

LET'S CATCH THE STAR

Forschung im Auftrag der Menschheit

Projekte, Initiativen,
und Ansätze



Potenzielle Wege zur Kernfusion, Projekte, Initiativen und Ansätze

Die Kernfusion findet seit Milliarden von Jahren direkt vor unserer Haustür (in unserem Sonnensystem) sowie in entfernten Galaxien gleichermaßen statt. Alle uns bekannten Stoffe (außer Wasserstoff) sind in mehreren Generationen von Sternen auf diese Weise entstanden. Im Gegensatz zur Kernspaltung werden dabei, wie der Name es schon verrät, zwei leichtere Elemente zu einem schwereren „fusioniert“. Dabei wird ein sehr kleiner Teil der Masse in reine Energie umgewandelt, die Grundlage für das Verständnis hat Albert Einstein mit $E = mc^2$ geliefert, wobei m für die Masse und c für die Konstante der Lichtgeschwindigkeit steht (etwa 300.000 Kilometer pro Sekunde). Die Fusionskonstante enthält drei Variablen, Druck, Zeit und Wärme (Energie), hat man von einem weniger, braucht man vom anderen umso mehr. Unsere Sonne kommt mit relativ niedrigen Temperaturen aus, weil sie sehr groß und sehr dicht (Massereich) ist, dadurch ist die Zeit, die die Energie in ihr verweilt groß (Einschlusszeit) und der Druck durch die Gravitation ebenfalls. Baut man den Prozess der Sonne nach, erfolgt das nach denselben Regeln, es kommen deshalb unterschiedliche „Maschinen“ dafür in Frage.

Magnetischer Einschluss: Aufgrund der sehr hohen Temperaturen entsteht ein Aggregatzustand, den man Plasma nennt. Dieses Plasma darf die Wände nicht berühren, ist aber glücklicherweise elektrisch sehr leitfähig, deshalb kann man es mit Magnetfeldern einschließen. Idealerweise verwendet man dafür eine oder mehrere ringförmige Spulen. Beispiele dafür sind die Spiegelmaschine, der TOKAMAK und der STELLERATOR.

Bei der Spiegelmaschine werden die Teilchen zwischen Spulen - ähnlich wie beim Erdmagnetfeld - immer wieder hin und her reflektiert, leider entweichen dabei zu viele Teilchen (Energie) in zu kurzer Zeit (Einschlusszeit), sie wäre aber genau deshalb besonders gut für einen nuklearen Raketenantrieb geeignet.

Beim TOKAMAK dagegen sind mehrere Spulen im Kreis angeordnet, also fast wie mehrere „Spiegelmaschinen“. Es entsteht ein „Donat“ oder Ringtunnel, der das Plasma in der Schwebe hält. Geheizt wird ähnlich wie bei einem Trafo mit einem Eisenkern, der erreicht aber nur ein Bruchteil der erforderlichen Temperatur und muss immer wieder neu angefahren werden. Dadurch entsteht ein gepulster Betrieb und man benötigt weitere Heizungen für das Plasma, hierzu gehören zum Beispiel Mikrowellen- oder Plasmakanonen (Gyratrons oder Teilchenbeschleuniger).

Normale Magnete verbrauchen zu viel Energie und werden dabei zu heiß, deshalb nutzt man supraleitende Komponenten, die bei sehr niedrigen Temperaturen (-270 °C) in der Nähe des absoluten Nullpunkts operieren. Wichtigste Vertreter sind ITER (Südfrankreich) oder auch JET (England) und JT-60 (Japan). Noch höhere Magnetleistung bei kleiner Bauform erreicht man mit sogenannten Hochtemperatur-Supraleitern (HTS), das ist der neueste Stand der Technik.

Der STELLERATOR benötigt den Eisenkern im Zentrum nicht und muss nicht gepulst betrieben werden, das macht ihn für zukünftige Reaktorkonzepte besonders attraktiv, allerdings sind die Magnetstrukturen extrem komplex und der Zugang zum Plasma für Heizsysteme Vakuum und/oder Diagnostik ist begrenzt. Wichtigster Vertreter ist Wendelstein-7X (Deutschland).

Eine weitere Möglichkeit zur Fusion zu kommen, ist die Variable Druck zu nutzen. Hier gibt es mehrere zum Teil sehr exotische Ansätze:

Natürlich kann man mit einem Magnetfeld auch Druck erzeugen, indem man einen sehr kurzen aber extrem starken Puls erzeugt. Vergleichen kann man das mit einer Neonröhre, sie enthält ein Plasma, das durch eine elektrische Entladung erzeugt wird. Legt man darum eine Spule und gibt einen elektrischen Puls darauf, so wird das Plasma verdichtet. Diese Anordnung wird als Pincheffekt bezeichnet. Auch das Prinzip der Wasserstoffbombe beruht auf einem Pincheffekt, der allerdings durch eine Atombombe hervorgerufen wird, die im Zentrum der Fusionsladung angeordnet ist.

<https://www.spektrum.de/magazin/kernfusion-mit-dem-pinch-effekt/824843>

Sehr nahe an eine Explosion kommt die sogenannte Trägheitsfusion. Hierbei werden Laser oder Teilchenstrahlen auf ein kleines Kügelchen im Zentrum gerichtet, das dadurch auf mehrere 1.000 bar verdichtet und erhitzt wird. Ähnlich einem kleinen Stern implodiert das Kügelchen und setzt schlagartig Energie frei. Aufgrund der Anordnung wird auch diese Maschine gepulst betrieben, für die Erzeugung eines Energieüberschusses sogar mehrmals pro Sekunde. Wichtigster Vertreter ist die National Ignition Facility (NIF) in den USA, auch dort wurde kürzlich ein Meilenstein erreicht. Man konnte zeigen, dass mehr Energie erzeugt als verbraucht wurde, allerdings nur bei einem „Schuss“, für einen Leistungsreaktor bräuchte man mehrere in der Sekunde.

<https://www.zdf.de/nachrichten/panorama/durchbruch-kernfusion-100.html>

Weitere Ansätze nutzen mechanischen Druck, ähnlich einem Verbrennungsmotor oder hydrodynamischen Druck in einer Flüssigkeit, der zum Beispiel durch Schall induziert wird.

Ganz im Gegensatz dazu stehen Konzepte der sogenannten „kalten Kernfusion“. Seit die beiden Wissenschaftler Martin Fleischmann und Stanley Pons 1989 fälschlicherweise ihren „Durchbruch“ verkündet haben, steht sie im Ruf ein „Hirngespinnst zu sein“. Aus meiner Sicht zu Unrecht, weil es durchaus denkbar sein könnte, dass eine Art Katalysereaktion die Hürde für die Zündung herabsetzen könnte. Beim Pons-Fleischmann Experiment geschieht das über einen Feststoff in dessen Atomgitter der Treibstoff, zum Beispiel Wasserstoff, gepresst wird (<https://gotec.io/wissenschaft/physik/das-pons-fleischmann-experiment-kernfusion-bei-raumtemperatur>). Durch die Atome des Feststoffes rücken die Atome des Treibstoffs näher zusammen und die Wahrscheinlichkeit für eine Fusionsreaktion steigt.

Sehr gut funktioniert die Katalyse schon mit sogenannten Myonen, das sind Teilchen ähnlich einem Elektron aber mit 200-facher Masse. Sie kommen in der Höhenstrahlung (kosmische Strahlung) vor, die unsere Atmosphäre trifft. Ihre Lebensdauer ist nur ein Bruchteil einer Sekunde (Milliardstel), trotzdem können sie in dieser Zeit mehrere hundert Atome zur Fusion zwingen. Dies geschieht, weil die Atome des Wasserstoffs das Myon als Elektron nutzen, um ein Molekül zu formen. Durch die extrem große Masse angezogen, kommen sie sich dabei aber zu nahe. Diese Myon-Induzierte Kernfusion könnte bereits bei Temperaturen von unter 1.000 °C stattfinden, leider haben wir noch keinen Weg zur Erzeugung dieser Teilchen gefunden, der effektiv genug für den Bau eines Fusionsreaktors wäre.

Hier müsste man dann auch die Antimaterie erwähnen. Es handelt sich dabei nicht im eigentlichen Sinn um eine Fusion, sondern eher um eine vollständige Vernichtung von Materie und Umwandlung in reine Energie, ebenfalls nach der Einstein'schen Beziehung $E = mc^2$. Bei CERN in Genf konnte man einige „Anti-Wasserstoff-Atome“ erzeugen und sogar in sogenannten Laserfallen fangen. Treffen Sie auf normale Materie bleibt nur eine riesige Menge von Energie übrig, auf dieser Technik basiert der Warp-Antrieb (Star Trek). Allerdings ist auch hier die zur Erzeugung erforderliche Energie weit höher als die rückgewonnene, für Reaktorkonzepte deshalb eher ungeeignet.

Bestimmt habe ich noch einige vergessen, möglicherweise findet die Menschheit auch noch weitere Wege zum Beispiel durch die Erkenntnisse aus der Erforschung der „Dunklen“ oder exotischen Materie, oder der „Dunklen Energie“.

Nachdem wir verschiedene Konzepte für den Reaktor kennengelernt haben, kommen wir zum Treibstoff, Wasserstoff. Die Sonne nutzt in ihrem Prozess schweren Wasserstoff (Deuterium) in einer D-D-Reaktion, einfacher ist eine D-T Fusion auf der Erde, sie verwendet überschweren Wasserstoff (Tritium). Tritium zerfällt schnell, nach etwa 12 Jahren hat man nur noch die Hälfte davon übrig, deshalb muss man ihn in einem D-T-Fusionsreaktor mit erzeugen (brüten). Das Element, das beim Zerfall von Tritium entsteht ist ein Heliumisotop ($\text{He}3$), ihm fehlt ein Neutron. Auch die Sonne produziert diese „Asche“ und schickt sie mit dem Sonnenwind in den interplanetaren und interstellaren Raum. Große Mengen davon lagern unter anderem auf unserem Mond. D- $\text{He}3$ als Treibstoff zu verwenden, hätte den Vorteil, dass man kein Tritium brüten muss, außerdem entstehen bei dieser Reaktion geladene Teilchen, die man möglicherweise direkt in Strom umwandeln könnte. Sterne wie unsere Sonne können auch aus Helium Kohlenstoff (roter Riese) und aus Kohlenstoff Eisen fusionieren (weißer Zwerg), bevor sie ihr Leben beenden (schwarzer Zwerg). Elemente jenseits von Eisen benötigen bei ihrer Erzeugung zusätzliche Energie, sie entstehen nur bei Sternexplosionen - so genannten Supernovae.

Teilchen bedeuten Strahlung. Deshalb gibt es Ansätze wie p-B11 (Wasserstoff mit Bor), sie erzeugen praktisch keine Strahlung und/oder radioaktive Reststoffe. Während man beim magnetischen Einschluss für D-T etwa 100 Millionen und für D- $\text{He}3$ bereits 600 Millionen Grad benötigt, liegt der Wert bei p-B11 bei 1 Milliarde Grad! Temperatur ist aber nur ein anderes Wort für die Geschwindigkeit der Teilchen, in modernen Teilchenbeschleuniger kann man diese Temperaturen schon erreichen.

Jeder Reaktor braucht einen Mantel (englisch Blanket), also die Flasche, in der der Stern gezündet wird. Dieser Mantel erfüllt mehrere Kriterien: Er hält die Wärme im Reaktor (Einschlusszeit), schützt vor der Strahlung (Biologischer Schild), koppelt die überschüssige Wärme aus und brütet im Fall der Nutzung von Tritium dieses kurzlebige radioaktive Element. Die innere Wand kann aus Grafit, Beryllium (Be) oder Wolfram bestehen, es gibt aber auch Konzepte, die eine flüssige Wand vorsehen. Zum „Brüten“ von Tritium nutzt man die entstehenden Teilchen (Neutronen), die mit sehr hohen Geschwindigkeiten das Reaktorgefäß verlassen, sie werden zuerst gebremst und dann zur Umwandlung genutzt. Für das Bremsen verwendet man Beryllium, es macht aus einem schnellen 2 langsame Neutronen oder Blei, zur Umwandlung wird Lithium benötigt. Bei Feststoffmantelkonzepten werden Beryllium oder Be-Legierungen und Lithiumkeramiken und

manchmal auch Grafit zusätzlich verwendet. Flüssigmantelkonzepte basieren auf niedrig schmelzendem Metall oder Salzmischungen (Lithium-Blei (Li-Pb) oder Fluor-Lithium-Beryllium (FLiBe).

Letztlich gibt es noch Unterschiede bei der Wärmeauskopplung. Die meisten der existierenden Konzepte wandeln die Wärme in Dampf um und erzeugen Strom wie in herkömmlichen Kraftwerken. Das Kühlmittel dafür ist Wasser oder Helium, letzteres insbesondere in Verbindung mit Mantelkonzepten, die auf einem Feststoff basieren. Bei D-He3 und p-B11 ist die Wärme aber nur ein kleiner Teil der Energie, das meiste sind geladene Teilchen, die man direkt für die Stromerzeugung nutzen könnte. Interessant wäre aber auch die direkte Erzeugung von sogenanntem „violetter“ Wasserstoff, dabei würde das Gas Sauerstoff frei, das mit in die Atmosphäre entlassen werden kann. Für diese Variante müssten jedoch die Temperaturen im Reaktormantel weiter gesteigert werden und es bedarf noch einigen Aufwand bei der Erforschung.

„Vorhersagen über die Zukunft haben, von wenigen Aussagen abgesehen, die Geschwindigkeit des technischen Fortschritts immer unterschätzt.“

Zitat von Michio Kaku aus seinem Buch: Die Physik der Zukunft – unser Leben in 100 Jahren

Jules Verne hat die Mondlandung rund 100 Jahre vorweggenommen, wenn auch die Technik nicht die gleiche war, so doch das Ergebnis. In Anlehnung an einen der größten Science-Fiction Autoren aller Zeiten führe ich im Folgenden den Begriff „Verne-Faktor“ ein, er soll helfen, die Einsatznähe der beschriebenen Technologie einzugrenzen. Sein Wert kann zwischen 1 und 100 liegen und ist analog zu den Jahren, die man für die Umsetzung voraussichtlich benötigen wird.

Ähnlich einer Delphi-Studie wird dieses Papier an Experten und Laien versendet. Abhängig von ihrer Einschätzung wird ein Mittelwert gebildet und das jeweilige Fusions-Start-Up und seine Ziele bewertet. Danach soll die Bewertung von den Start-Ups reflektiert werden. Auf diese Weise könnten auch mehrere Runden durchlaufen werden. Das gleiche würde ich für die anerkannten internationalen Großprojekte vorschlagen. Sinn dieser Vorgehensweise wäre die Brücke zwischen innovativen Start-Ups und etablierten Großforschungsvorhaben zu bauen und Synergien durch Wissens- und Technologietransfer zu fördern.

Meine Einschätzung ist dabei nur als Einsteighilfe gedacht und darf gerne ebenfalls kommentiert werden.

Aniceto Goraieb, Geschäftsführer KBHF GmbH

goraieb@kbhf.org

www.fusion-for-future.de