

# Forschung auf dem Weg zum Fusionskraftwerk

G. Janeschitz, W. Bahm, FUSION

## Einleitung

Der Weltenergiebedarf wird heute zu etwa neunzig Prozent aus fossilen Energiequellen gedeckt. Sowohl die begrenzte Reichweite von Kohle, Öl und Erdgas als auch drohende Klimaschäden erfordern langfristig neue Versorgungsstrategien. Hinzu kommen die schnell wachsende Erdbevölkerung sowie die sich abzeichnende industrielle Entwicklung von Schwellenländern, sodass heutige Prognosen weltweit von einem Zuwachs des Energieverbrauchs um den Faktor 2 bis 4 zum Ende dieses Jahrhunderts ausgehen.

Die Kernfusion bietet die Option einer zukünftigen Energieversorgung, die sich durch praktisch unbegrenzte Brennstoffreserven sowie günstige Sicherheitseigenschaften und geringe Umweltbelastungen auszeichnet. Sie ist besonders für die Versorgung von Ballungszentren geeignet und kann im Verbund mit erneuerbaren Energiequellen, die sich aufgrund kleiner Leistungseinheiten eher für den Flächenbedarf eignen, einen wesentlichen Beitrag zu einem umweltverträglichen Energiesystem leisten.

Ziel der Fusionsforschung ist ein Strom lieferndes Kraftwerk, das –

ähnlich wie die Sonne – Energie aus der Verschmelzung von Wasserstoffkernen gewinnt. Aufbau und Funktionsweise eines solchen Kraftwerkes ist auf der Grundlage des heutigen Standes der Technik in Abb. 1 dargestellt. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich auf die Nummerierung in Abb.1.

Ein torusförmiger Vakuumbehälter (4) übernimmt die Rolle des Kessels in einem konventionellen Kraftwerk: Hier wird Energie in Form von Wärme frei.

Ausgangspunkt ist ein extrem dünnes Gasgemisch aus schwerem (Deuterium) und überschwe-

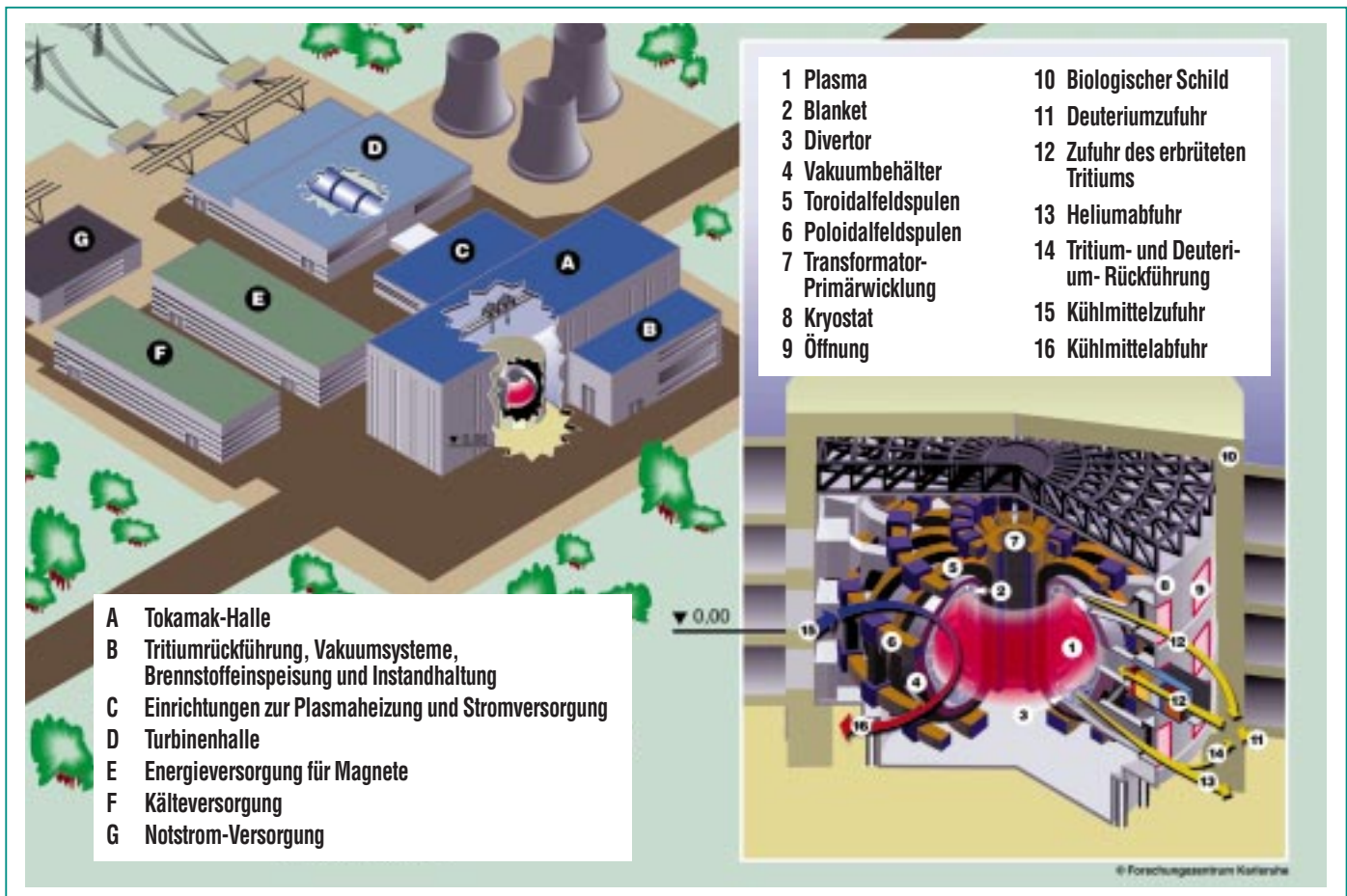


Abb. 1: Das Fusionskraftwerk der Zukunft.

rem (Tritium) Wasserstoff bei einem Druck, der etwa 1/250.000 des Atmosphärendrucks an der Erdoberfläche entspricht. Das heißt, dieser ca. 1000 m<sup>3</sup> große Vakuumbehälter enthält nur wenige Gramm des Deuterium/Tritium-Brennstoffs.

Eine Startheizung strahlt für einige Sekunden eine Leistung von 50 bis 100 Megawatt in die Brennkammer ein, wodurch das Brennstoffgemisch auf ca. 100 Millionen Grad aufgeheizt wird und in den Plasmazustand (1) übergeht: Der Atomverband ist aufgelöst und negative Elektronen und positiv geladene Atomkerne bewegen sich völlig unabhängig voneinander. Um Berührungen mit der Innenwand des Vakuumbehälters, der sog. Ersten Wand zu vermeiden, wird das heiße Plasma durch überlagerte starke Magnetfelder eingeschlossen, die im Einzelnen im folgenden Kapitel „Plasmaphysik – eine Kurzeinführung“ näher erläutert werden.

Die im heißen Plasma einsetzenden Fusionsreaktionen setzen

hochenergetische Heliumkerne und Neutronen frei. Die geladenen Heliumkerne können den „magnetischen Käfig“ nicht verlassen. Sie geben Energie durch Stöße mit Plasmateilchen ab und tragen so zur Heizung des Plasmas bei. Dagegen werden elektrisch neutralen Neutronen jedoch in ihrer Bewegung durch das Magnetfeld nicht beeinflusst. Sie werden im Blanket (2) abgebremst, die dabei entstehende Wärme wird über ein Kühlmittel (z.B. Helium) (15, 16) in einen konventionellen Kreislauf eingespeist. Die Stromproduktion erfolgt dann wie in einem konventionellen Kraftwerk durch eine Turbine mit nachgeschaltetem Generator.

Vakuumbehälter, Blanket und Magnete befinden sich innerhalb des Kryostaten (8), eines Tieftemperaturbehälters, der von einem biologischen Schild (10) umschlossen ist. Der Brennstoff Tritium wird im Blanket durch Neutroneneinfang in Lithium erbrütet, mittels Spülgas ausgetrieben, mit Deuterium vermischt und in das

brennende Plasma rückgeführt (11, 12). Die „Asche“ aus der Kernfusion, das Edelgas Helium, wird über den Divertor (3) abgesaugt und entsorgt, das mitgeführte unverbrannte Deuterium/Tritium-Gemisch wird in das Plasma rückgeführt (14).

Im Vergleich zu anderen Energiequellen bietet die Kernfusion eine riesige Energieausbeute: So wird aus der Fusion von einem Gramm Deuterium/Tritium-Gemisch eine Energiemenge von 2600 kWh frei, das entspricht der Verbrennung von 10 t Kohle. Daher kommt ein 1000 MW Fusionskraftwerk jährlich mit 100 kg Deuterium und 300 kg Lithium (aus dem 150 kg Tritium erbrütet wird) aus. Das heißt, ein Lastwagen mit ungefährlicher Ladung reicht aus, um den Jahresbedarf eines solchen Kraftwerkes zu decken. Ein vergleichbares Steinkohlewerk verbrennt im selben Zeitraum ca. 2.7 Millionen Tonnen Kohle. Um eine Familie ein Jahr lang mit Strom aus dem Kraftwerk zu versorgen, reichen 2 Liter Wasser und 250 g Gestein aus (Abb. 2).

<h2 style="text-align: center;">Rohstoffe der Kernfusion</h2> <p style="text-align: center;">für den Jahresverbrauch einer Familie (Elektrizität)</p>	
<p><b>75 mg Deuterium</b> <b>225 mg Lithium</b></p>	
<p><b>Zu finden in:</b></p> <p><b>2 Litern Wasser</b> <b>250 Gramm Gestein</b></p>	<p><b>Energieinhalt:</b></p> <p><b>48 000 Millionen Joule</b> <b>entsprechend</b> <b>1 000 Litern Öl</b></p>




Abb. 2: Rohstoffe der Kernfusion. [Quelle: FZJ]

Die in der Erdkruste verfügbaren Brennstoffreserven reichen für zehntausende von Jahren aus, um den derzeitigen weltweiten-Stromverbrauch zu decken. Im Gegensatz zu den fossilen Brennstoffen Öl, Erdgas und Kohle sind die Rohstoffe Wasser und Lithium in Gesteinen geografisch gleichmäßig verteilt, so dass Verteilungskämpfe um Energiequellen ausgeschlossen sind.

Zudem verfügt ein Fusionskraftwerk über günstige Sicherheitseigenschaften, d.h. aufgrund seiner niedrigen Energiedichte – vergleichbar mit einer 100 W Glühbirne – ist in einem Fusionsreaktor auch bei totalem Kühlmittel-ausfall eine Leistungsexkursion ausgeschlossen. Außerdem emittiert ein Fusionskraftwerk keine klimaschädlichen Gase.

Die Neutronen aus der Fusionsreaktion liefern einerseits die Energie zur Stromproduktion, führen aber andererseits zur Schädigung und Aktivierung des Strukturmaterials. Die hierbei entstehende Menge radioaktiven Materials ist zwar in der Menge mit dem radioaktiven Abfall eines Kernkraftwerkes gleicher Leistung vergleichbar, nicht aber hinsichtlich des Aktivitätsinventars. Die Materialentwicklung ist darauf ausgerichtet, durch geeignete Legierungen den Zeitraum, in dem das aktivierte Material zwischengelagert werden muss, wesentlich zu reduzieren. Nach heutigem Stand der Technik kann man davon ausgehen, dass etwa 80 % des anfallenden radioaktiven Abfalls nach weniger als 100 Jahren rückgeführt werden können und nur der Rest für ein-

ge Jahrhunderte, jedoch nicht für Jahrtausende zwischengelagert werden muss.

### Physikalische Grundlagen der Kernfusion

Der Fusion von Atomkernen steht die elektrostatische Abstoßung aufgrund ihrer positiven Ladung entgegen. Die abstoßende Kraft ist proportional zur Kernladung und umgekehrt proportional zum Abstand der Kerne. Daher eignen sich Kerne mit niedriger Ladungszahl für die Fusion, also Wasserstoffkerne. Hinzu kommt, dass die Fusion von Wasserstoffkernen einen besonders hohen Betrag an Bindungsenergie freisetzt. Abb. 3 veranschaulicht den Vorgang der Kernfusion.

Stellen wir uns vor, im Achsenkreuz sitzt ein Wasserstoffkern und ein zweiter rast mit hoher Geschwindigkeit von rechts nach links längs der Abszisse. Je kürzer der Abstand, umso stärker

wird die Abstoßung, oder bildlich gesprochen, der Wasserstoffkern muss die Coulomb-Barriere überwinden. Ist die Spitze des Walls erreicht, so beginnt im Abstand von  $10^{-13}$ cm die starke Kernkraft zu wirken, die Abstoßung kippt um in eine Anziehung und es kommt zur Fusion der beiden Wasserstoffkerne. Um den Wall zu erklimmen, benötigt der Wasserstoffkern jedoch eine kinetische Energie, die etwa 2,6 Milliarden Grad entspricht. Eine derartige Temperatur kommt im Universum nicht vor. Dass Kernfusion doch möglich ist, lässt sich durch den quantenphysikalischen Tunneleffekt erklären: je höher der Wasserstoffkern den Wall erklimmen hat, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass er sich einen Tunnel durch den Wall gräbt und so in den Wirkungsbereich der starken Kernkraft gelangt.

Um einen Netto-Energiegewinn in einem Fusionsreaktor zu erzielen, ist eine gewisse Mindestzahl von Fusionsprozessen pro Zeiteinheit

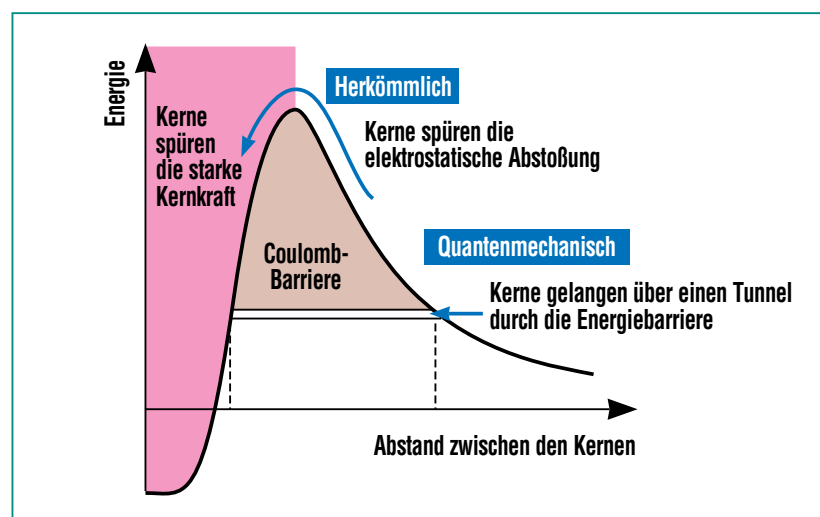


Abb. 3: Der quantenphysikalische Tunneleffekt macht die Kernfusion erst möglich.

notwendig. Daher muss sowohl die Wahrscheinlichkeit, dass bei einem Zusammenstoß zweier Wasserstoffkerne (z.B. Deuterium und Tritium) ein Fusionsprozess stattfindet, als auch die Anzahl der pro Zeiteinheit stattfindenden Stöße maximiert werden, wozu eine hohe kinetische Energie notwendig ist. Allerdings ist sogar bei einer kinetischen Energie von 10 keV die Wahrscheinlichkeit elastischer Stöße um mehrere Größenordnungen höher als die eines Fusionsprozesses, daher kann durch elektrostatische Beschleunigung (z. B. Teilchenbeschleuniger) keine netto Energieausbeute erreicht werden. Der einzig gangbare Weg ist daher, ein Gasgemisch aus Deuterium und Tritium in einem Behälter einzuschließen und soweit aufzuheizen, dass die Energie, die durch Fusionsprozesse freigesetzt wird, den zum Einschluss und zur Aufheizung des Gases nötigen Energiebedarf übersteigt. Ein Gas, dessen Teilchen die notwendige kinetische Energie von 10 keV besitzen, hat allerdings eine Temperatur von etwa 100 Millionen Grad Celsius. Bei derartigen Temperaturen befindet sich das Gas im Plasmazustand, d.h. der Atomverband ist aufgelöst und Atomkerne und Elektronen bewegen sich unabhängig voneinander. Um das heiße Plasma von der Behälterwand zu isolieren, denn kein Werkstoff hält derartige Temperaturen aus, gibt es zwei Möglichkeiten: der magnetische Einschluss und der Trägheitseinschluss.

Unabhängig von der Methode des Plasmaeinschlusses müssen für einen Netto-Energiegewinn

folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Die Temperatur sollte in der Nähe des maximalen Fusionsquerschnitts sein, also ~ 10 bis 20 keV betragen. Eine niedrigere Temperatur kann zum Teil durch Änderungen der beiden nachfolgenden Bedingungen ausgeglichen werden, was manchmal für den Trägheitseinschluss wichtig ist.
- Die Anzahl der Teilchen pro Volumeneinheit ( $m^3$ ) sollte etwa  $10^{20}$  oder höher (bei Trägheitseinschluss) sein um eine genügende Zahl von Stößen pro Zeiteinheit zu erzielen.
- Der Einschluss von Energie und Teilchen sollte einige

Sekunden (im Trägheitseinschluss Millisekunden) betragen. Der Einschluss hat im Prinzip nichts mit der Lebensdauer des heißen Plasma Zustandes zu tun, sondern gibt an, wie lange die Energie und die Teilchen im Mittel im Plasma verweilen. Das bedeutet, dass mehr Energie und Teilchen pro Zeiteinheit zugeführt werden müssen um den Plasmazustand aufrechtzuerhalten, wenn der Einschluss schlechter wird.

Keine der obigen Bedingungen alleine kann eine Netto-Energieausbeute garantieren, sondern nur die richtige Kombination obiger Bedingungen, charakterisiert durch das so genannte „Trippel Pro-

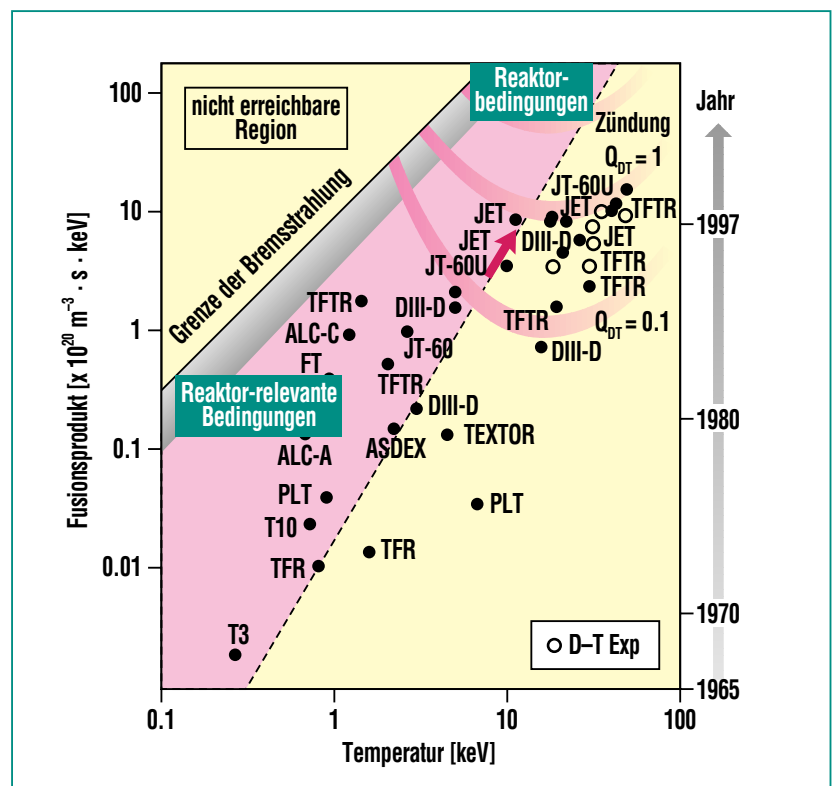


Abb. 4: Das Tripelprodukt aus Temperatur, Dichte und Einschlusszeit; die Zündbedingung ist dann erreicht, wenn dieses Produkt den Wert  $6 \times 10^{21}$  erreicht.



duct“. Die Größe dieses Produkts ist ein Maß für die durch den Fusionsprozess freigesetzte Energie. Hierbei ist berücksichtigt, dass das Plasma neben den externen Heizungen auch durch die aus dem Fusionsprozess freigesetzten Heliumkerne (Alpha-Teilchen) geheizt wird, die anfänglich eine um zwei Größenordnungen höhere kinetische Energie als die Plasmateilchen bei 10 keV besitzen. Wenn die Fusionsrate groß genug ist, dann reicht diese sog. Alphaheizung alleine aus, um das Plasma auf Betriebstemperatur zu halten. Diesen Zustand nennt man Zündung. Die Zündbedingung ist dann gegeben, wenn die Temperatur etwa 10 keV beträgt und das Produkt aus Temperatur (in keV),

Dichte (in Teilchen pro  $m^3$ ) und Einschlusszeit (in Sekunden) etwa  $6 \times 10^{21}$  beträgt. Wie aus Abb. 4 zu erkennen ist, hat die internationale Fusionsforschung etwa 3.5 Größenordnungen in den letzten 30 Jahren auf diesem Weg geschafft, vergleichbar mit der Geschwindigkeit der Entwicklung im IT-Sektor.

### Aktueller Stand der Fusionsforschung und Ausblick

Wie aus Abb. 4 zu erkennen ist, hat die weltweit größte Tokamak-Anlage, der Joint European Torus (JET) den „Break-Even“-Punkt fast erreicht: Im Jahr 1997 wurde in einer Deuterium-Tritium-Kampagne (Experimentieranlagen ar-

beiten gewöhnlich mit Deuterium-Deuterium, um das radioaktive Tritium zu vermeiden) für einige Sekunden 65 % der von außen zugeführten Energie durch Energiefreisetzung aus der Fusionsreaktion wieder zurück gewonnen. Um die Grundlagen für den Bau eines Leistungskraftwerkes zu schaffen, muss in einem nächsten Schritt die Realisierbarkeit eines lang brennenden, reaktortypischen Plasmas sowie eine Reihe von bereits entwickelten Reaktorkomponenten erprobt werden. Dazu gehören supraleitende Magnete, Blanket und Divertor zur Energieauskopplung, Tritium führende Systeme und Fernhandlungstechnik. Dieses Ziel verfolgt der in weltweiter Zu-

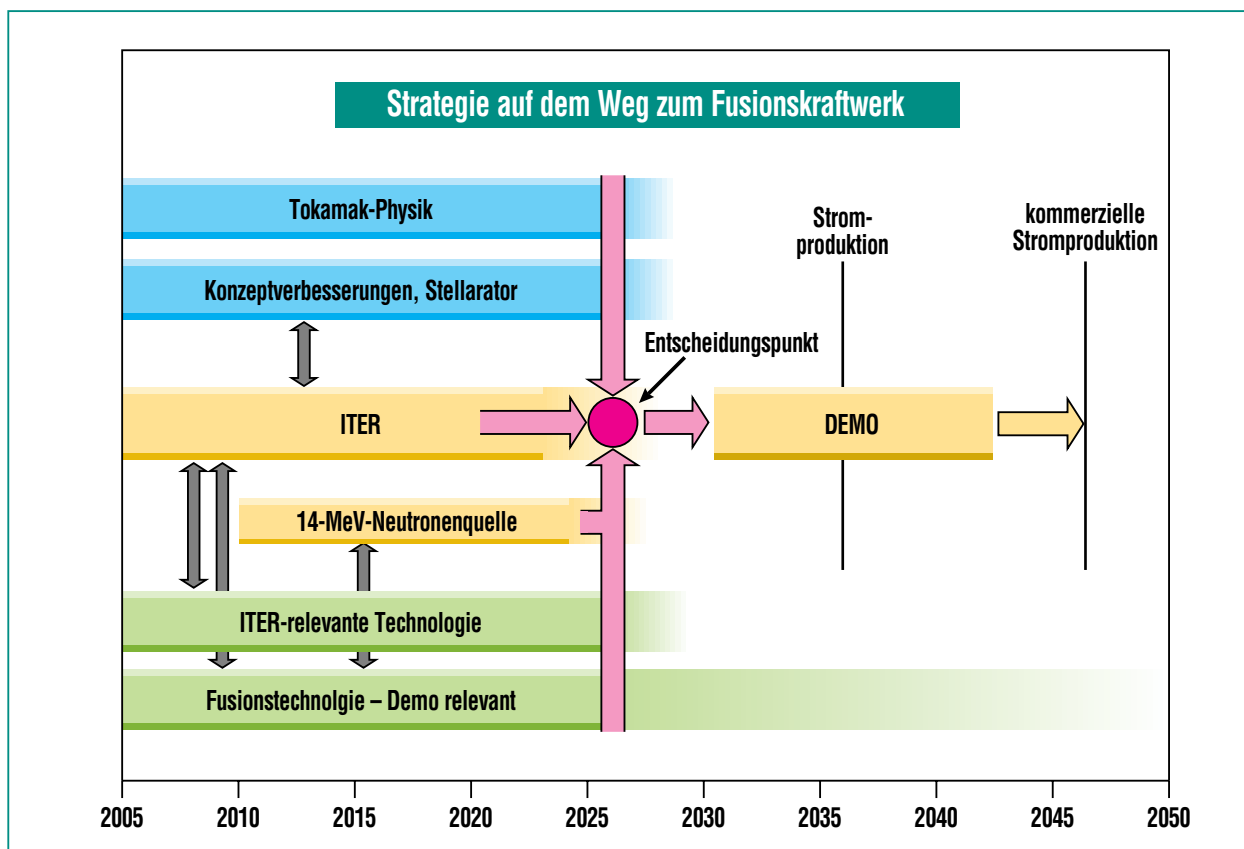


Abb. 5: Die Roadmap zur kommerziellen Nutzung der Fusion.

sammenarbeit geplante Experimentalreaktor ITER. Projektpartner sind die Europäische Union, USA, Japan, die Russische Föderation, China und Südkorea. Mit dem Bau der Anlage wird voraussichtlich im Jahr 2005 begonnen, Beginn des Betriebs ist 2015 geplant. Man geht heute davon aus, dass nach zehnjähriger Betriebszeit genügend plasmaphysikalische und technologische Ergebnisse vorliegen, um mit der Planung eines Demonstrations-Leistungskraftwerkes beginnen zu können, sodass etwa Ende der dreißiger Jahre erstmals Strom aus einem Fusionskraftwerk in das Netz eingespeist werden kann.

Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die rechtzeitige Verfügbarkeit von Werkstoffen für plasmanaher Komponenten, die über einen Zeitraum von mehreren Jahren der energiereichen Neutronen- und Wärmestrahlung standhalten können. Zur Qualifizierung solcher Materialien wird derzeit unter der Schirmherrschaft der Internationalen Ener-

gie Agentur (IEA) eine Beschleuniger-basierte Neutronenquelle geplant. Die in Abb. 5 dargestellte Roadmap zur kommerziellen Nutzung der Fusion gibt einen Überblick über die physikalischen und technologischen Entwicklungen der nächsten zwanzig Jahre auf diesem Weg sowie über die geplanten Anlagen.

Forschungseinrichtungen aus aller Welt arbeiten an diesem ehrgeizigen Ziel. In Europa haben sich Forschungseinrichtungen aus allen Ländern der Europäischen Union im European Fusion Development Agreement (EFDA) zusammengeschlossen, um das europäische Fusionsprogramm umzusetzen. Die Beiträge des Forschungszentrums umfassen die Bereiche

- Entwicklung und Test von Mikrowellenröhren (Gyrotrons) zur Plasmaheizung,
- Entwicklung und Test von supraleitenden Magnetspulen zum Einschluss des Plasmas sowie von supraleitenden Stromzuführungen,

- Konzeptionelle Entwicklung und Konstruktion der Komponenten Blanket und Divertor zur Energieauskopplung,
- Entwicklung und Test von Tritium führenden Komponenten und Systemen,
- Werkstoffentwicklung und federführende Mitarbeit bei der Planung der Neutronenquelle IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility),
- Sicherheitsuntersuchungen für ITER,
- Entwicklung eines globalen Plasmamodells,

die im Einzelnen in dieser Broschüre dargestellt werden.