. 8: Vergleich typischer Parameter der MTF mit denen von MCF und ICF

| Parameter | MCF | MTF | ICF |
|---------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| Startdichte in cm^{-3} | 10^{14} | 10^{17} | 10^{21} |
| Starttemperatur in keV | 10 | 10^{-1} | (kryogen) |
| Pulsung in s | 10^3 | 10^{-6} | 10^{-9} |
| Treiberleistung bzw. -energie | >150 MW, 25 MA, stationär (ITER) | 10 MJ, 50 MA Impulsleistung | 1,8 MJ Laserimpuls (NIF) |

Eigene Darstellung

Eine Weiterentwicklung wird derzeit an der Anlage FRX-L im Los Alamos National Laboratory (LANL) gearbeitet: Das Plasma wird in einer Quarzröhre mit 10,5 Zentimeter Durchmesser formiert, aus deren offenem Ausgang das Plasma in einem Liner aus Aluminium überführt wird, in dem das Plasma durch Magnetfelder bis zu einer Dichte von etwa 10^{19} cm^{-3} komprimiert wird, wobei die Plasmatemperatur auf 5 bis 10 keV ansteigt und das Magnetfeld stark ansteigt. Durch die Verwendung eines Magnetfeldes zur Reduzierung der Energieverluste an die Wand kann die Zeitskala für Trägheitsfusion verlängert werden, so dass eine kostengünstigere Elektrotechnik (anstelle teurer Laser) zum Betreiben verwendet werden kann. Elektrische Impulstechnik wird verwendet, um einen Metallzylinder, der um das vorformierte Targetplasma angeordnet ist, implodieren zu lassen. Das reduziert das notwendige Kompressionsverhältnis zehnfach bis zwanzigfach. Solche Kompressionen sind bereits in hydrodynamischen Experimenten erreicht worden. Am Ende der Brennphase, nachdem das Metall in Richtung der Achse kollabiert ist, entsteht theoretisch ein Jet aus heißem, geschmolzenem Metall, welcher axial in beiden Richtungen aus dem Liner ausgestoßen wird. Mit der FRX-L Anlage im LANL wurde bisher erreicht eine Dichte von $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ sowie eine DD-Ausbeute von 10^{15} Neutronen pro Schuss. Ziel ist eine Dichte von 10^{19} cm^{-3} bei einer Dauer von mehr als $1 \mu\text{s}$ (vgl. Slough 2015).

Es gibt auch für diese Technologie schwer zu überwindende Hürden: Die Formierung eines ausreichend langlebigen Plasmabündels als Target mit einer Lebensdauer von etwa $10 \mu\text{s}$, das Zusammenspiel zwischen der Formierung der Plasmabündel und nachfolgender Implosion, die Symmetrie der Implosion, die Vermeidung eines Gemisches aus Metall- und Wasserstoffionen bei der Kompression, Minimierung der Transportverluste des Plasmas an den Wänden u.a. Trotz der Vereinfachung im Vergleich zu den vorge-

nannten Verfahren ist auch das MTF-Prinzip noch nicht zu einem energieerzeugenden Reaktor umgesetzt worden, obgleich seit längerer Zeit an dem Verfahren gearbeitet wird. Daher ist auch für dieses Verfahren bisher noch keine Prognose über den Zeitrahmen bis zur Einführung in die Praxis der Erzeugung von Elektroenergie möglich.

3.3 Zu einigen privaten Fusionsreaktorprojekten

Schockwellenfusion

Das Konzept der Schock- oder Stoßwellenkompression, auf Basis des MTF-Prinzips, wird vom kanadischen Unternehmen General Fusion vorangetrieben. Hochbeladene DT-Plasmaringe (Spheromaks) werden von zwei Seiten in eine Reaktionskammer eingeschossen und in dieser beim Verschmelzen einer konzentrischen, mechanischen Stoßwelle ausgesetzt, welche das Plasma bis zu Zündung komprimiert und erhitzt. Die Stoßwelle wird durch 200 mechanische Kolben erzeugt, welche gleichzeitig eine Stoßwelle in einer Kugel (Durchmesser zwei Meter) aus geschmolzenem Li-Pb-Gemisch auslöst, in deren Zentrum sich die Reaktionskammer befindet. Um höchste Kompression zu erreichen, ist extreme Präzision der digital gesteuerten Kolbenimpulse erforderlich. Das Li-Pb-Gemisch dient gleichzeitig mehreren Aufgaben: Ausbreitungsmedium für die konzentrische Stoßwelle, Neutronenmultiplikator über $Pb(n,2n)$ -Reaktionen, T-Brüten aus Lithium und Strahlenschutz.

Das Verfahren verspricht erhebliche Kostenvorteile im Vergleich zur Laserfusion, da während des Impulses keine Struktur zerstört wird. Damit scheint auch eine hohe Schussfrequenz erreichbar. Für die Implementierung sind bei General Fusion drei Phasen vorgesehen:

- (1) Bau einer kleinen Maschine, welche die Machbarkeit demonstriert; diese wurde bereits vorgestellt;
- (2) Konstruktion eines experimentellen Reaktors, der den Break-even erreichen soll;
- (3) Bau eines kostengünstigen Generators mit 100 MW elektrischer Nettoleistung, bei Kosten um 500 Millionen US \$.

Inwieweit dieses Prinzip tatsächlich großtechnisch realisiert und der angekündigte Zeitplan eingehalten werden kann, bleibt allerdings abzuwarten (vgl. Laberge 2008; Richardson et al. 2013). Der Vizepräsident von General Fusion, Michael Delage, hat den Entwicklungsstand folgendermaßen beschrieben: Die Firma hat die geforderte hohe Präzision der Server-Steuerung

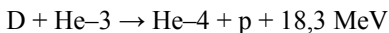
eines Kolbens demonstriert, indem eine Zeitschärfe innerhalb von 8 μs erreicht wurde. An einer anderen Anlage mit einem Kolben der erforderlichen Größe wurde die akustische Wellenausbreitung in einer Li-Pb-Schmelze untersucht. Der erste Plasmainjektor ist vor einem Jahr in Betrieb gegangen (vgl. Boyle 2016). Mehrfach wurde über erfolgreiche Akquisition von Risikokapital berichtet, beispielsweise über eine Investition in Höhe von 19,5 Millionen US \$ durch den Gründer von Amazon, Jeff Bezos.

Das angestrebte Konzept ist im Vergleich zur MCF und ICF wesentlich einfacher und kompakter. Vorteile sind insbesondere, dass weder eine riesige Vakuumanlage noch umfangreiche Kältetechnik für die Kühlung benötigt werden (außerhalb der kompakten Plasmainjektoren), Strahlenschäden an der Wand zwischen Plasmakammer und Blanket keine Rolle spielen und für Abschirmung, T-Brüten und Wärmeauskopplung standardmäßiges Know-how aus der Kerntechnik verwendet werden kann. Die Stromerzeugung soll auf herkömmlichem Weg über Dampferzeuger und -turbine erfolgen. Dennoch gibt es auch für dieses Fusionskonzept noch sehr schwierige Probleme zu lösen: stabile Formierung, Transport und Verschmelzung der Spheromaks mit ausreichend hoher Ionen-Beladung im Zentrum einer Reaktionskammer, welche als Wirbel in der schnell rotierenden Li-Pb-Schmelze gebildet werden soll, sowie die Erreichung ausreichend hoher Kompression durch höchste Präzision der Kolbenmechanik. Das sind nur die gravierenden Probleme.

Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand ist auch für diese Technologie eine zuverlässige zeitliche Prognose über deren Nutzung noch nicht möglich, allerdings könnte dieser Weg bei erfolgreicher Entwicklung zu wesentlich schnelleren und kostengünstigeren Lösungen führen als MCF und ICF.

Helion Energy

In Seattle (USA) wird seit Jahren ein durch David Kirtley initiiertes Projekt verfolgt, mit dem auf der finanziellen Grundlage von Risikokapital die neutronenfreie Reaktion



sowie die direkte Konversion der geladenen Fusionsprodukte in Elektroenergie realisiert werden soll. Dieses Verfahren wäre allerdings nicht vollständig neutronenfrei, da bei den Plasmaprozessen auch DD-Reaktionen und sekundäre Reaktionen mit den entstehenden Tritonen stattfinden können, in denen ebenfalls Neutronen produziert werden, insgesamt allerdings

bedeutend weniger als in Reaktoren auf Basis der DT-Reaktion und mit wesentlich geringerer kinetischer Energie.

Bei diesem Verfahren werden zwei Plasmabündel mit dem Ionengemisch aus D^+ und $He-3^+$ beschleunigt und zur Kollision in eine Reaktionskammer gebracht, in der mittels elektro-magnetischer Felder das Plasma weiter komprimiert und zur Zündung gebracht wird, wobei die erforderlichen Temperaturen allerdings bei weit über 100 Millionen Kelvin liegen müssen, um eine Zündung zu erreichen.

In erheblichem Umfang (über 100 Millionen US \$) wurde dafür Risikokapital eingebracht. Es existieren Versuchsanlagen (vgl. Boyle 2016). Die Demonstration soll in einigen Jahren und die Markteinführung bis 2022 erfolgen. Eine unabhängige Bewertung dieser Zeitprognose ist nicht möglich. Im Hinblick auf das Thema dieses Symposiums bleibt festzustellen, dass einerseits die Vorteile hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit dieses Verfahrens wegen der geringeren entstehenden Radioaktivität und der direkten Konversion in Elektroenergie (Vermeidung der Verluste der herkömmlichen Energietechnik über Dampferzeugung) evident sind, andererseits sich aber auch Nachteile wegen der aufwendigen Beschaffung des He-3 Brennstoffes ergeben.

Tri Alpha Energy

Ein anderes, ebenfalls revolutionierendes Konzept zur Freisetzung von Fusionsenergie wird seit 1997 in Kalifornien (USA) in der Firma Tri Alpha Energy¹⁰ durch ein Team um Norman Rostoker (vgl. Rostoker et al. 1997) verfolgt und beruht auf der neutronenfreien Reaktion



die allerdings zur Erreichung der Zündung Plasmatemperaturen um 3 Milliarden Kelvin erfordert. Hinzu kommt, dass in diesem Konzept ebenfalls eine direkte Konversion der Bewegungsenergie der entstehenden geladenen Alphateilchen in Elektroenergie vorgesehen ist, wodurch konventionelle Stromerzeugung entfallen soll (vgl. Grant 2013).

Bei diesem Verfahren sollen ebenfalls zwei Plasmabündel aus Protonen und Borionen formiert und aufeinander geschossen werden, mittels Linearbeschleuniger, d.h. mit stark erhöhter kinetischer Energie. In der Reaktionskammer werden durch komplizierte elektromagnetische Prozesse und Anla-

9 Vgl. <http://trialphaenergy.com/>.

genkomponenten Kompression, Zündung und Extraktion der erzeugten Energie erreicht. Dies ist stark vereinfacht das Konzept, welches in zahlreichen Publikationen, Patentanmeldungen und Konferenzberichten bisher bekannt wurde. Es existieren auch Versuchsanlagen, so die neuste Version „C-2U“.

Auch wenn der Weg zum angestrebten Ziel noch sehr weit und dessen Erreichbarkeit ungewiss ist, wurde bereits in erheblichen Umfang Risikokapital dafür bereitgestellt. So wurde u.a. über eine Investition in Höhe von 100 Millionen US \$ in dieses Projekt durch den Microsoft-Mitbegründer Paul Allan berichtet. Eine zeitliche Prognose über die Einführung dieser Technologie erscheint derzeit noch verfrüht. Dennoch kann darauf hingewiesen werden, dass bei einer künftigen Realisierung dieser Weg im Hinblick auf seine Nachhaltigkeit sehr beträchtliche Vorteile gegenüber allen Anlagen mit Nutzung der DT-Fusion besteht, da kerntechnische Aspekte (induzierte Radioaktivität, Strahlenschutz, radioaktive Abfallentsorgung) weitgehend entfallen würden und darüber hinaus ein vergleichsweise kostengünstiges Verfahren der Erzeugung des wertvollen He-4, quasi als Abfallprodukt der Energieerzeugung, verfügbar wäre.

4 Energiegewinnung auf Basis neuer atomarer Prozesse

Die im Abschnitt 3 dargestellten Verfahren und Anlagen basieren auf gut bekannten und vielfach untersuchten elementaren Kernreaktionsprozessen, jeweils zwischen zwei leichten Kernen. Daneben tauchen in wissenschaftlichen Medien der vergangenen Jahre immer wieder Hinweise auf neuartige Wechselwirkungsprozesse auf, die nach Aussagen der entsprechenden Autoren zur Energiefreisetzung genutzt werden könnten. Die Mechanismen solcher Prozesse sind allerdings bisher nicht oder noch nicht vollständig geklärt. Insofern gilt die wissenschaftliche Grundlage für diese Konzepte bisher als nicht validiert. Der Umfang dieses Beitrages lässt eine detailliertere Vorstellung solcher Ansätze nicht zu. Nachfolgend soll nur ein Beispiel für derartige Ansätze zeigen, dass die Energiegewinnung auf Basis atomarer und nuklearer Prozesse hinsichtlich der infrage kommenden elementaren physikalischen Prozesse kein endgültig abgeschlossenes, sondern ein sich immer noch dynamisch entwickelndes Gebiet ist.

Laserfusion von ultra-dichtem Deuterium

In einer ganzen Reihe von Publikationen der schwedischen Gruppe von Leif Holmlid wird das Konzept verfolgt, laserinduzierte Fusion zwischen Deute-

ronen an kondensiertem Wasserstoff herbeizuführen (vgl. Badiel et al. 2009, 2010a, 2010b; Holmlid 2013, 2014; Holmlid/Olafsson 2014, 2015). Mithilfe katalytischer Prozesse und bei hoher Temperatur soll angeblich ein Gasstrahl im Vakuum aus Wasserstoff/Deuterium in hoch-angeregte Rydberg-Zustände übergehen und beim Auftreffen auf gekühlte Metalloberflächen in die theoretisch vorhergesagten ultra-dichten Zustände von Protium bzw. Deuterium kondensieren (vgl. Winterberg 2010), die längere Zeit an der Metalloberfläche erhalten bleiben und dort mit Laserstrahlen zur Fusion gebracht werden können. Der kürzeste H-H-Abstand in diesem Kondensat soll angeblich nur bei 3,7 pm und der D-D-Abstand bei 2,3 pm liegen. Bei dieser extrem hohen Dichte reichen um mehrere Größenordnungen geringere Laserenergien, im Vergleich zur herkömmlichen Laserfusion, für die Zündung. Die Bestätigung durch unabhängige Experimente und damit die wissenschaftliche Validierung stehen allerdings noch aus. Würde dieser Ansatz sich bestätigen, bedeutete dies auch hinsichtlich der Nachhaltigkeit der atomaren Energiegewinnung eine neue Qualität mit entsprechend großer Perspektive.

5 Schlussfolgerungen

Eine Bewertung der künftigen Energieerzeugung auf atomarer und nuklearer Basis aus der Sicht ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit – damit ihrer langfristigen Perspektiven – ist außerordentlich komplex und derzeit noch nicht abschließend möglich.

Technologisch weitgehend ausgereift ist die Kernspaltungstechnologie auf Basis thermischer Reaktoren, die schon bisher einen erheblichen Beitrag zur Vermeidung von Kohlendioxid-Freisetzung bei der Erzeugung von Elektroenergie liefert. Andererseits fällt die ökologische und soziale Bewertung ihrer Nachhaltigkeit – wegen der Entstehung langlebiger Radionuklide, Freisetzung von Nachwärme, Restrisiko von Havarien u.a. Gründen – eher negativ aus. Dies erschwert und verzögert auch die Weiterentwicklung und Einführung neuer, verbesserter Reaktorkonzepte. Ungeachtet der zahlreichen gegenwärtig weltweit geplanten oder im Bau befindlichen neuen Reaktorprojekte kann voraussichtlich der gegenwärtige Anteil der Kernenergie auf Basis von Kernspaltung an der weltweiten Produktion von Elektroenergie künftig kaum gehalten werden. Vor allem aus Gründen der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit ist daher die langfristige Rolle der Kernspaltungstechnik – obgleich in ihrem technologischen Entwicklungspotenzial längst noch nicht ausgeschöpft – vermutlich eher als Brückentechnologie für die kommenden Jahrzehnte zu sehen.

Seit Jahrzehnten wird an der Alternative Kernfusion geforscht und entwickelt, mit der wesentliche Nachteile der Kernspaltungstechnik vermieden oder zumindest stark reduziert werden könnten. Dabei steht bisher die DT-Fusion in Anlagen mit Magnet- oder Trägheitshalterung des Plasmas im Mittelpunkt, an deren führenden, staatlich finanzierten Projekten in den vergangenen Jahren beträchtliche Fortschritte erzielt wurden, ohne allerdings bisher die Freisetzung von Nettoenergie erreichen zu können. Gelingt dieser Schritt, wird die Bewertung der Nachhaltigkeit aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Sicht in den Mittelpunkt des Interesses der Gesellschaft treten. Die bisherige Zeitplanung lässt nicht erwarten, dass noch in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts Elektroenergie auf kommerzieller Basis auf dieser Grundlage erfolgen kann. Spürbare Beiträge zur Reduzierung der CO₂-Emissionen können anhand des derzeitigen Entwicklungsstandes und begründeter Prognosen folglich erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts erwartet werden. Entscheidungen darüber, ob an diesen Konzepten im Interesse der langfristigen Energieversorgung weiter entwickelt wird, werden allerdings wahrscheinlich bereits wesentlich früher fallen, abhängig von den in den nächsten fünf bis zehn Jahren erreichten Fortschritten an diesen Anlagen einerseits und den im gleichen Zeitraum erreichten Fortschritten bei der Bewältigung von Problemen der erneuerbaren Energien (einige Stichworte: leistungsfähige Energiespeicher, ökonomischer Energietransport über große Entfernungen, Steuerung komplexer Systeme mit dezentraler Energieerzeugung). Beide Richtungen der künftigen Erzeugung von Elektroenergie werden sich mit dem zunehmenden Druck ihrer Bewertung aus der Sicht aller Dimensionen der Nachhaltigkeit auseinandersetzen müssen, wobei ein Vergleich nicht durchgängig zu Ungunsten der Fusion ausfallen dürfte.

Parallel gibt es eine wachsende Zahl von privat finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprojekten, in denen modifizierte Wirkmechanismen und teilweise andere (neutronenfreie) Reaktionstypen zum Einsatz gebracht werden. Kommen diese Richtungen zum Tragen, so könnten Fusionsreaktoren eine wesentlich günstigere Bewertung ihrer Nachhaltigkeit erreichen. Zuverlässige Prognosen sind jedoch schwierig, da eine unabhängige, realistische Einschätzung des erreichten Entwicklungsstandes kaum möglich erscheint.

Wiederholt wurden in der Fachwelt neue Ideen, Konzepte, Theorien und Experimente vorgestellt, welche neue Wege aufzeigen, auf denen es gelingen soll, aus Wasserstoff Energiemengen durch atomare und nukleare Prozesse freizusetzen, die weit über das Maß chemischer Umwandlungen hinaus gehen. Es wird weltweit über zahlreiche Firmengründungen auf Basis solcher Konzepte mit Hilfe von Risikokapital berichtet. Ein Beispiel dieser Art wurde

kurz vorgestellt: Untersuchungen zur Laserfusion von ultra-dichtem Deuterium einer schwedischen Forschergruppe. Diese Versuche unterliegen derzeit dem Prozess der Klärung ihres Mechanismus, der gesicherten Reproduzierbarkeit, Verifizierung und unabhängigen Bestätigung durch die Fachwelt. Endgültige Schlussfolgerungen sind daher verfrüht.

Auch wenn die eingangs gestellte Frage heute nicht abschließend beantwortet werden kann, bleibt die Vision erhalten: Die gewaltigen Vorteile einer durch Menschen steuerbaren, praktisch unerschöpflichen Energiequelle auf Basis von Wasserstoff, welche allen Kriterien der Nachhaltigkeit genügt, rechtfertigen den immensen Aufwand für deren Erforschung und technologische Entwicklung, selbst wenn diese erst für künftige Generationen verfügbar sein würde. Es bleibt viel in Bewegung auf diesem Gebiet im Spannungsfeld zwischen technischer Entwicklung und der Bewertung ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit, so dass auch schnellere Ergebnisse bei der praktischen Implementierung nicht auszuschließen sind.

Literatur

- Badiel, S.; Andersson, P. U.; Holmlid, L. (2009): Fusion Reactions in High-density Hydrogen. A Fastroute to Small-scale Fusion? In: *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 34, pp. 487–495
- Badiel, S.; Andersson, P. U.; Holmlid, L. (2010a): Laser-driven Nuclear Fusion D+D in Ultra-dense Deuterium. MeV Particles Formed without Ignition. In: *Laser and Particle Beams*, Vol. 28, pp. 313–317
- Badiel, S.; Andersson, P. U.; Holmlid, L. (2010b): Production of Ultra-dense Deuterium, a Compact Future Fusion Fue. In: *Applied Physics Letters*, Vol. 96, pp. 124103
- Boyle, A. (2016): Nuclear Fusion Gets Boost from Private-sector Start-ups. In: *Science News*, Vol. 189, No. 3, p. 18
- Grant, A. (2013): Proton-boron Nuclear Fusion Returns to Spotlight. In: *Science News*, Vol. 184, No. 2, p. 8
- HELM (2006): Helmholtz-Gemeinschaft „Kernfusion“. Hg. v. Forschungszentrum Jülich, Forschungszentrum Karlsruhe, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Berlin (Helmholtz-Gemeinschaft)/München (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik)
- Holmlid, L. (2013): Excitation Levels in Ultra-dense Hydrogen p(-1) and d(-1) Clusters. Structure of Spin-based Rydberg Matter. In: *International Journal of Mass Spectrometry*, Vol. 352, pp. 01–08
- Holmlid, L.; Olafsson, S. (2015): Spontaneous Ejection of High-energy Particles from Ultra-dense Deuterium D(0). In: *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, Issue 33, pp. 10559–10567

- Holmlid, L.; Olafsson, F. (2014): Heat Generation above Break-even from Laser-induced Fusion in Ultra-dense Deuterium. Intense Ionizing Radiation from Laser-induced Processes in Ultra-dense Deuterium D(-1). In: *International Journal of Modern Physics, E – Nuclear Physics*, Vol. 23, Issue 9, p. 1450050
- Holmlid, L. (2014): Ultra-Dense Hydrogen H(-1) as the Cause of Instabilities in Laser Compression-Based Nuclear Fusion. In: *Journal of Fusion Energy*, Vol. 33, Issue 4, pp. 348–350
- IAEA (2016): *Power Reactor Information System. Nuclear Power Reactors in the World Vienna (IAEA) (Reference Data Series 2, 2015 Edition)*. – URL: <http://www.iaea.org/pris>
- Klinger, Th.; Kemnitz, B. (2015): Fusion von Wasserstoff – Sonnenenergie der Zukunft oder ewiger Traum? In: *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Jg. 68, H. 10, S. 503–508
- Laberge, M. (2008): An Acoustically Driven Magnetized Target Fusion Reactor. In: *Journal of Fusion Energy*, Vol. 27, June, p. 65
- LLNL – Lawrence Livermore National Laboratory (2012): NIC Team Fires First 500-Terawatt Shot on NIF. – URL: http://lasers.llnl.gov/newsroom/project_status/index.php
- Nuckolls, J.; Wood, L.; Thiessen A.; Zimmermann, G. (1972): Laser Compression of Matter to Superhigh Densities. *Thermonuclear Applications*. In: *Nature*, Vol. 239, pp. 139–142
- Richardson, D.; Froese, A.; Suponitsky, V.; Reynolds, M.; Plant, D. (2013): Progress Towards Acoustic Magnetized Target Fusion: An Update on the R&D Program at General Fusion. In: *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society, Toronto, Ontario, June 9–12. Toronto*
- Rostoker, N.; Binderbauer, M. W.; Monkhorst, H. J. (1997): Colliding Beam Fusion Reactor. In: *Science; American Association for the Advancement of Science*, Vol. 278, Issue 5342, pp. 1419–1422
- Seeliger, D. (2014): Kann Kernfusion die Bedarfslücke bei Elektroenergie im 21. Jahrhundert umweltverträglich schließen? In: Banse, G.; Fleischer, L.-G. (Hg.): *Energiewende – Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag*. Berlin, S. 147–164 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 31)
- Siemon, R. E.; Lindemuth, I. R.; Schoenberg, K. F. (1997): Why Magnetized Target Fusion Offers a Low-Cost Development Path for Fusion Energy. – URL: http://fusionenergy.llnl.gov/Documents/MTF/Why_MTF/Why-MTF-comments.html
- Slough, J. (2015): Inductively Driven 3D Liner Compression of a Magnetized Plasma to Megabar Energy Densities. Technical Report. Washington, D.C., February 1 (U.S. Department of Energy, Office of Science)
- Sonnabend, K. (2016a): Von der Vision zur Fusion. In: *Physik Journal*, Jg. 15, März, S. 25–29
- Sonnabend, K. (2016b): Mit Kohlenstoff zu optimierten Plasmen. In: *Physik Journal*, Jg. 15, August/September, S. 11
- WEND (2016): *Wendelstein 7-X Newsletter*, Nr. 12, April
- Winterberg, F. (2010): Ultra-dense Deuterium and Cold Fusion. *Physics Letters, A*, Vol. 374, Issue 27, pp. 2766–2771