

Dieter Seeliger

## **Mit Kreativität auf dem Weg zu einer neuen Wärmequelle**

### **1 Einleitung**

Im Mittelpunkt dieses Symposiums stehen der Weg von der Idee zur neuen anwendungsbereiten Technologie, die dafür erforderlichen Kreativitätstechniken und weitere Voraussetzungen. Dieser Weg ist weder geradlinig noch widerspruchsfrei, insbesondere wenn dabei Grenzbereiche bekannter Naturgesetze tangiert und völlig neuartige Methoden entwickelt und angewandt werden. Von den Wissenschaftlern und Ingenieuren, die diesen Weg zu qualitativ neuen Technologien beschreiten, sind in außerordentlich hohem Maße Leistungen in praktisch allen Aspekten des erfinderischen Handelns gefordert:

- Methodisch strenges, nachvollziehbares und reproduzierbares Agieren, um eine zwingend zu akzeptierende experimentelle Daten- und Erkenntnisbasis zu schaffen;
- heuristische Vorgehensweise, um Grenzgebiete oder alternative Verfahren, Methoden oder Materialien zur optimalen technologischen Beherrschung und Nutzung der Prozesse auszuloten;
- vor allem aber sind Kreativität und naturwissenschaftlich basierte Intuition unabdingbar, um Neuland bei den Erkenntnissen über Wirken und mögliche Nutzung naturwissenschaftlicher Gesetze zu gewinnen.

Auf der 5. Jahrestagung der Leibniz-Sozietät zum Thema „Energiewende“ und auf dem VII. Symposium des Arbeitskreises Allgemeine Technologie wurde die potenzielle Bedeutung der Kernfusion für die zukünftige Energiegewinnung hervorgehoben (vgl. Seeliger 2014, 2017). Die dabei behandelten Vorhaben zeigten die ganze Komplexität und Widersprüchlichkeit der Entwicklung von der Idee der kontrollierten Kernfusion bis zur anwendungsbereiten Technologie und sollen deshalb anhand des aktuellen Standes 2018 hier erneut aufgegriffen und unter dem Blickwinkel der Thematik dieses Symposiums, der Kreativität, beleuchtet werden. Zielstellung für die Bewertung sollen dabei die Anforderungen sein, welche an eine „ideale neue Wärmequelle“ zu stellen sind. Das betrifft auch die auf der Nutzung nuklearer

und atomarer Prozesse beruhenden Entwicklungen. Auch wenn alle Idealziele gleichzeitig heute kaum erreichbar scheinen, müssen sie doch Maßstab für die Bewertung laufender Entwicklungen und ihrer langfristigen Perspektive für die menschliche Gesellschaft sein:

- *Nachhaltigkeit*: Einsatz für alle Staaten und Weltregionen unbegrenzt verfügbarer Rohstoffe und deren Nutzung ohne bleibende Schäden für nachfolgende Generationen;
- *Umweltverträglichkeit*: Vermeidung von schädlichen Eingriffen in die Natur, schädigenden Einwirkungen auf Lebewesen und auf das Klima;
- *Verfügbarkeit*: Fähigkeit zur quantitativen und zeitlichen Anpassung an den Bedarf;
- *Wettbewerbsfähigkeit*: Konkurrenzfähigkeit im Vergleich zu den Kosten für alternative Energiequellen, hinsichtlich des Aufwandes für Entwicklung, Errichtung, Betrieb und Entsorgung;
- *Gesellschaftliche Akzeptanz*: Breite Zustimmung für die neuen Technologien in einer sich pluralistisch entwickelnden Gesellschaft mit zunehmender Aktivität von Bürgerbewegungen, sozialen Medien und steigendem Einfluss der Medien.

Dieses Thema unter dem Blickwinkel Kreativität zu beleuchten bedeutet auch, die Entwicklung unter dem Aspekt des Wirkens der vier Grundelemente von Kreativität (vgl. Rohdes 1961) zu analysieren, deren förderliche Faktoren interagierend den kreativen Prozess bewirken:

- *kreative Person*,
- *kreativer Prozess*,
- *kreatives Produkt* und
- *kreatives Umfeld*.

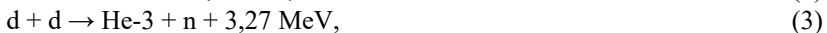
## 2 Kreativitäts-Herausforderung gesteuerte Kernfusion – eine kurze Reminiszenz

Die technische Beherrschung der gesteuerten Kernfusion ist ein einzigartiges Beispiel dafür, wie mühevoll und langwierig der Weg von der richtigen Idee bis zur anwendungsbereiten, praktisch genutzten Technologie sein kann. Bereits seit den Pionierarbeiten von *Hans Bethe* war bekannt, dass die Energiefreisetzung in der Sonne aus der Verschmelzung von Wasserstoff mit dem exotischen, schwachen Wechselwirkungsprozess



beginnt, der selbst unter den Bedingungen von extrem hohem Druck und Temperatur im Inneren der Sonne nur mit einer Halbwertszeit von etwa  $10^{10}$  Jahren abläuft und damit sehr lange Zeit für eine langsame, fast konstante Energieabgabe der Sonne sorgt. Die aus der Reaktion (1) gebildeten Deuteronen  $d$  lösen demgegenüber sehr schnell eine Kette weiterer Prozesse aus, bei denen jeweils summarisch aus vier Protonen  $p$  ein Heliumkern  $\alpha$  sowie Neutrinos  $\nu$  und 26,7 MeV Energie freigesetzt werden, eine Prozesskette, die als Wasserstoffzyklus bezeichnet wird. Seit den 1940er Jahren sind Kernreaktionen mit Deuteronen bekannt und an Teilchenbeschleunigern weitgehend experimentell untersucht. Außerdem war längst bekannt, dass Deuterium als ein stabiles Isotop von Wasserstoff mit einem Anteil von 0,015% im Wasser der Weltmeere praktisch unbegrenzt verfügbar ist. So lag die Idee nahe, die exothermen Prozesse der Sonne, beginnend mit den Deuteronen  $d$ , auf der Erde in technischen Anlagen mit dem Ziel der Energiegewinnung nachzuvollziehen. Diese Idee erschien umso naheliegender, als es bereits zu Beginn der 1950er Jahre gelungen war, diese Prozesse für militärische Zwecke explosionsartig in der H-Bombe auszulösen. Das Ziel der friedlichen Nutzung der Kernfusion erschien umso attraktiver, da es die Perspektive in Aussicht stellte, nukleare Energie auf praktisch unerschöpflicher Rohstoffbasis, frei von hochradioaktiven Spaltprodukten und langlebigen Transuranisotopen unbegrenzt zu gewinnen.

Aus einer ganzen Reihe von physikalisch möglichen exothermen Reaktionen zwischen den Kernteilchen der Isotope von Wasserstoff – Protonen  $p$ , Deuteronen  $d$  und Tritonen  $t$  – und leichten Kernen kamen folgende Prozesse in Betracht für die praktische Umsetzung in technischen Anlagen zur Energiegewinnung:



bei der Reaktion (2) ergänzt durch den „Brutprozess“ zur Erzeugung von Tritonen  $t$  aus Lithium



Schnell wurde klar, dass nur in einem sehr heißen Plasma, bei ausreichend hoher Temperatur  $T$ , Teilchendichte  $n$  und Lebensdauer  $\tau$ , die Zündung des Fusionsprozesses erfolgt, bei dem die aus den mikroskopischen Reaktionen

(2) bis (6) freigesetzte Energie zu einem selbsterhaltenden exothermen Prozess führen kann, quantitativ ausgedrückt durch die – oft als Lawson-Kriterium bezeichnete – Forderung

$$T n \tau > 10^{21} \text{ [keV s m}^{-3}\text{]} \quad (8)$$

mit den Dimensionen  $T$  [keV],  $n$  [ $\text{m}^{-3}$ ] und  $\tau$  [s]. Ebenso bald war bekannt, dass die Reaktionsraten der DT-Reaktion (2) um mehr als zwei Größenordnungen über denen der Prozesse (3) bis (6) liegen und somit die Nutzung der DT-Reaktion, kombiniert mit der Brutreaktion (7), der bevorzugt zu beschreitende Weg zum Ziel der gesteuerten Kernfusion sein muss. Während das Erreichen einer Plasmatemperatur von 10 keV, das entspricht 100 Mio. Kelvin, für die Zündung des DT-Plasmas unabdingbar ist, bietet das Produkt  $n\tau$  von Dichte und Lebensdauer einen Spielraum für Variationen bei der Konzipierung von Fusionsanlagen, von dünnen Plasmen mit langanhaltendem Einschluss in einem Magnetfeld mit typischen Zielwerten von  $n < 10^{20} \text{ m}^{-3}$  und  $\tau > 3 \text{ s}$  – genannt Magneteinschluss – bis zur kurzzeitigen Erzeugung eines hochdichten DT-Bündels mit typischen Zielwerten von  $n > 10^{30} \text{ m}^{-3}$  und  $\tau < 10^{-10} \text{ s}$  – genannt Trägheitseinschluss, sowie verschiedenen Zwischenstufen zwischen diesen beiden extremen Konzepten. Daraus folgte, dass Diversifikationen von technischen Konzepten zur Erreichung des Zieles möglich sind, und dies führte von Beginn an bei der Fusionsforschung zu vielen sehr verschiedenen und führt bis heute zur Entstehung weiterer, neuer technischer Lösungskonzepte. Bereits in den 1950er Jahren waren damit nicht nur das Ziel sondern auch die bis heute verfolgten Wege zur Erreichung des Zieles im Wesentlichen abgesteckt. Danach ging es vermeintlich „nur noch“ darum, diesen Prozess zu bändigen, technologisch beherrschbar und als Energiequelle nutzbar zu machen. Dies erwies sich jedoch als außerordentlich schwieriger als in den Anfangsjahren vermutet, so dass das Ziel bis heute nicht erreicht ist.

An der Kreativität des angestrebten Produktes bestand damals und besteht bis heute kein Zweifel: Es geht um die Erschließung einer nachhaltigen Energiequelle für künftige Generationen. Der Autor erinnert sich an Vorlesungen bei *Lev Andreevich Artsimovich* in den 1960er Jahren, in denen er verkündete:

„Es kann kein Zweifel daran bestehen, dass unsere Nachkommen lernen werden, die Fusionsenergie für friedliche Zwecke zu nutzen, noch bevor dies notwendig wird, um die menschliche Zivilisation zu bewahren.“<sup>1</sup>

---

1 Übersetzung aus dem Russischen durch den Autor.

Diese Vision weckte seinerzeit positive Emotionen bei den angehenden Physikern meiner Generation, festigte die Überzeugung von der Fähigkeit der Wissenschaft zur Lösung der künftigen Menschheitsprobleme und sie entfaltet seither über viele Jahrzehnte eine immer noch andauernde Attraktivität für Generationen von heranwachsenden Physikern und Ingenieuren. Getragen von der Attraktivität des Zieles, den Ideen zahlreicher kreativer Forscherpersönlichkeiten und großzügiger Finanzierung wurden in den folgenden Jahren weltweit diverse technische Konzepte verfolgt, um sich den Bedingungen für einen selbsterhaltenden Fusionsprozess gemäß Gleichung (8) anzunähern oder diese zu erreichen. Eine von der Internationalen Atombehörde IAEA in Wien im Jahr 1970 herausgegebene Übersicht (vgl. IAEA 1970) gibt Informationen über 187 weltweit in Entwicklung oder Betrieb befindliche Plasmaexperimente zur gesteuerten Kernfusion, darunter 65 Anlagen mit geschlossener und 52 Anlagen mit offener Plasmakonfiguration. Unter den Anlagen mit geschlossener Plasmakonfiguration befanden sich damals 15 Anlagen vom Typ Stellerator, darunter die Anlage Wendelstein IIA in Garching, sowie neun Anlagen vom Typ Tokamak, darunter die Anlagen T1, T3 und T5 im Kurchatov-Institut Moskau.

Die beginnenden Entwicklungen erwiesen sich auf allen eingeschlagenen technischen Pfaden allerdings als äußerst steinig, voll von verborgenen Klippen, die teilweise erst im Laufe der Entwicklung sichtbar wurden, gespickt mit technischen Anforderungen, die so vorher noch nie zu bewältigen waren. Worin bestanden und bestehen einige der zu lösenden Schwierigkeiten und Probleme:

- Vielfältige Formen von Plasmainstabilitäten, die zu Stromabbrüchen beim Magneteinschluss oder zur Begrenzung der erreichbaren Kompressionsgrade beim Trägheitseinschluss führen, begrenzen die praktisch erreichbaren Plasmaparameter.
- Verunreinigungen des Plasmas mit Ionen schwerer Elemente infolge der Wechselwirkung zwischen Plasma und Gefäßwand entziehen dem Plasma Energie und begrenzen die erreichbaren Temperaturen.
- Bei der favorisierten DT-Reaktion (2) entfallen etwa 3/4 der freigesetzten Energie auf kinetische Energie der Neutronen, die das Plasma ungebremst verlassen. Lediglich die entstehenden  $\alpha$ -Teilchen geben ihre Energie teilweise in der Nähe ihres Entstehungsortes wieder an das Plasma ab und tragen so zu dessen hoher Temperatur bei. Um sich den erforderlichen Temperaturen von  $T > 10$  keV, also  $T > 100$  Mio. K, anzunähern, mussten aufwendige Verfahren der Plasmaheizung entwickelt und in Experimenten getestet werden: Strom-, Neutralteilchen-, Hochfrequenz-

heizung, Nutzung der Ionenzyklotron-Resonanzheizung, Elektronen-Zyklotron-Resonanzheizung und weitere. So konnte die Plasmatemperatur schrittweise dem geforderten Wert angenähert werden.

- Die Reaktormaterialien, insbesondere der für die das Plasma begrenzende Wand, sind enormen Temperaturen und Strahlungsbelastungen aus dem brennenden Plasma ausgesetzt. Spezielle Programme der Materialentwicklung waren deshalb erforderlich.
- Notwendige Magnetfeldstärken für den Einschluss der hochenergetischen Plasmas können nur mit Hilfe von Supraleitern erzeugt werden, die erst mehrere Jahrzehnte nach Beginn der Entwicklung in der erforderlichen Größe – getragen von den Forderungen der Fusion – technisch verfügbar wurden.
- Kontrolle und Steuerung der komplexen Fusionsreaktorprozesse sowie die Handhabung von Aufbau, Betrieb und Instandhaltung erforderten neuartige Lösungen hinsichtlich der Diagnostik, Plasmaanalytik, Digitalisierung und Automatisierung, die wesentlich umfangreicher als in einem herkömmlichen Kraftwerk auf der Basis von Kernspaltung sind.

Diese Liste ist noch längst nicht vollständig, ständig entstanden und entstehen weiterhin neue Anforderungen, die neuartige, kreative Lösungen erfordern und diese hervorbringen.

Wahre Pionierarbeit bei der Lösung dieser Problemen wurde geleistet, und dennoch konnte das Ziel im dem folgenden Jahrzehnt nicht erreicht werden, so begann *Cornelis M. Braams* die Zusammenfassung der Ergebnisse auf dem Gebiet der Fusionsexperimente mit Magneteinschluss auf der Konferenz über Forschungen zur Plasmaphysik und Gesteuerten Kernfusion in Innsbruck 1978 mit einem Zitat von *Artsimovich* aus dem Jahr 1961:

„Es ist jetzt klar, dass alle unseren ursprünglichen Hoffnungen, die Tore in die geforderte Region ultra-hoher Temperaturen würden sich beim ersten kräftigen Druck durch die kreative Energie der Physiker leicht öffnen lassen, sich als unbegründet erwiesen haben, so wie die Hoffnungen eines Sünders, in das Paradies zu gelangen, ohne die Folterhölle passieren zu müssen.“<sup>2</sup> (Braams 1979, p. 447)

*Braams* beendete seine Übersicht, wieder bezugnehmend auf das Zitat aus dem Jahr 1961, mit den Sätzen:

„Siebzehn Jahre sind keine lange Zeit im Maßstab des Universums. Wir werden noch eine Weile in der Folterhölle zubringen müssen, bevor wir sagen können – so wie Dante am Ende seiner Reise durch diese: ‚Gereinigt und bereit zum Auf-

---

2 Übersetzung aus dem Englischen durch den Autor.

stieg zu den Sternen<sup>4</sup>. Aber, vielleicht werden ja auch wir zu den Sternen aufsteigen.“<sup>3</sup> (Braams 1979, p. 457)

Ein Beispiel, welche richtungweisende Rolle einzelne kreative Forscherpersönlichkeiten in jenen frühen Phase bei der Entwicklung der kontrollierten Kernfusion spielten, geht aus der Würdigung von *Artsimovich* auf der Konferenz in Innsbruck 1978 durch den damaligen Direktor des Office of Fusion Energy im Department of Energy der USA, *Edvin E. Kintner*, hervor (vgl. Kintner 1979). Danach waren es Vorlesungen von *Artsimovich* am MIT 1969, welche den Pionierarbeiten an den Tokamak-Anlagen des Kurchatov-Instituts in der westlichen wissenschaftlichen Welt Anerkennung brachten und die letztlich zur Verlagerung des Schwerpunktes der internationalen Entwicklungen auf dem Gebiet, inklusive der Fusionsforschung in den USA, in Richtung dieses Anlagentyps lenkten. Dadurch wurden nachfolgend schnelle Fortschritte auch an den Tokamak-Anlagen ST in Princeton und ORMAK in Oak Ridge erzielt. In seiner Vorlesung kommt *Kintner* zu der Einschätzung:

„Der schnelle Fortschritt der letzten Dekade setzt sich fort. In jüngsten Experimenten hat Princeton wesentlich höhere Temperaturen erreicht, als jemals zuvor, früher und in einer stärkeren Form als erwartet. Diese Ergebnisse liefern erhöhte Zuversicht, dass die wissenschaftliche Machbarkeit der Fusion in dem Tokamak Fusion Test Reactor<sup>4</sup> vollständig demonstriert wird. Sie haben uns wesentliche wissenschaftliche Information darüber geliefert, dass unsere Vorstellungen über die Fusion mit Magneteinschluss richtig sind. [...] Ich bin mir sicher, dass das Mitglied der Akademie *Artsimovich* höchst erfreut wäre über die Bestätigung der Validität seiner Arbeit.“

Noch einen Aspekt des Wirkens von *Artsimovich* würdigte *Kintner* in seinem Vortrag:

„Ein weiteres Ergebnis des wesentlichen Einflusses von Professor *Artsimovich* sind die unikalen internationalen Beziehungen, welche die Fusion charakterisieren. *Artsimovichs* persönliche Führung war von grundlegender Bedeutung für die Herausbildung einer internationalen wissenschaftlichen Kooperation. Er glaubte an die Wissenschaft als Ganzes, dass insbesondere auf dem Gebiet der Fusion, eine weltweite Kollaboration wichtig ist für den Fortschritt.“<sup>5</sup> (Kintner 1979, p. 5)

---

3 Übersetzung aus dem Englischen durch den Autor.

4 Abgekürzt TFTR, die seinerzeit geplante größere Variante eines Tokamak-Reaktors.

5 Übersetzung aus dem Englischen durch den Autor.

In der Tat hatte sich bereits in jener Zeit des Kalten Krieges auf dem Gebiet der Fusionsforschung eine weltweite internationale Kooperation entwickelt, getragen von Wissenschaftlern und Instituten aus den Ländern mit Fusionsprogrammen, die singular für die damalige Zeit war, aber eine große Perspektiven für die Zukunft schuf. Bereits im darauf folgenden Jahr 1979 begann die Arbeit an einem gemeinsamen, internationalen Fusionsreaktorprojekt, genannt International Tokamak Reactor (INTOR), getragen von Euratom, Japan, USA, UdSSR und der IAEA (vgl. IAEA 1980). Die Fusionsforschung war selbst zum Gegenstand der internationalen Politik geworden, einer Politik, die basierend auf den Beschlüssen der Konferenz von Helsinki 1976 auf Kooperation, Interessenausgleich, den Abbau von Spannungen und technischen Fortschritt für die Menschheit setzte und das in einer Zeit, als Mittelstreckenraketen die Existenz ganz Europas bedrohten! Dies kennzeichnete die enorme Kraft und Breitenwirkung, welche eine kreative Idee entfalten kann.

Inzwischen lief auch die Entwicklung nationaler Tokamak-Projekte intensiv weiter, so dass in der zweiten Hälfte der 1980er Jahre an der Anlagen TFTR in den USA, JET in der EU, JT-60 in Japan und T-15 in der UdSSR Plasmamaparameter erreicht werden konnten, die bereits dicht an der Grenze des nach Gleichung (8) geforderten Bereichs lagen – wie in Abbildung 1 aus einem Lehrbuch der damaligen Zeit gezeigt. Seit der Inbetriebnahme des Tokamak T-1 im Jahr 1958 bis etwa 1980 war in den nachfolgenden Tokamak-Anlagen eine Steigerung des Produktes  $n\tau$ , der Plasmadichte  $n$  mal Einschlusszeit  $\tau$ , von vier Größenordnungen und eine Steigerung der Plasmatemperatur  $T$  um drei Größenordnungen erreicht worden – ein gewaltiger Fortschritt, der berechtigte Hoffnung machte, im nächsten Schritt die Zielparameter der Zündung erreichen zu können.

An der europäischen Tokamak-Anlage Joint European Torus (JET) konnte im Jahr 1997 der Breakeven – Gleichstand von erzeugter und aufgewandter Energie – fast erreicht werden, etwa 65% der zur Erzeugung des Plasmas aufgewendeten Energie konnten durch Fusion zurückgewonnen und 16 MW Fusionsleistung erzeugt werden, mit einer Einschlusszeit von 3 s. Die Zündung einer selbsterhaltenden Reaktion war allerdings auch mit dieser Maschine noch nicht erreicht worden. Auch Entwicklungen an alternativen Reaktorkonzepten liefen im gesamten Zeitraum weiter, mit vergleichsweise etwas geringerer Intensität, als in den Anfangsjahren.

Es dauerte nochmals eine Dekade, bis sich für das Vorhaben des Internationalen Reaktors INTOR eine Chance der Realisierung öffnete, mit dem



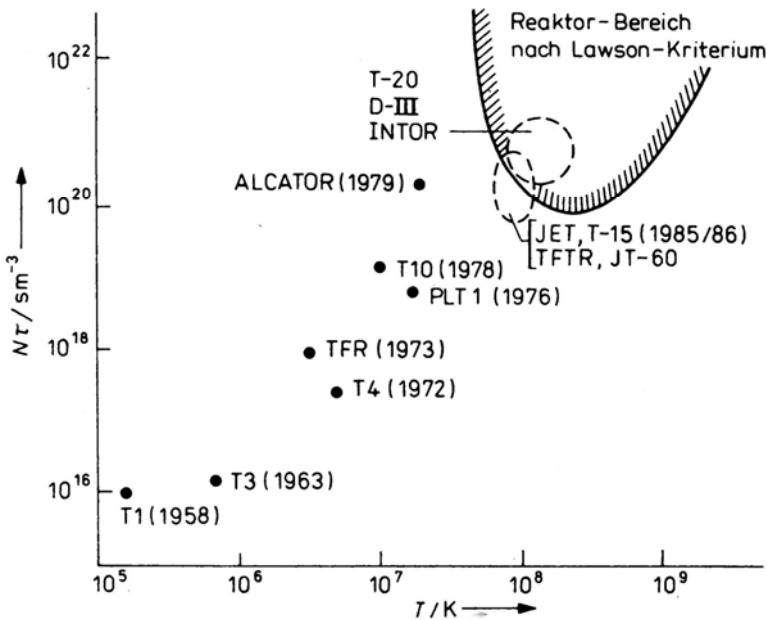


Abbildung 1: Entwicklung der weltweit in Tokamak-Anlagen erreichten Plasmamparameter Dichte  $N$  mal Einschlusszeit  $\tau$  und Temperatur  $T$  von der ersten Anlage T-1 im Jahr 1958 bis zu den Ende der 1980er Jahre bestehenden und geplanten Anlagen

Quelle: Musiol et al. 1988, S. 718

die Machbarkeit der Fusion demonstriert werden sollte, mit einem zehnfachen Energiegewinn: In den Verhandlungen zwischen *Michael Gorbatschow* und *Ronald Reagan* in Reykjavik, die das Ende des Kalten Krieges einläuteten, erhielt das Projekt eines gemeinsamen, internationalen Fusionsreaktors die höchste politische Unterstützung, als ein Pilotprojekt, welches die engere Zusammenarbeit nach dem Wegfall der Ost-West-Konfrontation demonstrieren und voranbringen sollte. Es erhielt die Bezeichnung International Tokamak Experimental Reactor (ITER), sein Baubeginn erfolgte im Jahr 2006 in der Nähe von Cadarache in Frankreich. Es ist heute zu einem der größten Projekte der internationalen Kooperation geworden, getragen von den ITER-Mitgliedsländern EU, USA, Russland, China, Japan, Indien und Südkorea.

### 3 Jüngste Fortschritte der Fusionstechnologie

#### 3.1 *Magneteinschluss des Plasmas*

##### ITER auf TOKAMAK-Basis

Ein Ziel des Fusionsexperimentes ITER ist der Nachweis, dass auf dem Weg der Kernfusion mehr Energie aus dem Plasma freigesetzt werden kann, als für die Plasmaheizung injiziert werden muss: Mit 50 MW Heizleistung sollen mindestens 500 MW Fusionsleistung in einem DT-Plasma erreicht werden – d.h. ein  $\text{COP} \geq 10$ . Damit sollen die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen für die Planung eines Demonstrationskraftwerkes auf der Basis von Kernfusion geschaffen werden. In dieser Phase der Fusionsforschung wird die kreative Rolle einzelner Forscherpersönlichkeiten vor allem bei der Organisation des großen, internationalen ITER-Teams deutlich. Weltweite Kooperationen mit Einbeziehung der Industrie in die Forschungs- und Entwicklungsarbeit an den zahlreichen Komponenten, der Digitalisierung von Planung und Steuerung eines gewaltigen Aufbauprozesses, an der Entwicklung neuer Materialien, die Beherrschung höchst komplexer Systeme mit neuen Dimensionen – größte supraleitende Kryoanlage, größte Vakuumanlage, höchste Plasmatemperaturen etc. –, das sind die Kreativitätscharakteristika dieses Prozesses.

Seit 2014 läuft der Aufbau der Anlage sehr zügig, so dass der Betonbau des Gehäuses für die Aufnahme des ITER weitgehend fertiggestellt und ab Oktober 2018 mit der Montage von Komponenten begonnen werden konnte. In den kommenden sieben Jahren, bis 2025, soll der Plasmabetrieb mit Wasserstoff und Helium begonnen werden. Vom ersten Plasma bis zur Erreichung des oben genannten Zieles  $\text{COP} \geq 10$  mit DT-Plasma ist ein langer Weg, der im ITER Research Plan (vgl. ITER 2018) näher beschrieben wird: Nach dem Zünden des ersten Plasmas sollen sich Experimente mit weiteren Upgrades der Anlage abwechseln, um deren volle Leistungsfähigkeit im Laufe von weiteren 15 Jahren zu erreichen. Insbesondere sind die beiden Phasen Pre-Fusion Plasma Operation und Fusion Power Operation vorgesehen. In der ersten, etwa zehnjährigen Phase vor dem eigentlichen Fusionsbetrieb sollen Kontroll- und Notfallsysteme und die Systeme zur Heizung sowie zur Diagnostik und Überwachung der Plasmaeigenschaften vervollständigt und erprobt sowie Magnetfelder bis zum Zielwert von 5,3 Tesla erzeugt werden. Der nachfolgende Fusionsbetrieb wird zunächst mit Deuterium-Plasma begonnen, bei dem nur vergleichsweise wenige Neutronen der DD-Reaktion (3) erwartet werden. Erst danach wird die optimale Beimi-

schung von Tritium zum Deuterium getestet, die für den späteren Betrieb eines Demonstrationskraftwerkes notwendig ist. Zu Beginn der 2040er Jahre soll das Fusionsexperiment stabil in zwei Moden laufen – mit 500 MW Fusionsleistung, einer Brenndauer von 5 Minuten und  $COP = 10$ , oder von 50 Minuten mit einem Energiegewinn  $COP = 5$ . Damit sollen die technischen und wissenschaftlichen Voraussetzungen für die Planung eines Demonstrationskraftwerkes geschaffen werden.

Auch die erwartete, über zwanzigjährige Periode bis zum Abschluss dieser Experimente ist kein Selbstläufer: Neben dem Erfordernis für weitere kreative technische Neuentwicklungen erwarten die ITER-Entwickler auch neue physikalische Ungewissheiten, welche die Entwicklung verzögern oder das Erreichen der Ziele verhindern könnten (vgl. Sonnabend 2018). Eine zu erwartenden Ungewissheiten ist mit der Entstehung starker Flüsse hochenergetischer Neutronen aus der DT-Reaktion (3) verbunden, die einerseits zu radioaktiver Aktivierung in den Reaktorstrukturen sowie Wärmefreisetzung in den supraleitenden Spulen und andererseits zur Notwendigkeit der ständigen Reproduktion und des sicheren Umgangs mit größeren Mengen des radioaktiven Tritiums erfordern. Sollte in den 2050er Jahren, wie geplant, ein Demonstrationskraftwerk auf Tokamak-Basis in Betrieb gehen, würde eine dann fast einhundertjährige Entwicklung von der kreativen Idee bis zum anwendungsbereiten Produkt ihren erfolgreichen Abschluss finden. Auf dem Weg bis zu diesem Endpunkt bleibt ITER als größte international betriebene Tokamak-Anlage allerdings nicht ohne Konkurrenz: Aus China wird über die erfolgreiche Entwicklung der wesentlich kompakteren Anlage EAST HT-7U berichtet, die ebenfalls mit supraleitenden Spulen, aber zusätzlich auch bereits mit Tritium-Brutmantel zur Reproduktion von Tritium nach der Reaktion (7) ausgerüstet ist. Wird China einst auch auf diesem Gebiet die Leadership übernehmen? Weitere Atomkräfte könnten dem Beispiel folgen und eigene Projekte, die bereits laufen, aber derzeit nicht forciert werden, wieder stärker vorantreiben.

Es bleibt die Frage, ob im Falle eines erfolgreichen Abschlusses des Aufbaus und Betriebes eines Demonstrationskraftwerkes auf Tokamak-Basis die eingangs formulierten Zielstellungen für eine ideale Wärmequelle erfüllt werden können. Die generellen Vorteile eines Fusionsreaktors gegenüber einem Kernspaltungsreaktor wurden bereits genannt. Die äußerste Komplexität und Kompliziertheit der technischen Anlagen sowie der notwendige Umgang mit großen radioaktiven Inventaren bei Nutzung der DT-Reaktion führen allerdings dazu, dass die Nutzung dieser Anlagen zur Energieerzeugung nur großen Nuklearstaaten oder internationalen Konsortien

vorbehalten sein wird und der Nachweis von Nachhaltigkeit, Konkurrenzfähigkeit sowie gesellschaftlicher Akzeptanz als offen anzusehen sind, insbesondere angesichts des enormen Tempos der Entwicklung von Technologien auf dem Gebiet erneuerbarer Energien.

#### Wendelstein W7-X auf Stellarator-Basis

Beim Tokamak erzeugt der im Plasma induzierte Stromfluss selbst eine Magnetfeldkomponente, die zusammen mit äußeren Magnetfeldkomponenten das resultierende helikale Magnetfeld bildet, welches das Plasma in der Anstiegsphase des induzierten Stromflusses einschließt. Der Anstieg des Stromes im Plasma ist prinzipiell zeitlich begrenzt, da jeweils am Ende der Anstiegsphase bis zum maximalen Plasmastrom zwangsläufig eine Rückkehr zum Ausgangszustand der Anlage erfolgen muss. Der Betrieb des Tokamak ist daher prinzipiell gepulst und die Kopplung zwischen variablem Plasmastrom und dem durch ihn erzeugten stabilisierenden Magnetfeld bietet einen unerwünschten Ansatzpunkt für die Ausbildung von Schwingungen und Instabilitäten.

Fusionsanlagen vom Typ Stellarator können demgegenüber ohne Plasmastrom und damit auch im Dauerbetrieb arbeiten, da das resultierende Magnetfeld ausschließlich durch äußere Magnetspulen erzeugt wird. Dies erfordert jedoch eine äußerst komplizierte Konfiguration des Magnetfeldes. Der prinzipielle Vorteil des Stellarators hat dazu geführt, dass ungeachtet der Konzentration eines großen Teiles der Fusionsforschung auf die Entwicklung des Tokamak auch an dem Stellarator-Konzept weiter gearbeitet wurde. Im Bericht auf dem VII. Symposium zur Allgemeinen Technologie wurde über den erfolgreichen Start des Plasmabetriebes an der Anlage Wendelstein W7-X am Institut für Plasmaphysik in Greifswald berichtet (vgl. Seeliger 2017). Die Fertigstellung der komplexen Anlage mit äußerst komplizierter Magnetfeld-Konfiguration kann zu Recht als eine äußerst kreative Leistung bezeichnet werden, die zu einem unikatlen, kreativen Produkt geführt hat.

So konnte im Juni 2017 für Stellaratoren im Wasserstoffplasma ein Rekordwert des Fusionsproduktes (8) mit  $T = 40$  Mio. K,  $n = 0,8 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$  und  $\tau = 200$  ms erreicht werden. Im Herbst 2018 begann der erste Umbau der inneren Wandverkleidungen, um höheren thermischen Belastungen standhalten zu können (vgl. WEND 2018). Im Lauf der weiteren Erprobungen soll eine Plasmabrenndauer bis zu 30 Minuten erreicht und am Ende der Erprobungen zum Betrieb mit Deuterium übergegangen werden, aber noch ohne Tritium. Damit können Bedingungen im Plasma erprobt werden, wie

sie später in einer nachfolgenden DT-Anlage auftreten werden. Kann dieses Programm erfolgreich und zügig absolviert werden, wird dem Stellarator-Projekt die Chance eingeräumt, als Alternative zum Tokamak in einer internationalen Demonstrationsanlage eingesetzt zu werden. Da auch diese Entwicklung in Zukunft letztlich auf die Nutzung der DT-Reaktion (2) zur Energiegewinnung orientiert, werden auch auf diesem Wege die gleichen Risiken einer großen Nuklearanlage mit hohem Neutronenfluss und radioaktivem Inventar zu lösen sein, wie dies beim Tokamak der Fall sein wird.

### 3.2 *Trägheitseinschluss des Plasmas*

#### NIF auf Basis von Laserfusion

Auch über die Alternative zum Magneteinschluss, den Trägheitseinschluss, wurde auf dem VII. Symposium zur Allgemeinen Technologie bereits berichtet (vgl. Seeliger 2017). Die National Ignition Facility NIF galt über Jahre als aussichtsreiches nationales Projekt der USA, in das gewaltige Investitionen geflossen sind: Insgesamt 192 Leistungs-Laserstrahlen sollen, konzentrisch gebündelt auf ein DT-Pellet, dieses zur Zündung eines kurzzeitig selbsterhaltenden Fusionsprozesses bringen, in dem ein Teil des DT-Materials zu Helium verschmilzt. In Jahr 2012 konnten mit diesem Ziel 1,8 Megajoule Pulsenergie auf das Pellet konzentriert werden, ohne allerdings die Zündung zu erreichen. Bis zu diesem Jahr konnte die Pulsenergie sogar auf 2,15 Megajoule erhöht werden, weiterhin ohne die Zündung zu erreichen. Plasmaturbulenzen verhindern bisher ausreichende, ideal konzentrische Kompression des DT-Gemisches, so dass die erforderlichen Dichte  $n$  und Temperatur  $T$  innerhalb der extrem kurzen Einschlusszeit  $\tau < 10^{-11}$  s nicht erreicht werden können (vgl. NIF 2012, 2018).

Neue Entscheidungen über die Weiterführung des Experiments sind nicht vor 2020 zu erwarten. Wird die damit gesamte Richtung Laserfusion in Frage gestellt? Dieser Fall zeigt, Kreativität, höchste technische Perfektion und ausreichende Finanzierung sind erforderlich, um die Idee der gesteuerten Fusion zur Anwendung voranzubringen, aber sie sind nicht ausreichend – die Naturgesetze müssen den Prozess zulassen.

### 3.3 *Risikokapitalprojekte zur Kernfusion*

#### Stoßwellenfusion von General Fusion

Über einige private Risikokapitalprojekte wurde hier bereits berichtet (vgl. Seeliger, 2017), darunter auch über das Konzept der Stoß- oder Schockwellenfusion, welches in der kanadischen Firma General Fusion verfolgt

wird. Grundlage ist die originelle Idee, DT-Plasmabündel während einer kurzen Einschlusszeit von Millisekunden durch eine akustische Stoßwelle aus 200 mechanischen Kolben mit einer Stoßkraft von jeweils 2 Tonnen bis zum Erreichen der Fusionsbedingung (7) zu komprimieren (vgl. Laberge 2008). Bis zu diesem Jahr konnten auf diesem Weg deutliche Fortschritte erreicht werden (vgl. Laberge 2018):

- Mit dem Plasmainjektor wurden Plasma-Bündel mit einer Temperatur von 5 Mio. K und einer Lebensdauer von 2 ms erzeugt,
- alle erforderlichen Komponenten, auch die Kolbenkompression sowie die Wirbelkammer mit flüssigem Metall, wurden in Modellanlagen getestet,
- 150.000 Plasmaexperimente wurden durchgeführt,
- 198 Patente eingereicht und
- über 100 Mio. Dollar an Investmentkapital konnten bisher eingeworben werden.

Das Ziel des Unternehmens besteht darin, bis zum Jahr 2030 mit einer Demonstrationsanlage das DT-Plasma zur Fusion zu bringen (vgl. Miles 2018).

Die vier Grundelemente der Kreativität sind bei diesem Vorhaben beispielhaft gegeben:

- Mit *Michael Laberge* liegt die Führung bei einer äußerst kreativen *Person*,
- der mit seiner neuen Idee seit 15 Jahren konsequent einen kreativen *Prozess* entwickelt,
- in dessen Ergebnis ein kreatives *Produkt* stehen soll,
- wobei die Entwicklung in einem kreativen *Umfeld* erfolgt, was sich in effektivem Teamwork, öffentlicher Akzeptanz und finanzieller Unterstützung durch Investoren ausdrückt.

Ungeachtet der positiven Vorhersagen stehen auch vor diesem Projekt noch ungelöste Probleme und es bleibt abzuwarten, inwieweit inhaltliche und zeitliche Prognosen eingehalten werden können.

### Tri Alpha Energy

Ein alternativer Weg zur gesteuerten Kernfusion wird von dem Unternehmen Tri Alpha Energy verfolgt – die Nutzung der Reaktion (6) zur Energieerzeugung. Diese vermeidet die Verwendung von Tritium als Brennstoff und erzeugt in der Hauptreaktion keine schnellen Neutronen. Damit vermeidet sie die potenziellen Nachteile der DT-Reaktion und könnte den Forde-

rungen nach einer idealen Wärmequelle wesentlich näher kommen. Die Vorteile müssen allerdings teuer erkaufte werden: Wegen der wesentlich höheren Coulomb-Barriere der Reaktion (6) im Vergleich zur Reaktion (2) muss das Plasma auf eine Temperatur von 3 Mrd. Kelvin erhitzt werden, um eine Zündung auslösen zu können! Ungeachtet dieser extremen Schwierigkeit wird seit 15 Jahren in einer von Norman gegründeten Gruppe systematisch an dem Konzept gearbeitet (vgl. Grant 2013), sind zahlreiche Patente, wissenschaftliche Publikationen und einige Versuchsanlagen mit einer neuen Reverse Field Configuration entstanden, wie bereits berichtet (vgl. Seeliger 2017).

Auch auf diesem Gebiet gibt es jüngste Fortschritte: An der 2017 in Betrieb genommenen Versuchsanlage C2-W/Norman, dem bereits fünften Reaktor dieser Entwicklungsrichtung, konnten durch Einsatz von modernen Methoden der Digitalisierung zur Datenanalyse, in Kooperation mit einem Entwicklungsteam von Applied Science Google, erhebliche Fortschritte erzielt werden, so dass im Februar 2018 das Erreichen einer Plasmatemperatur von 20 Mio. Kelvin gemeldet wurde (vgl. Baltz et al. 2017). Bisher konnten über 500 Mio. Dollar Risikokapital eingeworben werden. Als Zielmarke für die Schaffung eines Prototyps wird das Jahr 2030 genannt.

Auch dieses Vorhaben lässt alle Grundelemente von Kreativität erkennen und ist gekennzeichnet durch die Kontinuität und den langen Atem, mit dem die durch einen Ideenschöpfer initiierte Entwicklung zu einem kreativen Produkt fortgesetzt und durch Einbeziehung völlig neuer Methoden vorangetrieben wird. Ohne Frage hätte diese Entwicklung – falls sie realisiert werden kann – eine große Perspektive für die künftige Energiegewinnung und sie würde vielen Forderungen an eine ideale Wärmequelle nahe kommen, weil diese Anlagen die Nachteile der DT-Fusion vermeiden und nicht die gewaltigen Dimensionen einer Tokamak-Anlage vom Typ ITER oder einer Laseranlage vom Typ NIF annehmen würden.

In diesem Zusammenhang soll auf die große Bedeutung der Risikobereitschaft zur Finanzierung neuer Forschungsrichtungen generell und insbesondere für die Projekte zur gesteuerten Kernfusion hingewiesen werden. In den USA und einigen weiteren Industriestaaten ist die Bereitschaft verbreitet, Kapital in Richtungen zu investieren, die mit hohem Risiko behaftet sind, dafür aber im Erfolgsfall hohe Rendite versprechen. Dies ermöglichte in der Vergangenheit mehrfach schnelle Entwicklungen von kreativen Ideen zu erfolgreichen Forschungsgebieten und marktfähigen Produkten auch außerhalb von staatlicher Finanzierung. Die zunehmende Bereitschaft zur Investition von Risikokapital in bestimmte Start-up-Unternehmen korreliert

mit den Chancen, die der künftig erfolgreichen Entwicklung des Gebietes eingeräumt werden, welche wiederum ein Ergebnis der ständigen Beobachtung und Evaluierung durch Investoren, Medien und Fachleute sind. Unterschieden werden dabei drei Entwicklungsphasen: Seed Stage (Investitionen < 20 Mio. Dollar), Venture Stage (Investitionen 20 bis 50 Mio. Dollar) und Late Stage (Investitionen > 50 Mio. Dollar). Eine aktuelle Analyse der Investitionstätigkeit auf dem Gebiet der gesteuerten Kernfusion (vgl. Boyle 2016) zeigt einen starken Anstieg privater Investitionen in den USA seit 2005, wobei sowohl die Anzahl solcher Unternehmen gestiegen ist – auf 24 im Jahr 2018 – wie auch der Investitionssumme, die inzwischen über 1 Mrd. US-Dollar erreicht hat, wobei einen besonders hohen Anteil am Anstieg den Projekten in der dritten Phase zukommt.

Auch die staatlich finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprogramme zur gesteuerten Kernfusion hängen seit ihren Anfängen vor über 60 Jahren von der Fähigkeit und Bereitschaft der Staaten zur Finanzierung ab, aber auch von deren Bewertung durch die gesamte Gesellschaft. Auf diesen Zusammenhang wies *Kintner* in seiner bereits zitierten Artsimovich Memorial Lecture etwas scherzhaft hin:

„Finally, he stated his own view of why scientific endeavours deserved governmental support: [...] ‚Science is a way to pursue one’s sense of inquiry at the expense of the State’.” (Kintner 1979, p. 5)

Nur durch die Aussicht auf Lösung eines der globalen Probleme der menschlichen Gesellschaft lassen sich die gewaltigen Investitionen in diese Entwicklungsrichtung gegenüber den Mitgliedern der Gesellschaft rechtfertigen. Es liegt daher auch in der Verantwortung der auf diesem Gebiet tätigen Wissenschaftler und Ingenieure, die umfangreiche Finanzierung durch die Gesellschaft nur solange nutzen zu können, wie eine berechtigte Aussicht besteht, durch das zu erwartende Ergebnis der Gesellschaft einen adäquaten Nutzen zurückgeben zu können – sei es in Form neuer Erkenntnisse oder kreativer Produkte.

#### **4 Low Energy Nuclear Reactions – eine Alternative?**

In einem Beitrag widmete sich „Spektrum der Wissenschaften“ kürzlich einem Thema aus dem Gebiet der Energiegewinnung, welches seit nunmehr fast dreißig Jahren Physiker beschäftigt, ohne bisher eine schlüssige Lösung vorlegen zu können (vgl. Deeg 2018). Im Jahr 1989 hatten amerikanische Forscher ungewöhnliche Wärmefreisetzung bei der Elektrolyse in Schwefelwasser-Lösungen mit Palladium-Kathoden gemessen und diese als Resultat



von Fusionsreaktionen vom Typ (3) und (4) sowie der unter normalen Bedingungen äußerst seltenen (Wahrscheinlichkeit  $10^{-7}$ ) Reaktion



interpretiert. Die experimentellen Ergebnisse konnten zunächst nicht reproduziert werden und die Interpretation stieß auf massive Kritik, da weder die Überwindung der Coulomb-Barriere bei geringer Temperatur der Elektrolyse noch das fast vollständige Fehlen der für die Reaktionen (3), (4) und (8) charakteristischen Kernstrahlung erklärt werden konnten. Im zitierten Beitrag wird, Bezug nehmend auf die Ausführungen eines deutschen Plasmaphysikers, die damals eingetretene Situation mit folgenden Sätzen beschrieben:

„Diese zahlreichen missglückten Experimente hatten zur Folge, dass die zwei Forscher massive Kritik einstecken mussten. Kollegen warfen ihnen grobe Fehler in ihrer Versuchsdurchführung bis hin zur absichtlichen Täuschung vor. Bis heute stehen für manche Wissenschaftler die Namen ‚Fleischmann-Pons‘ als Synonym für ‚junk science‘, also ‚Wissenschaft für die Mülltonne‘.“ (Deeg 2018)

Der Beitrag geht weiterhin auf die ungeachtet der allgemeinen Kritik fortgeführten Arbeiten von zwei amerikanischen Wissenschaftlern ein, *Peter L. Hagelstein* und *David J. Nagel*, die von der Realität der stark umstrittenen Effekte nach wie vor überzeugt sind:

„Auch wenn nicht viele etablierte Wissenschaftler Hagelsteins Beobachtungen ernsthaft diskutieren, einige gibt es. Einer davon ist David J. Nagel, Professor für Computer- und Elektrotechnik an der George Washington University. In einem Artikel aus dem Jahr 2016 der American Chemical Society (ACS) äußert er sich so zu dem Thema:

„Es gibt Ergebnisse, die man nicht einfach wegeden kann. Ob es kalte Fusion, niedrigerenergetische Kernreaktionen oder etwas anderes ist [...] wissen wir noch nicht. Aber es besteht kein Zweifel, dass sich mittels chemischer Energie Kernreaktionen herbeiführen lassen.“ Er spricht statt von kalter Fusion lieber von so genannten ‚lattice enabled nuclear reactions‘, weil sich die Prozesse innerhalb des Kristallgitters einer Elektrode abspielen.“ (Deeg 2018)

Der Beitrag in „Spektrum der Wissenschaft“ endet unter Bezug auf die Einschätzung des Gesprächspartners aus der Plasmaphysik mit den Sätzen:

„Dennoch möchte er nicht ausschließen, dass es einen beobachtbaren Effekt gibt, der sich bislang nicht erklären lässt. Sehr wahrscheinlich handle es sich dabei aber nicht um eine Fusion im herkömmlichen Sinn.“ (Deeg 2018)

Das weckt Interesse, mehr über diese Forschungsrichtung zu erfahren, welche sich seit so langer Zeit, kaum beachtet, im Schatten der breit anerkannten und durch öffentliche Programme geförderten Wissenschaftsgebiete entwickelt. Eine schnelle Orientierung im Internet liefert, sehr stark verkürzt, folgendes Bild, welches sich ständig erweitert und im Laufe der vergangenen Jahre immer neue Konturen erhielt:

- In der Tat wurden die Wärmeeffekte bei der Elektrolyse mit D<sub>2</sub>O von unabhängigen Forschergruppen immer wieder beobachtet und die Bedingungen ihres Entstehens soweit geklärt, dass einige Forscher von Reproduzierbarkeit des Effektes berichten;
- alle positiven Experimente hinsichtlich des Auftretens von Wärmeeffekten zeigen keine oder nur äußerst geringe Kernstrahlung – eine für die Anwendung äußerst attraktive Eigenschaft;
- zunächst völlig überraschend wurden ungewöhnliche Wärmeeffekte auch in gasförmigen Systemen gefunden, in denen sich erhitztes H<sub>2</sub>-Gas in Kontakt mit Metalloberflächen befindet;
- noch unerwarteter sind Beobachtungen von Elementumwandlungen, auch als Transmutation bezeichnet, die in verschiedenen Metall-Wasserstoff-Systemen bei starker elektromagnetischer Anregung, beispielsweise in Gasentladungsprozessen, auftreten.

Erkenntnisse zu geeigneten Verfahren und Materialien für die Auslösung dieser Prozesse sind umfangreich in einigen Tausend Originalarbeiten (vgl. Bibliografie in CANR 2018), Übersichten (z.B. in Krivit 2013), Monographien (z.B. Miley 2013; Storms 2007) sowie offengelegten Patentschriften verfügbar. Eine kürzlich erschienene Übersicht gibt Auskunft darüber, dass im Jahr 2017 weltweit 114 Unternehmen als Ziel angeben, marktfähige Produkte mit dieser Technologie zu entwickeln: 45 USA, 31 Europa, 19 Japan, sechs Russland, fünf China, je ein in Australien, Kanada und Korea (vgl. Draper/Ling 2017). Das eingeworbene Investmentkapital in den USA übersteigt bereits 100 Mio. Dollar.

All das steht bisher unter dem Vorbehalt, dass es noch keine vollständig akzeptierte Theorie dieser Prozesse gibt, sondern nur mehr als ein Dutzend theoretischer Modelle mit teilweise hypothetischen Annahmen. Klar geworden ist allerdings, dass es sich bei diesen Prozessen nicht um die von den Gleichungen (2) bis (6) und (8) beschriebenen Fusionsreaktionen zwischen jeweils zwei isolierten Teilchen handelt, sondern um metallgitterunterstützte, kollektive Prozesse, an denen auch schwache Wechselwirkungen beteiligt sein könnten, ebenso wie katalytische Prozesse bei deren Auslösung. Eine

Reaktionstheorie mit dieser Komplexität gibt es bisher noch nicht, es ist erneut eine unikale Anforderung nach einer kreativen Lösung. Eine endgültige Klärung bleibt abzuwarten, bevor zuverlässige Aussagen über die Perspektive solcher Prozesse für die Energieerzeugung getroffen werden können.

Hinsichtlich des Themas dieses Symposiums lässt sich aus dem beschriebenen langdauernden und widersprüchlichen Prozess der Erkenntnisfindung auf dem Gebiet der Low Energy Nuclear Reactions die Bedeutung der Ambiguitätstoleranz als Eigenschaft kreativer Forscher erkennen, das heißt der Fähigkeit, eine verwickelte, widersprüchliche und unsichere Situation auszuhalten und gleichwohl an deren Bewältigung arbeiten zu können. Erfinder mit dieser Eigenschaft werden von Ambivalenzen, Widersprüchen, Unklarheiten, ungelösten Spannungen und Komplexität der zu lösenden Probleme nicht eingeschüchtert. Dadurch können einseitige Lösungen oder das zu schnelle Verwerfen von aussichtsreichen Lösungswegen verhindert werden.

## **5 Schlussfolgerungen**

Auf dem seit den 1950er Jahren verfolgten Weg der Entwicklung einer neuen Wärmequelle auf Grundlage der gesteuerten Kernfusion sind im letzten Jahr bei wichtigen Projekten, wie ITER und Wendelstein7-X, weitere Fortschritte erreicht worden. Der Prozess der Separation von tragfähigen Konzepten und die Rückstellung von nicht realisierbaren Konzepten für die Verwirklichung einer nutzbaren Energiequelle setzt sich fort. Anliegen des vorliegenden Beitrages war nicht eine detaillierte inhaltliche Darstellung oder Wertung des Entwicklungsstandes, sondern die Beleuchtung des Prozesses aus der Sicht der Thematik dieses Symposiums, d.h. hinsichtlich der Kreativität des Prozesses und der Kreativitätstechniken. In diesem Sinne sind besonders hervorzuheben:

- Das persönliche Engagement von wissenschaftlichen Führungspersönlichkeiten mit neuen Ideen, Motivationskraft und Weitblick, mit Fähigkeiten zur Teambildung bis hin zu internationalen Kooperationsnetzen, welches in allen Phasen der Fusionsforschung eine entscheidende Rolle spielt – beginnend mit den bahnbrechenden Ideen in der Frühzeit bis zu den jüngsten Entwicklungen internationaler Projekte wie ITER und Wendelstein 7-X oder auch bei den privat finanzierten Projekten.
- Die Schaffung einer neuen Wärmequelle auf atomarer und nuklearer Basis erfordert Mut zum Betreten von Neuland. Die kreative Lösung zahlreicher technisch-technologischer Probleme unter extremsten physikalischen Bedingungen ist erforderlich, wie sie bisher in keinem der großen

Technologievorhaben der Menschheit – Kerntechnik, Mikroelektronik, Weltraumtechnik – zur Lösung anstanden.

- Charakteristisch ist bei allen eingeschlagenen Wegen die Notwendigkeit eines „langen Atems“, da alle bisherigen Entwicklungen über viele Jahre laufen, teilweise über mehrere Generationen von Wissenschaftlern und Ingenieuren!
- Offenheit für neue Ideen und Methoden ist notwendig, auch für solche Projekte, die in Konkurrenz zu eigenen Entwicklungen treten könnten, da Festhalten an aussichtslosen Entwicklungen Zeitverlust bringt und früher oder später von der Realität bestraft wird.
- Notwendig ist absolute Solidität von Forschung und Entwicklung. Jedes Vortäuschen von schnellen Erfolgen und überhöht positiven Prognosen, motiviert durch den Wunsch nach ausreichender Anerkennung und Förderung, werden durch die Entwicklung eingeholt.
- Kreative zukunftssträchtige Ideen allein sind nicht hinreichend, sondern die ausreichende Finanzierung ist mitentscheidend über den Erfolg. Um die beträchtlichen Mittel aufzubringen, sind große, national oder international getragene und finanzierte Projekte notwendig.
- Für die schnelle Entwicklung neuer Konzepte sind Risikokapitalprojekte von zunehmender Bedeutung, sie haben schon heute einen wesentlichen Anteil am wissenschaftlich-technischen Fortschritt auf dem Gebiet.
- Die Konkurrenz zwischen den verschiedenen physikalischen Ideen und technischen Konzepten darf nicht zur Stigmatisierung und Blockierung neu entstehender Richtungen führen.
- Die Entwicklung einer neuen Wärmequelle auf Basis von atomaren und nuklearen Reaktionen der Wasserstoffisotope erfordert Kreativität, Mut zum Risiko und zum Betreten von Neuland sowie die Schaffung unikalear technisch-technologischer Anlagen, auch ohne vorherige Garantie für den Erfolg der Projekte. Sie bieten dafür die Chance einer qualitativ langfristigen Lösung des Energieproblems für die menschliche Gesellschaft.
- Auch für diese Entwicklung besteht die Notwendigkeit, sich dem Maßstab der gesellschaftlichen Erfordernisse zu stellen, insbesondere den Kriterien für eine „ideale Wärmequelle“: Nachhaltigkeit, Umweltverträglichkeit, Verfügbarkeit, Wettbewerbsfähigkeit und Akzeptanz. Auch Fusionsprojekte auf Basis der DT-Reaktion werden bei Eintritt in die Demonstrationsphase in Kraftwerken Probleme der öffentlichen Akzeptanz und der Nuklearsicherheit zu lösen haben, während schwieriger zu realisierende Technologien ohne Einsatz von Tritium im Vorteil sind.

- Die Aufgabe der Entwicklung einer neuen Wärmequelle auf atomarer und nuklearer Basis hat auch in der Gegenwart das Potenzial, die Jugend für die kreative Arbeit an weitreichenden wissenschaftlich-technischen Projekten zu begeistern, wie das die früheren Generationen von Physikern in ihrer Jugendzeit erlebt haben. Der mathematisch-naturwissenschaftlichen Ausbildung und Erziehung der jungen Generation sowie dem Einfluss der Medien auf die Meinungsbildung der gesamten Gesellschaft über Notwendigkeit und Ziele der Entwicklung innovativer Technologien und kreativer Produkte kommt dabei eine verantwortungsvolle, wichtige Rolle zu.

## Literatur

- Baltz, E. A.; Trank, E.; Binderbauer, M.; Dikovskiy, M.; Gota, H.; Mendoza, R.; Platt, J. C.; Riley, P. F. (2017): Achievement of Sustained Net Plasma Heating in a Fusion Experiment with the Optometrist Algorithm. Scientific Report. July. – DOI: 10.1038/s41598-617-06645-7
- Braams, C. M. (1979): Summary on Magnetic-Confinement Experiments. In: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1978, Vol. III: Nuclear Fusion Supplement 1979. Vienna (IAEA), pp. 447–457 (auch in: Nuclear Fusion, Vol. 19/No. 1 [1979], p. 125)
- Boyle, A. (2016): Nuclear Fusion Gets Boost from Private-sector Start-ups. In: Science News, Vol. 189/No. 3, p. 18
- CANR – CANR-Organization (2018). – URL: [http://lenr-canr.org/Complete Bibliography](http://lenr-canr.org/Complete%20Bibliography)
- Deeg, J. (2018): Kalte Fusion: Jäger des verlorenen Schatzes. In: Spektrum der Wissenschaften, 14.05. – URL: <https://www.spektrum.de/news/jaeger-des-verlorenen-schatzes/1564692> [10.10.2018]
- Draper, G. W.; Ling, F. H. (2017): LENRaries – New Era of Renewable Energy. A Survey of the LENR Ecosystem. Report des Anthropocene Institute. – URL: [www.anthropoceneinstitute.com](http://www.anthropoceneinstitute.com) [10.10.2018]
- Grant, A. (2013): Proton-boron Nuclear Fusion Returns to Spotlight. In: Science News, Vol. 184/No. 2, p. 8
- IAEA – International Atomic Energy Agency (1970): World Survey of Major Facilities in Controlled Fusion. Special Supplement 1970, Vienna (IAEA) June
- IAEA – International Atomic Energy Agency (1980): International Tokamak Reactor INTOR: Zero Phase. Vienna (IAEA)
- ITER (2018): International Thermonuclear Experimental Reactor. – URL: <http://www.iter.org> (Bericht siehe <https://bit.ly/2Nlmdet>)
- Kintner, E. E. (1979): Artsimovich Memory Lecture. In: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1978, Vol. I: Nuclear Fusion Supplement 1979. Vienna (IAEA), pp. 3–9
- Krivit, S. B. (2013): Energy: Review of Low-Energy Nuclear Reactions. Amsterdam u.a.O.

- Laberge, M. (2008): An Acoustically Driven Magnetized Target Fusion Reactor. In: *Journal of Fusion Energy*, Vol. 27, June, p. 65. – DOI: 10.1007/s10894-007-9091-4
- Laberge, M. (2018): Magnetized Target Fusion with a Spherical Tokamak. – DOI: 10.1007/s10894-018-0180-3
- Miley, G. H. (2013): *Life at the Center of the Energy Crisis*. Singapore
- Miles, M. (2018): Transforming How We Energize The World. Power GenAsia Conference, Jakarta, September 20. – URL: [www.generalfusion.com/category/research/research-library](http://www.generalfusion.com/category/research/research-library) [09.10.2018]
- Musiol, G.; Ranft, J.; Reif, R.; Seeliger, D. (1988): *Kern- und Elementarteilchenphysik*. Berlin
- NIF – National Ignition Facility / Lawrence Livermore National Laboratory (2012): NIC Team Fires First 500-Terawatt Shot on NIF. – URL: [http://lasers.llnl.gov/newsroom/project\\_status/index.php](http://lasers.llnl.gov/newsroom/project_status/index.php)
- NIF – National Ignition Facility/Lawrence Livermore Laboratory (2018). – URL: <https://lasers.llnl.gov/science>
- Rohdes, M. (1961): An Analysis of Creativity and Personality. In: *Phi Delta Kappa*, Vol. 42, pp. 305–310
- 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. 147–163 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 31)
- Seeliger, D. (2017): Perspektivische Beiträge atomarer und nuklearer Prozesse zu einer künftigen kohlenstofffreien Energiewirtschaft. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): *Technologie und nachhaltige Entwicklung*. Berlin, S. 165–192 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 130)
- Sonnabend, K. (2018): Blick in die Zukunft. In: *Physik Journal*, Heft 11, S. 16
- Storms, E. K. (2007): *The Science of Low-energy Nuclear Reactions*. Singapore (World Scientific)
- WEND – Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2018). – URL: [www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/](http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/)