

## **Fragenkatalog zur öffentlichen Anhörung „Kernfusionsforschung“**

### **Landtag Mecklenburg-Vorpommern**

Antworten: T. Klinger

#### **Fraktion der SPD**

*1. Wie ordnen Sie den gegenwärtig erreichten Stand und die Perspektiven der Ergebnisse der Fusionsforschung in Greifswald im Vergleich zur weltweit bisher durchgeführten Fusionsforschung ein?*

Der allgemein akzeptierte Erfolgsparameter für die Fusion hat sich seit den Anfängen der Forschung um den Faktor 100.000 erhöht; es fehlt noch ein Faktor 10 zum Ziel. Nach der Inbetriebnahme wird Wendelstein 7-X eine hochmoderne, weltweit einzigartige Forschungsanlage sein. Konzeptionell geht Wendelstein 7-X einen gewaltigen Schritt nach vorne. Die Anlage wird die Kraftwerkstauglichkeit des Stellaratorkonzeptes und seine Fähigkeit zum dauerhaften Einschluss eines heißen Plasmas demonstrieren. Man kann erwarten, dass Wendelstein 7-X damit an die Weltelite anschließt und die hervorragende deutsche Position in der Hochtemperatur-Plasmaphysik festigt.

*2. Welche Bedeutung hat aus Ihrer Sicht die cluster- und campusartig strukturierte Plasmaforschung des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik IPP Greifswald bei der Sicherung und in der Weiterentwicklung der universitären Forschungs- und Lehrexzellenzen an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald im weltweiten Vergleich mit anderen universitären und außeruniversitären Wissenschaftsstandorten der Physik?*

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) bildet gemeinsam mit der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald und dem Leibniz Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP) ein weltweit wohl einzigartiges Cluster der Plasmaforschung. Das INP deckt dabei den anwendungsorientierten Bereich der Niedertemperaturplasmaphysik ab, die Universität Grundlagenaspekte und die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie das IPP den Bereich der Hochtemperaturplasmaphysik und Fusionsforschung. Damit sind alle Facetten dieses Forschungsgebietes an einem Ort vorhanden, was nicht einmal an den traditionellen Plasmaforschungs-Standorten Princeton und Oxford der Fall ist. Mit der vollen Aufnahme des wissenschaftlichen Betriebes ab 2015 wird sich das IPP noch intensiver mit den Einrichtungen vor Ort in Forschung und Lehre vernetzen. Aus der ganzen Welt wird Wendelstein 7-X Spitzenforscher nach Greifswald ziehen. Neben der zentralen Einbettung in das europäische Forschungsprogramm gibt es zudem bilaterale Vereinbarungen mit den USA (Princeton, Oak Ridge), Frankreich, Spanien, Polen, Ungarn und Belgien. Die US-Regierung und die polnische Regierung haben bereits zusätzliche Mittel von jeweils etwa 10 Mio € zu Wendelstein 7-X beigetragen, um sich privilegierten Zugang zu der Anlage zu sichern. Dies unterstreicht die künftige Attraktivität des Standortes.

*3. Was besagen und bescheinigen die bisher durchgeführten externen und unabhängigen wissenschaftlichen Evaluierungen der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) und der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF) dem IPP Greifswald hinsichtlich seiner internationalen Bedeutung im Bereich der Energieforschung sowohl aus erkenntnis- als auch aus problemorientierter Sicht?*

Das IPP wird von der Max-Planck-Gesellschaft und der Helmholtz-Gemeinschaft regelmäßig evaluiert. Die international besetzten Evaluierungskomitees haben dem IPP bisher stets eine weltweite Spitzenstellung mit Bestnoten bescheinigt. Als Vergleichsmaßstab dienten die Nationallaboratorien und Universitäten in den USA, Japan und Europa. Die Evaluierungen der Max-Planck-Gesellschaft legen dabei den Schwerpunkt auf die wissenschaftlichen Ziele der Grundlagenforschung, die Helmholtz-Gemeinschaft auf die Stellung innerhalb des Forschungsbereiches Energie. Bedingt durch seine Spitzenposition zieht das IPP Wissenschaftler und Führungspersonal aus der ganzen Welt an. So ergingen die letzten Berufungen auf Direktorenposten an Wissenschaftler in hochrangigen Positionen an führenden Einrichtungen in Großbritannien, USA und Frankreich.

*4. Wie bewerten Sie die Kernfusionsforschung im Zusammenhang mit der zukünftigen energiestrategischen Bedeutung für Deutschland, die Europäische Union und weltweit?*

Die Fusionsforschung kann erst nach 2050 zur Lösung des Energieproblems beitragen. Daher ist sie in Energieszenarien bis 2050 (u.a. im Energiekonzept der Bundesregierung) natürlich nicht enthalten. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts erwartet man global allerdings eine weitere Steigerung des Energieverbrauchs um etwa einen Faktor zwei, der Elektroenergieverbrauch wird um rund einen Faktor drei steigen. Zugleich soll der CO<sub>2</sub>-Ausstoß stark reduziert werden, wobei die Speicherung von CO<sub>2</sub> zumindest in Deutschland stark umstritten ist. Die Verwendung fossiler Brennstoffe muss also drastisch reduziert werden. Hier kann die Kernfusion in der zweiten Jahrhunderthälfte einen Beitrag leisten und langfristig die Kernspaltung ersetzen. Aufgabe der Forschung ist es, die Option Fusion zu Verfügung zu stellen. Ob die Technologie in Zukunft angewendet wird, ist unter anderem abhängig von politischen und gesellschaftlichen Entscheidungen. Ohne Forschung heute steht die Option Fusion später nicht zur Verfügung. Der europäische Energiekommissar Oettinger erklärte kürzlich, dass die Kernfusion eine wesentliche Rolle in der künftigen Energieversorgung Europas spielen könnte. Das Engagement der sieben ITER-Partner, die die Hälfte der Weltbevölkerung repräsentieren, zeigt das große weltweite Interesse an der Fusion. In Asien ist dieses Interesse aufgrund des erwarteten Anstiegs des dortigen Energiebedarfs besonders groß. Beispielsweise hat China unlängst ein starkes nationales Fusionsforschungsprogramm in der Größenordnung von rund 10 Milliarden \$ angekündigt. In Südkorea wurde ein eigenes Gesetz zur Förderung der Fusionsforschung erlassen und es wurden bereits zwei mögliche Standorte für ein Fusionskraftwerk festgelegt.

*5. In welchem Zeitraum erwarten Sie praxisreife Forschungsergebnisse, die zum Bau eines Fusionskraftwerks führen? Wie lange würde es dann noch dauern, bis ein funktionsfähiges Fusionskraftwerk in Betrieb geht?*

Im europäischen Fusionsprogramm wurde im vergangenen Jahr ein „Fahrplan“ zur Fusionsenergie bis 2050 erarbeitet. Er beschreibt, welche Elemente noch entwickelt werden müssen, um ein Fusionskraftwerk bauen zu können. Ein wesentlicher Meilenstein auf dem Weg zum Kraftwerk ist der internationale Testreaktor ITER, der eine positive Leistungsbilanz vorführen soll: ITER wird wesentlich mehr Fusionsleistung erzeugen als zur Heizung des Plasmas aufzuwenden ist. Daneben soll die Anlage technologische Fragen untersuchen, etwa das Herstellen von Tritium aus Lithium. Basierend auf den ITER-Ergebnissen und auf parallelen Untersuchungen zu physikalischen und technologischen Fragen kann dann – so der europäische Fusionsfahrplan – der Entwurf für ein Demonstrationskraftwerk entwickelt werden.

Die entscheidenden Experimente an ITER sind für 2027 geplant. Infolgedessen könnte etwa 2035 der Bau eines Demonstrationskraftwerks beginnen, das dann etwa 2045 in Betrieb gehen könnte. Dieses voll funktionsfähige Kraftwerk würde bereits Strom ans Netz liefern. Die tatsächliche Entwicklung der Fusion hängt von der Finanzierung, dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt und der Geschwindigkeit der politischen Entscheidungsfindung ab. So hat beispielsweise der politische Entscheidungsprozess zum Bau von ITER – von der Ankündigung durch Reagan und Gorbatschow bis zur Entscheidung über den Standort – insgesamt 20 Jahre gedauert.

*6. Wie stellen Sie sich die Umsetzung der Energiegewinnung durch Kernfusionskraftwerke technisch und finanziell vor?*

Das internationale Gemeinschaftsprojekt ITER soll wesentliche Grundlagen für den Bau eines Demonstrationskraftwerks liefern. Da ein Kraftwerk – anders als ITER – kontinuierlich oder zumindest in mehrstündigen Pulsen arbeiten soll, wird es wesentlich mehr Neutronen produzieren als ITER. Für ein Demonstrationskraftwerk ist es deshalb notwendig, die den Neutronen ausgesetzten Materialien zu qualifizieren. Ob dies separat mit einer speziellen Neutronenquelle („IFMIF“, siehe auch Antwort Frage 33) oder direkt beim Betrieb des Kraftwerks geschehen soll, wird derzeit beraten. Ein weiterer Schwerpunkt der Fusionsforschung ist der Dauerbetrieb eines Fusionskraftwerks. Anders als Tokamaks wie ITER können Stellaratoren wie Wendelstein 7-X ihr Magnetfeld ohne weitere Hilfsmittel stationär erzeugen. Allerdings besitzen Stellaratoren andere Nachteile, die erst durch eine aufwändige Optimierung, wie sie Wendelstein 7-X zugrunde liegt, überwunden werden können. Welcher Anlagentypen zu einem ökonomischeren Kraftwerk führt, werden die zukünftigen Forschungsergebnisse zeigen.

Um die Kosten für das komplexe Projekt auf mehrere Schultern zu verteilen, wird ITER in einer arbeitsteiligen internationalen Kooperation errichtet und ab 2020 auch betrieben werden. Arbeitsteilung und in breite Kooperationen haben Tradition in der Fusionsforschung. Es ist jedoch denkbar, dass die heutigen ITER-Partner – EU, Japan, USA, China, Russland, Südkorea und Indien – später jeweils eigene Demonstrationskraftwerke bauen werden. Während die bisherige Fusionsforschung mit öffentlichen Mitteln bezahlt wird, sind für die ersten Demonstrationskraftwerke „public-private-partnerships“ anzustreben, zumal für deren Bau industrielles Know-how unentbehrlich sein wird. Die finanzielle Beteiligung der Industrie wird davon abhängen, in welcher Zeit ein Gewinn zu erwarten ist. Aus heutiger Sicht ist es nicht möglich, hier eine eindeutige Antwort zu geben.

*7. Welche Möglichkeiten sehen Sie für die öffentliche Hand dafür, dass die zu erwartenden Forschungsergebnisse auf Grund der erheblichen öffentlichen Investitionen nicht an die großen Privatunternehmen verschenkt werden, wenn diese dann die Fusionskraftwerke bauen und betreiben würden?*

Von der öffentlichen Hand finanzierte Grundlagenforschung ist sehr oft die Grundlage für Entwicklungen, die später von der Industrie verwertet werden. Das ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für den Industriestandort Deutschland. Aus diesem Grund ist der Transfer von wissenschaftlichen Erkenntnissen aus der Forschung in die Industrie auch ein wesentlicher Erfolgsindikator bei Evaluationen der Wissenschaftsorganisationen. In diesem Sinne wäre es sehr zu begrüßen, wenn die deutsche Industrie künftig Fusionskraftwerke vermarktet. Angesichts des starken Engagements in Asien ist jedoch zu befürchten, dass die dortige Industrie –

aufbauend auf den Ergebnissen der internationalen Grundlagenforschung – das erste Fusionskraftwerk bauen wird. China beispielsweise intensiviert zurzeit seine Anstrengungen in der Fusionsforschung sehr stark: Bis 2100 sollen 100 Gigawatt Leistung aus Fusionskraftwerken gewonnen und damit schrittweise die Spaltungskraftwerke ersetzt werden.

8. *Welche technischen Laufzeiten werden Fusionskraftwerke voraussichtlich haben? Welche Wartungszyklen sind nach heutigem Kenntnisstand bereits absehbar?*

Aus heutiger Sicht ist es schwierig, genaue Aussagen über die Lebensdauer der fusionsspezifischen Kraftwerkskomponenten zu machen. Für Materialermüdung verantwortlich sind vor allem die Neutronenbelastung und die Wärmeflüsse aus dem Plasma auf spezielle Wandkomponenten – auf das so genannte „Blanket“, das die Neutronen absorbiert und aus Lithium Tritium produziert, und auf den Divertor, der die Wärmeflüsse aus dem Plasma aufnimmt und die Fusionsasche Helium abführt. Die europäische Kraftwerksstudie

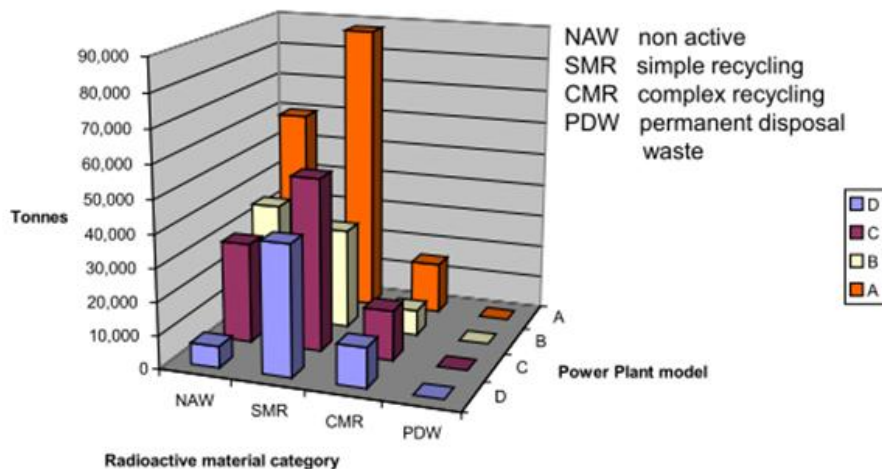
*“A Conceptual Study of Commercial Fusion Powers Plants“  
Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)  
EFDA(05)-27/4.10*

kommt für den Divertor auf rund 2,5 und für das Blanket auf 5 volle Betriebsjahre. Alle anderen Wartungen können im Schatten dieser Austausch-Aktionen ablaufen. Für die Gesamtverfügbarkeit einschließlich der Wartungszyklen für Blanket und Divertor ergibt sich damit ein Wert von 75 Prozent. Begrenzend für die Gesamtlebensdauer eines Fusionskraftwerks ist die Materialermüdung der Teile, die nicht ausgetauscht werden sollen. Nach derzeitiger Einschätzung sollten 40 Jahre erreichbar sein.

9. *Welchen Einfluss auf die Umwelt hätte ein Fusionskraftwerk? Bitte benennen Sie insbesondere die Emissionen, Strahlungen und Abfallprodukte die während des Betriebs entstehen sowie die Notwendigkeiten für die Nachsorge nach Stilllegung eines Fusionskraftwerkes.*

Die Fusionsreaktion selbst erzeugt geringste Mengen des Edelgases Helium, das in die Atmosphäre entlassen werden kann. (Aus heutiger Sicht ist Helium allerdings als Industriegas so wertvoll, dass ein Auffangen und Weiterverwenden sinnvoll erscheint.) Das radioaktive Wasserstoffisotop Tritium wird aus Lithium im Blanket nur in den Mengen erzeugt, die wieder verbraucht werden (geschlossener Brennstoffkreislauf). Die gesamte Anlage einschließlich Aufbereitungs- und Trennungskreisläufen enthält nicht mehr als einige Kilogramm Tritium. Tritium besitzt eine Halbwertszeit von 12 Jahren und kann sich in der Umwelt deshalb nicht ansammeln. Entsprechend finden sich nur extrem kleine Mengen natürlich entstehenden Tritiums. Die in der Fusionsreaktion entstehenden Neutronen aktivieren die Brennkammer, das Blanket und umliegende Strukturen. In der europäischen Kraftwerksstudie *“A Conceptual Study of Commercial Fusion Powers Plants“* (Referenz siehe Antwort auf Frage 8) wurden vier Kraftwerkstypen untersucht (A, B, C und D). Sie unterscheiden sich in den verwendeten Technologien z.B. für Blanket oder Kühlmittel und reichen von relativ kurzfristig erreichbaren technischen Lösungen bis zu Konzepten, die einen höheren Forschungsaufwand erfordern. Für alle vier Typen lässt sich die gesamte Kraftwerksmasse hundert Jahre nach der Stilllegung in vier Kategorien einteilen: nicht aktiver Abfall (non-active waste, NAW), einfach zu rezyklierendes Material („simple recycle material“ = SMR) und aufwändig

zu rezyklierendes Material („complex recycle material“ = CMR). Ein Teil des Materials in der Kategorie SMR kann manuell bearbeitet werden. Material in der Kategorie „permanent disposal waste“ (PDW) ist nicht mehr vorhanden. Kein Abfall muss also endgelagert werden (siehe Abbildung unten). Während des Betriebs liegt die Strahlungsbelastung des Kraftwerkspersonals innerhalb der gesetzlich festgelegten Grenzwerte (siehe auch Antwort auf Fragen 13 bis 15 und 38 bis 49).



10. *Wie hoch schätzen Sie das Risiko ein, dass die Forschungsergebnisse nicht zur industriellen Energiegewinnung führen?*

Ergebnisse von Grundlagenforschung lassen sich prinzipiell nicht genau vorhersagen. In der europäischen Diskussion zum „Fusionsfahrplan“ wurden jedoch keine unüberwindlichen Hindernisse für den Weg zum Reaktor gefunden. Man kann daher zuversichtlich sein, dass die Fusionsforschung letztlich zu einem funktionierenden Kraftwerk führt. Identifiziert wurden allerdings physikalische und technologische Herausforderungen: die Verbesserung des Konzepts zur Wärmeabfuhr aus dem Plasma, die Entwicklung von erosions- und hitzebeständigen Materialien für die erste Wand, weitere Fortschritte bei der Entwicklung von neutronenbeständigen Strukturmaterialien mit geringem Aktivierungspotential sowie die Weiterentwicklung der Komponenten für den Brennstoffkreislauf. Die Wissenschaft legt die physikalischen und technologischen Grundlagen für ein künftiges Kraftwerk. Ob die Fusionsenergie schließlich genutzt wird, hängt auch von politischen Entscheidungen und gesellschaftlicher Akzeptanz ab.

11. *In welchen Bereichen könnten durch die Kernfusionsforschung erzielte Forschungsergebnisse zu Innovationen führen, die auch in Anwendungsbereichen außerhalb der Kernfusion genutzt werden können? Nennen Sie soweit möglich Beispiele, wo dies bereits geschehen ist bzw. woran derzeit weitergeforscht wird.*

Die Hochtemperatur-Plasmaphysik ist eng verflochten mit der Plasma-Astrophysik, die im interplanetaren Weltraum und in der Sonnenatmosphäre von großer Bedeutung ist. Daher hat das IPP zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, dem Max-Planck-Institut für Astrophysik, der Princeton University und dem Princeton Plasma Physics Laboratory (USA) das „Max-Planck Princeton Center for Plasma Physics“ gegründet. Dieses wird – nach einem strengen Auswahlverfahren – von zentralen Mitteln der Max-Planck-Gesellschaft gefördert. Hier werden wissenschaftliche Ergebnisse, Messverfahren und Computercodes ausgetauscht und in ein Gesamtbild eingeordnet. Dies zeigt die unmittelbare

Relevanz der Hochtemperatur-Plasmaphysik (in der Frage als „Kernfusionsforschung“ bezeichnet) für andere Gebiete der Grundlagenforschung.

Auf der Anwendungsseite sind zu nennen: Hochbelastete Materialien, Hochleistungs-Mikrowellen, Plasmaquellen, Energietechnik, Tieftemperatur-Technologie, Vakuumtechnologie und Supraleitung. Auf all diesen Gebieten hält das IPP Patente. Nicht zu unterschätzen ist der Trainingseffekt, der in der Industrie während der Abwicklung der höchst anspruchsvollen Aufträge zur Errichtung des Wendelstein 7-X auftritt: Unternehmen, die solche Aufträge in enger Zusammenarbeit mit dem IPP abgewickelt haben, sind nach dem Auftrag technologisch besser aufgestellt und können neue Marktpositionen erobern. Ein Beispiel ist der (deutsche) Hersteller der Magnete für Wendelstein 7-X, der kürzlich einen Großauftrag der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) erhalten hat:

<http://www.gsi.de/start/aktuelles/detailseite/datum/2012/02/23/113-supraleitende-high-tech-magnete-fuer-die-beschleunigeranlage-fair.htm>

Auch im Land Mecklenburg-Vorpommern haben Industrieunternehmen von diesem Qualifizierungsprogramm profitiert. So konnte etwa die Firma Dockweiler (Neustadt-Gleve) ihr Produktportfolio auf Vakuumkomponenten erweitern, nachdem entsprechende Aufträge für Wendelstein 7-X erfolgreich abgewickelt wurden. Weitere Informationen und Nachweise hierzu finden sich in folgender Broschüre:

[http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/broschueren/w7x\\_s.pdf](http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/pr/publikationen/broschueren/w7x_s.pdf)

*12. Wodurch würden sich vor allem hinsichtlich der Gefahren und der Endlagerungsproblematik die auf Basis der Forschungsergebnisse des Wendelstein 7-X Projektes noch zu erbauenden Kernfusionskraftwerken von den bisherigen Atomkraftwerke unterscheiden?*

Wendelstein 7-X wird kein Tritium verwenden. Somit entstehen keine größeren Mengen an aktivierten Materialien. Die geringen Mengen, die während des Betriebs mit Deuterium-Plasmen aktiviert werden, können nach etwa 10 bis 20 Jahren Ruhezeit ohne weitere Einschränkung wieder verwendet werden. Bezüglich der Strahlenschutzvorkehrungen unterscheidet sich Wendelstein 7-X nicht von bereits laufenden Fusionsexperimenten, z.B. ASDEX Upgrade im IPP in Garching. Folglich werden die Forschungsergebnisse des Wendelstein 7-X keine neuartigen Erkenntnisse zur Sicherheit eines Fusionskraftwerks liefern.

Für die Folgen von Störfällen in einem Fusionskraftwerk siehe Antwort Frage 39.

*13. Welchen forschungsethischen Grundsätzen fühlt sich das Projektteam von Wendelstein 7-X verpflichtet?*

Das Projektteam von Wendelstein 7-X fühlt sich den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie von der Max-Planck-Gesellschaft verabschiedet wurden, ohne jede Einschränkung verpflichtet.

Referenzen:

[http://www.mpg.de/229457/Regeln\\_guter\\_wiss\\_Praxis\\_\\_Volltext-Dokument\\_.pdf](http://www.mpg.de/229457/Regeln_guter_wiss_Praxis__Volltext-Dokument_.pdf)  
<http://www.mpg.de/5083/Stellungnahmen>

Es ist selbstverständlich, dass für das IPP die Gesundheit und Sicherheit von Mitarbeitern und Bevölkerung ein hohes, unbedingt schützenswertes Gut ist. Insbesondere wird das IPP alle gesetzlichen Regelungen zum Strahlenschutz erfüllen.

*14. Welche Gefahren für die Bevölkerung bestehen theoretisch wie praktisch durch die beim Betrieb von Wendelstein 7-X emittierte Strahlung? Welche Erfahrungen wurden durch die Vorläuferexperimente Wendelstein 7-X, wie bspw. Wendelstein 7-AS und andere Kernfusionsexperimente, gewonnen?*

Für die Bevölkerung besteht durch die beim Betrieb von Wendelstein 7-X entstehende Strahlung theoretisch wie praktisch keine Gefährdung. Das gleiche galt für die Vorläufer-Anlagen und gilt für andere Kernfusionsexperimente ähnlichen Typs. Die IPP-Anlage ASDEX Upgrade in Garching zum Beispiel erzeugt ähnliche Neutronenflüsse, wie sie Wendelstein 7-X haben wird. Es ist nie zu Gefährdungen für die Bevölkerung gekommen. Da die Sicherheitsabteilungen der beiden Institutsstandorte zentral organisiert sind, ist sichergestellt, dass alle Erfahrungen des seit 1991 betriebenen Experiments ebenso in Greifswald zur Verfügung stehen werden.

*15. Welche Maßnahmen wurden bisher ergriffen, um die Sicherheit der Bevölkerung und Mitarbeiter zu gewährleisten? Was passiert, wenn im Laufe des Projektes neue Erkenntnisse gewonnen werden, die eine Erhöhung der Strahlungsgefahren vermuten lassen?*

Alle erforderlichen Maßnahmen werden im Sicherheitsbericht zur Errichtungsgenehmigung und dem zugehörigen Sachverständigengutachten festgelegt und dementsprechend umgesetzt. Die planmäßige bauliche Auslegung von Wendelstein 7-X (zusammen mit der noch in der Fertigstellung befindlichen lokalen Abschirmung) entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Sie werden bei Inbetriebnahme gewährleisten, dass alle Anforderungen der Strahlenschutzverordnung zur Sicherheit von Bevölkerung und Mitarbeitern eingehalten werden. Da Wendelstein 7-X eine regelbare Strahlungsquelle ist, deren Emission während des Betriebes ständig überwacht und dokumentiert wird, kann durch Anpassung der Betriebsparameter zu jeder Zeit die sichere Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte der StrlSchV gewährleistet werden.

## **Fraktion der CDU**

*16. Wie bewerten Sie die wirtschaftlichen Impulse der Kernfusionsforschung am Standort Greifswald für die Hansestadt Greifswald und das Land Mecklenburg-Vorpommern?*

Das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik betreibt Grundlagenforschung zur Hochtemperatur-Plasmaphysik. Ziel ist die Entwicklung einer neuen Energiequelle. Der jährliche Haushalt für Personalmittel für die derzeit ca. 400 vertraglich gebundenen Mitarbeiter am IPP Greifswald (ohne Arbeitnehmerüberlassungen) beläuft sich gegenwärtig auf rund 24 Mio€, die unmittelbar der Universitäts- und Hansestadt Greifswald sowie der unmittelbaren Region zu Gute kommen. Während des Aufbaus von Wendelstein 7-X wurden bislang Aufträge im Wert von über 70 Mio€ an Unternehmen im Land Mecklenburg-Vorpommern vergeben. Hinzu kommen Dienstleistungsaufträge in erheblichem Umfang, die vom Betriebsmittelhaushalt des IPP

gedeckt werden. Auch das Institutsgebäude – mit Kosten in Höhe von 100 Mio€ – wurde maßgeblich von regionalen Unternehmen errichtet. Mit Aufnahme des Forschungsbetriebes sind 350 fest angestellte Mitarbeiter – 200 Ingenieure und Techniker, 100 Wissenschaftler, 50 Unterstützungspersonal – sowie 50 Nachwuchswissenschaftler vorgesehen. Hinzu kommen voraussichtlich 50 bis 100 langfristige Gastwissenschaftler aus der ganzen Welt. Derzeit bemüht sich das IPP um die Neuansiedelung von Ingenieurdienstleistern, mit denen das Institut langfristig Geschäftsbeziehungen einzugehen vorhat.

Zur industriepolitischen Komponente siehe auch Antwort auf Frage 11.

*17. Welche Zukunftschancen räumen Sie der Kernfusion in den nächsten 50 Jahren ein?*

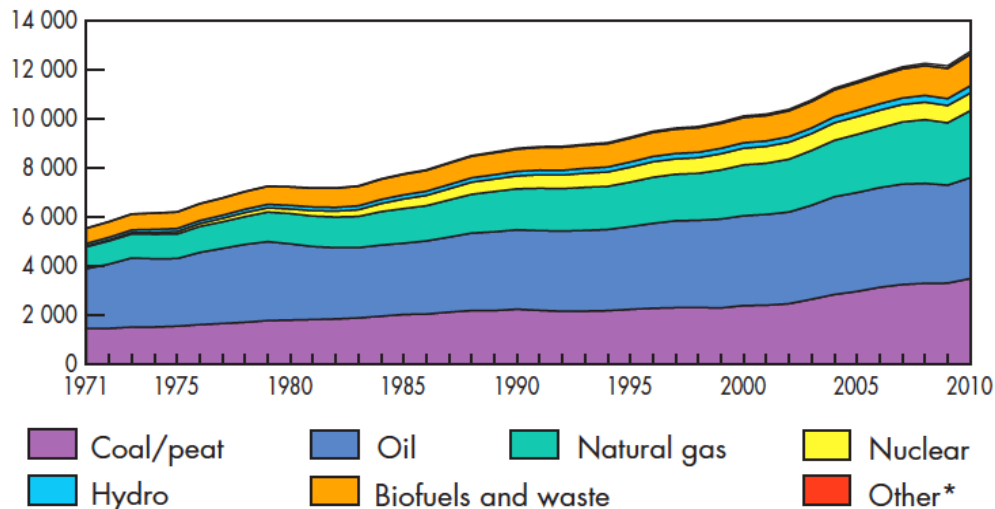
Wir sind zuversichtlich, dass in den nächsten 50 Jahren ein Fusionskraftwerk ans Netz geht und damit die Grundlage für die kommerzielle Nutzung der Fusionsenergie gelegt wird. Diese Erwartung beruht auf dem europäischen Fahrplan zur Fusionsenergie, der die wesentlichen Meilensteine auf dem Weg dorthin beschreibt (siehe Antwort auf Frage 5). Besonders wichtig ist dabei die erstmalige Demonstration mit dem Experiment ITER, dass sich deutlich mehr Energie per Fusion erzeugen lässt als zur Heizung des Plasmas benötigt wird. Auf Basis der ITER-Ergebnisse wird man dann einen Entwurf für einen Demonstrationskraftwerk erarbeiten können.

*18. Inwieweit sind Sie der Auffassung, dass die Kernfusion Bestandteil einer zukünftigen Energieversorgung sein wird?*

Das Energieproblem ist global und nicht etwa auf Deutschland beschränkt zu diskutieren, da Deutschland mit weniger als zwei Prozent am weltweiten Energieverbrauch beteiligt ist - mit fallender Tendenz. Global erwartet man bis 2100 einen Anstieg des Energiebedarfs um einen Faktor zwei bis vier. Für den Bedarf an Elektro-Energie wird sogar mit einem Anstieg um einen Faktor sechs (!) gerechnet. Gleichzeitig muss der Ausstoß von CO<sub>2</sub> begrenzt werden, wenn man den Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts in engen Grenzen halten will. Damit würden langfristig Kohle, Gas und Erdöl als Energieträger ausscheiden. Gas und Erdöl werden in dieser Zeit zur Neige gehen, sofern man auf „fracking“-Technologien verzichtet. Auch Kernspaltung ist in vielen Ländern seit dem Unfall in Fukushima in die Kritik geraten. Biomasse kann vermutlich nur sehr begrenzt genutzt werden, damit Energieerzeugung nicht in Konkurrenz mit der Nahrungsmittelversorgung einer weltweit wachsenden Bevölkerung gerät. Folgt man dieser Argumentation, müssten rund 90 Prozent der bisherigen Energieträger (siehe Abbildung) ersetzt und der steigende Bedarf ausschließlich aus neuen Energieträgern gedeckt werden. Es ist unklar, ob für diese enorme Herausforderung ausreichende Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen werden, selbst wenn man voraussetzt, dass für die fluktuierenden Energieformen – Sonne und Wind – die Entwicklung von effizienten Speichern gelänge. Für diese großen Herausforderungen müssen alle denkbaren Primärenergieträger in die Betrachtung einbezogen werden. Die Kernfusion könnte zum Ende des Jahrhunderts im Wesentlichen zur Stromerzeugung in Grundlast beitragen und damit die Spaltungskraftwerke ersetzen.



World total primary energy supply from 1971 to 2010  
by fuel (Mtoe)



Quelle: World Energy Report 2012 der IEA der OECD

19. *Wie bewerten Sie die Unterstützung der Kernfusionsforschung am Standort Greifswald durch das Land Mecklenburg-Vorpommern?*

Das Land Mecklenburg-Vorpommern und die jeweiligen Landesregierungen haben das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik an seinem Standort Greifswald stets tatkräftig unterstützt. Der zehnjährige Finanzierungsanteil des Landes am Greifswalder Institut stellt einen großen Haushaltsposten dar, was das IPP dankbar anerkennt. Durch die 90 Prozent Bundesfinanzierung und die 10 Prozent Landesfinanzierung der Garching und Greifswalder Institutsteile besteht eine besondere Verbindung des Landes Mecklenburg-Vorpommern mit dem Bund und dem Land Bayern, innerhalb derer das Land Mecklenburg-Vorpommern stets eine konstruktive und gestaltende Rolle gespielt hat.

20. *Wo sehen Sie Verbesserungsbedarf hinsichtlich der Unterstützung der Kernfusionsforschung am Standort Greifswald?*

Mit der Aufnahme des Forschungsbetriebes von Wendelstein 7-X ab 2015 erscheint es sinnvoll und wünschenswert, die Forschung auf dem Gebiet der Plasmaphysik in Greifswald intensiver zu vernetzen. Hier könnte die Landesregierung mit flankierenden Maßnahmen helfen.

### **Fraktion DIE LINKE**

21. *Wie ordnet sich das Experiment Wendelstein 7-X in die weltweite Forschung zur energetischen Nutzung der Kernfusion ein?*

Antwort siehe Frage 1.

22. *Welchen Beitrag zur künftigen Energiegewinnung soll und kann Wendelstein 7-X leisten?*

Die Forschungsanlage Wendelstein 7-X dient der Grundlagenforschung und soll zeigen, dass ihre besondere Magnetfeldgeometrie ein heißes Wasserstoffplasma so gut von den kalten Wänden isolieren kann, dass auf dieser Basis ein Fusionskraftwerk gebaut werden kann. Damit ist Wendelstein 7-X ein Schlüsselexperiment auf dem Weg zur Erschließung einer völlig neuen (ja sogar der einzigen neuen) Primärenergiequelle. Sie soll verfügbar sein, wenn fossile Brennstoffe zur Neige gehen bzw. sich immer weiter verteuern, was für die zweite Hälfte dieses Jahrhunderts erwartet wird. In diesem Sinne wird mit der Forschungsanlage Wendelstein 7-X – wie auch mit anderen Experimenten zur Fusionsforschung weltweit – Vorsorgeforschung betrieben: Wenn die wissenschaftlichen Grundlagen dieser Technologie heute nicht erforscht werden, steht sie nicht zur Verfügung, wenn sie in Zukunft gebraucht wird. Es ist keineswegs sicher, dass der weltweite Energiebedarf vollständig mit erneuerbaren Energiequellen zu decken ist. Angesichts des gewaltigen Risikos ist jede neue, saubere und sichere Primärenergiequelle ein großer Vorteil.

*23. Wie ordnet sich die Kernfusionsforschung in die Energiestrategie der Bundesrepublik Deutschland ein?*

Die Fusionsforschung ist nicht Bestandteil des Energiekonzepts der Bundesregierung, weil dieses nur den Zeitraum bis 2050 umfasst. Sie ist jedoch sehr wohl Teil des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung, wo es heißt (siehe dort, Seite 120):

„Die Kernfusion ist eine Option für die langfristige Energieversorgung unserer Welt, die über die Zeiträume des Energiekonzeptes hinausreichen. Die Fusionsforschung ist nicht Bestandteil des Energiekonzeptes der Bundesregierung, weil ihre Erforschung über den Zeitraum des Jahres 2050 hinausreichen wird. Verantwortungsvolle Forschungsförderung bedeutet daher aber auch, langfristige Entwicklungen im gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Bereich zu verfolgen. Vor diesem Hintergrund wird die Erforschung der Kernfusion gefördert. Werden die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen bewältigt, könnte die Kernfusion einen wichtigen und grundlastfähigen Beitrag für die Energieversorgung der Zukunft liefern. Zur technischen Realisierung der Kernfusion werden zwei Konzepte für den magnetischen Einschluss des Fusionsplasmas verfolgt: das Tokamak- und das Stellaratorprinzip. ITER beruht auf dem Tokamakprinzip. Mit dem Bau des weltweit größten und fortgeschrittensten Stellaratorexperiments, Wendelstein 7-X, in Greifswald, soll insbesondere die Kraftwerkstauglichkeit dieses Anlagentyps demonstriert werden. Stellaratoren können anders als Tokamaks aufgrund ihres anderen magnetischen Einschlusskonzepts von vorneherein im Dauerbetrieb arbeiten, sind momentan aber noch nicht so gut erforscht.“

*24. Wie schätzen Sie die mit der Fusionsforschung verbundenen Risiken ein? Wie schätzen Sie die Risiken des Experimentes Wendelstein 7-X ein?*

Grundlagenforschung birgt immer das „Risiko“, dass die Ergebnisse nicht genau vorhersehbar und daher nicht planbar sind. Es kann deshalb nicht mit absoluter Sicherheit vorausgesagt werden, ab wann ein Fusionskraftwerk zur Verfügung stehen wird. Dies gilt allerdings auch für alle anderen Gebiete der Grundlagenforschung wie beispielsweise die Entwicklung effizienter Energiespeicher.

Zu den Sicherheitsrisiken siehe Antworten auf Fragen 13 bis 15 und 38 bis 49.

25. *Wann gilt das Projekt Wendelstein 7-X als erfolgreich, wann gilt es als gescheitert?*

Wendelstein 7-X gilt als erfolgreich, wenn folgende drei Punkte erfüllt wurden:

- Mit dem Bau von Wendelstein 7-X wird gezeigt, dass es möglich ist, die komplexe Magnetfeldkonfiguration eines optimierten Stellarators technisch zu realisieren. Dieser Schritt ist nahezu abgeschlossen. 2014 werden alle wesentlichen Komponenten von Wendelstein 7-X montiert sein. Der erste Plasmabetrieb ist 2015 vorgesehen. Der Forschungsbetrieb wird 2015 aufgenommen.
- Wendelstein 7-X gelingt der Nachweis, dass ein Stellarator – wie ein gleich großer Tokamak – ein Plasma so gut einschließen kann, dass die notwendigen Fusionsparameter erreicht werden, nämlich zugleich gute Wärmeisolierung des Plasmas, Temperaturen von 10 bis 100 Millionen Grad und Plasmadichten von  $10^{20} \text{ m}^{-3}$ ). Ohne die aufwändige physikalische Optimierung des Magnetfeldes – ein Alleinstellungsmerkmal des Stellarators Wendelstein 7-X – wäre dies nicht möglich.
- Zudem ist es erklärtes Ziel, die fusionsrelevanten Plasmaparameter bis zu einer halben Stunde aufrecht zu erhalten. Dabei soll ein stationärer Zustand erreicht werden, der ein Gleichgewicht zwischen zu- und abgeführter Energie sowie zu- und abgeführten Plasmateilchen voraussetzt.

Zusammengenommen bedeuten die letzten beiden Punkte, dass ein Stellarator wie Wendelstein 7-X die Einschlusseigenschaften eines Tokamaks erreicht und zusätzlich, ohne weiteren Aufwand, den stationären Plasmabetrieb ermöglicht. Auf diese anspruchsvollen Ziele wird im Rahmen eines vieljährigen Forschungsprogramms hingearbeitet. Wie die Erfahrung – an anderen Fusionsexperimenten, aber auch mit Forschungsvorhaben generell – lehrt, lassen sich unerwartete Ergebnisse nicht ausschließen, die die jeweiligen Erwartungen sowohl enttäuschen als auch übertreffen können. Da Forschungsvorhaben in unbekanntes Terrain vorstoßen, gibt es jedoch immer einen Erkenntnisfortschritt, d.h. der Begriff „scheitern“ im eigentlichen Sinne des Wortes ergibt für ein wissenschaftliches Projekt nur wenig Sinn.

26. *Wie bewerten Sie den Einsatz internationaler und nationaler öffentlicher Mittel zur Fusionsforschung und für das Experiment Wendelstein 7-X?*

Die Fusionsforschung ist noch nicht im Bereich der Marktrelevanz angekommen. Anders als in anderen Forschungsbereichen, in denen jede kleinste Verbesserung von unmittelbarer wirtschaftlicher Bedeutung ist, muss in der Fusionsforschung eine bestimmte Schwelle überschritten werden, ab der Energiegewinnung gelingt und damit ökonomischer Nutzen sich einstellt. Das finanzielle Engagement der Industrie ist daher noch gering, auch wenn die Entwicklungen aufmerksam verfolgt werden. Damit ist der Einsatz öffentlicher Mittel erforderlich, um der o.g. Schwelle so nahe zu kommen, dass die Industrie die Weiterentwicklung der Technologie übernehmen kann.

Siehe auch Antwort zu Frage 22.

**Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN**

**Stand und Perspektiven der Kernfusionsforschung**

27. *Wann wird voraussichtlich der erste Demonstrationsreaktor in Betrieb gehen können und welche Technologie (Tokamak oder Stellarator) wird dabei voraussichtlich zur Anwendung kommen? Wann wird darauf basierend mit dem Betrieb eines ersten kommerziellen Kernfusionskraftwerks gerechnet?*

Antwort siehe Frage 5.

Im europäischen Fahrplan zur Realisierung der Fusionsenergie wird der Weg zu einem Demonstrationskraftwerk beschrieben. Wie auch in der Antwort zu Frage 6 ausgeführt, kann man durchaus erwarten, dass mehrere Demonstrationskraftwerke parallel gebaut werden. Definiert man kommerzielle Kraftwerke als ausschließlich durch die Industrie finanziert, so würden diese etwa dreißig Jahre nach dem Baubeginn der Demonstrationskraftwerke ans Netz gehen.

Für die Einordnung des Stellarators siehe Antwort Frage 29.

28. *Welche technischen und methodischen Schwierigkeiten müssen auf dem Weg zu einem dauerhaft energieerzeugenden Fusionsreaktor noch gelöst werden?*

Die technischen Entwicklungen für ein Fusionskraftwerk hängen eng mit den physikalischen Randbedingungen des magnetisch eingeschlossenen Fusionsplasmas zusammen. Deshalb lassen beide Aspekte nur gemeinsam betrachten. Dennoch kann man die wichtigsten technischen Fragen kurz skizzieren:

- **Blanket:** Es hat die Aufgabe, die Neutronenenergie aufzunehmen, abzuführen und aus Lithium Tritium zu erzeugen. Es gibt zahlreiche Konzepte für das Blanket – mit unterschiedlichen Kühlmedien und Trägermaterialien für das Lithium. Eine der Aufgaben von ITER ist, diese Blanket-Konzepte zu testen.
- **Brennstoffkreislauf:** Der Brennstoff Tritium wird im Blanket hergestellt und dem Fusionsprozess zugeführt. Zudem wird nicht verbrauchtes Deuterium und Tritium aus der Brennkammer vom Helium und anderen Verunreinigungen abtrennt und ebenfalls dem Fusionsprozess wieder zuführt. Im US-amerikanischen Fusionsexperiment TFTR und im europäischen Fusionsprojekt JET wurde erstmalig Tritium eingesetzt und nachgewiesen, dass das im Fusionsprozess entstehende Helium das Plasma aufheizen kann. Zwar war für die Verwendung von Tritium hier noch kein geschlossener Brennstoffkreislauf erforderlich, eine Abscheidung von Tritium im Abgasstrom und die exakte Bilanzierung des Tritiumverbrauchs und der Tritium-Rückgewinnung wurden jedoch realisiert. Den nächsten Schritt in der Entwicklung des kompletten Brennstoffkreislaufs wird ITER gehen.
- **Fusionsmaterialien:** Sie müssen je nach Einsatz im Kraftwerk drei Aufgaben erfüllen: (a) Die Strukturmaterialien müssen den Neutronenflüssen standhalten und dürfen dabei nicht zu stark aktiviert werden. Mit EUROFER – einem speziellen, niedrig aktivierbaren Stahl – gibt es hierfür in Europa bereits eine aussichtsreiche Entwicklung. (b) Die Materialien der „ersten Wand“, die direkt dem Plasma zugewandt ist, dürfen von Teilchen aus dem Plasma nicht zu stark erodiert werden. Zurzeit wird dafür das Metall Wolfram favorisiert, da es sehr hohe Temperaturbeständigkeit mit niedrigen Erosionsraten vereint. Wolfram wird bereits mit Erfolg in ASDEX Upgrade, dem IPP-Tokamak in Garching, und im europäischen Fusionsexperiment JET eingesetzt. (c) Für die Wärmeabfuhr aus dem Plasma müssen leistungsfähige Wärmetauscher –

der so genannte Divertor – entwickelt werden. Für Wendelstein 7-X wurde bereits ein Wärmetauscher für Wärmeflüsse entwickelt, wie sie in einem Kraftwerk erwartet werden: Er soll stationär  $10 \text{ MW/m}^2$ , abführen, was etwa einen Faktor 20 über Werten liegt, die z.B. in einem Kohlekraftwerks auftreten. Im Karlsruher Institut für Technologie (KIT) wird an einem mit Heliumgas gekühlter Wärmetauscher gearbeitet, wie man ihn in einem Demonstrationskraftwerk einsetzen will. Ein Wärmetauschersystem, welches sowohl den hohen Neutronenfluenzen als auch den hohen Wärme-flüssen standhält, befindet sich in der Entwicklung.

- Fernbedienungstechniken: Wenn der Plasmabetrieb begonnen hat, müssen wegen der Aktivierung alle Wartungs- und Umbauarbeiten am Plasmagefäß fernbedient ablaufen. JET ist die erste Fusionsanlage, die solche Verfahren konsequent erprobt und eingesetzt. So wurde nach den Tritium-Experimenten die Verkleidung des Plasmagefäßes komplett fernbedient ausgetauscht. Für ITER werden diese Verfahren weiter entwickelt: Für jede Komponente im aktivierbaren Bereich müssen Verfahren für den Einsatz von Fernbedienungswerkzeugen nachgewiesen werden.
- Stromtrieb: Dies betrifft nur den Tokamak. Um den induktiv, d.h. pulsweise nach dem Transformatorprinzip im Plasma erzeugten elektrischen Strom zu ergänzen und so Dauerbetrieb zu ermöglichen, sind zusätzliche Techniken erforderlich. Erprobt ist bereits der Stromtrieb mit Hilfe elektromagnetischer Wellen oder durch Einschließen energiereicher Neutralteilchen. Es gelang, den induktiv erzeugten Plasmastrom vollständig zu ersetzen. Für die Anwendung im Kraftwerk muss die Energieeffizienz des Verfahrens allerdings noch gesteigert werden.

Alle diese Fragen werden im Rahmen der internationalen Fusionsforschung arbeitsteilig behandelt und schrittweise gelöst werden.

*29. Wie ist der Stand der Fusionsforschung und welche Ziele werden mit dem Experiment Wendelstein 7-X in Bezug auf das Großexperiment ITER angestrebt? Wie ordnet sich vor dem Hintergrund, dass ITER dem Tokamak-Modell folgt, die gleichzeitige Entwicklung des Stellaratorkonzeptes am Standort Greifswald in die Gesamtstrategie der Fusionsforschung ein?*

Seit Beginn der Fusionsforschung in den 1960er Jahren wurden die Grundlagen für die Erzeugung eines Energie produzierenden (d.h. „brennenden“) Plasmas geschaffen. Der Testreaktor ITER soll erstmalig ein Energie produzierendes Fusionsplasma demonstrieren und die physikalischen und technischen Grundlagen für ein Demonstrationskraftwerk schaffen. ITER wird 500 MW Fusionsleistung liefern, wobei dem Plasma zur Aufheizung lediglich 50 MW zugeführt werden. Ziel ist also eine Leistungsverstärkung um das zehnfache. Da der Tokamak ITER den Plasmastrom quasi wie ein Transformator, also pulsweise, erzeugt, ist die Dauer dieses brennenden Fusionsplasmas auf etwa 10 Minuten begrenzt. Eines der Ziele von ITER ist es, mit etwa halber Leistungsverstärkung die Pulsdauer deutlich auszudehnen.

Hier liegt der Vorteil des Stellarators, der seinen magnetischen Käfig ohne Plasmastrom aufbaut. Ein Stellarator kann das Plasma daher ohne weitere Maßnahmen kontinuierlich einschließen (siehe auch Antwort auf Frage 6). Wendelstein 7-X soll die Kraftwerkstauglichkeit des Stellarators nachweisen, ohne ein Energie lieferndes Plasma zu erzeugen zu müssen.

Laut der im europäischen Fusionsfahrplan formulierten Strategie (siehe Antwort auf Frage 5) wird das erste Demonstrationskraftwerk ein Tokamak sein. Auf Wendelstein 7-X wird ein Stellarator folgen, der ähnlich wie ITER ein brennendes Fusionsplasma erzeugen kann. Mit Hilfe der Technologien, die für das Tokamak-Demonstrationskraftwerk entwickelt wurden, kann der Schritt zur Kommerzialisierung beim Stellarator dann direkt erfolgen und muss nicht über den Weg eines Demonstrationskraftwerks laufen. Denn die wichtigsten Kraftwerkstechnologien (siehe Antwort auf Frage 28) sind vom Tokamak auf den Stellarator übertragbar. Diese Strategie sollte überprüft werden, wenn in ITER ein brennendes Fusionsplasma realisiert und in Wendelstein 7-X ein Hochtemperaturplasma 30 Minuten lang aufrecht erhalten werden konnte. Nach heutiger Planung sollte beides zwischen 2025 und 2030 erreicht sein: 2019 beginnt der stationäre Hochleistungsbetrieb in Wendelstein 7-X, 2027 der Deuterium-Tritium-Betrieb in ITER.

Diese Strategie senkt das Risiko und erhöht die Effizienz: (1) *Risikominderung*: Für den Fall, dass es zwar gelingt, mit dem Tokamak ein Energie lieferndes Fusionsplasma zu erzeugen, beim Übergang zum Dauer- oder zumindest Langzeit-Betrieb aber größere Probleme auftreten, bietet der Stellarator eine Alternative ohne dieses Risiko. (2) *Höhere Effizienz*: Stellarator und Tokamak beruhen beide auf dem Prinzip des magnetischen Plasmaeinschlusses, so dass in der Grundlagenphysik viele Gemeinsamkeiten bestehen. Der Stellarator verspricht jedoch – weil er keinen Plasmastrom benötigt und das Fusionsplasma daher mit geringerem Energieaufwand aufrechterhalten kann – einen effizienteren Kraftwerksbetrieb.

Die hier dargestellte Gesamtstrategie ist auf Basis internationaler, wissenschaftlich kritischer Diskussionen und zahlreicher unabhängiger Evaluierungen entwickelt und wiederholt bestätigt worden.

*30. Sind die physikalischen Grundlagen der beiden Konzepte, Tokamak und Stellarator, ausreichend verstanden bzw. wie viel Grundlagenforschung ist noch nötig, bevor an technologischen Konzepten eines anwendungsfähigen Fusionskraftwerks gearbeitet werden kann?*

Die Grundlagen beider Konzepte sind inzwischen sehr gut verstanden. Nicht zuletzt wegen der großen Fortschritte der Hochleistungsrechner ist es heute möglich, viele Eigenschaften der Fusionsplasmen auf Basis grundlegender physikalischer Betrachtungen zu berechnen und so quantitative Aussagen über das Verhalten künftiger Anlagen zu machen. Wie in der Antwort auf Frage 28 dargelegt, sind physikalische und technologische Fragestellungen eng verzahnt. Die Grundlagenforschung und die Entwicklung technischer Konzepte gehen daher Hand in Hand. Lediglich der Schwerpunkt wird sich in Richtung technologischer Entwicklungen verschieben.

Die derzeitigen Forschungsstrukturen und internationalen Aktivitäten spiegeln diese Vorgehensweise wider. Im Rahmen des Helmholtz-Programms „Kernfusion“, an dem das Forschungszentrum Jülich (FZJ), das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik beteiligt sind, beschäftigt sich die Fusionsforschung intensiv mit der Konzeptentwicklung für ein Fusionskraftwerk. Das Gemeinschaftsprojekt „Weg zum Fusionskraftwerk: Entwicklung und Validierung eines integralen Konzepts“ wurde zu diesem Zweck ins Leben gerufen. Auf europäischer Ebene koordiniert das European Fusion Development Agreement (EFDA) neben dem Forschungsprogramm von JET und der Vorbereitung des ITER-Betriebs auch die Forschung für ein Kraftwerk („Power Plant Physics & Technology“). Auf internationaler Ebene wird der Dialog durch Workshops („Magnetic Fusion Energy Roadmapping Workshops“) unter der Schirmherrschaft der International Atomic Energy Agency (IAEA) gefördert.

31. *Wie lange hat bisher ein Plasma gebrannt, wie viel Energie hat es erzeugt und wie viel Energie musste zum Aufheizen zugeführt werden? Lassen sich aus diesen Kurzzeitexperimenten wirklich Schlussfolgerungen in Bezug auf einen länger andauernden Plasma-Einschluss (Dauerbetrieb) ziehen? Welche Brenndauer und gelieferte Energiemenge erwarten Sie von Wendelstein 7-X?*

Der Begriff „brennendes Plasma“ bezeichnet einen Zustand, in dem das Plasma im Wesentlichen durch Fusionsreaktionen geheizt wird. In diesem Sinne hat es bisher noch kein brennendes Plasma gegeben. Die bislang höchste Fusionsleistung wurde am europäischen Gemeinschaftsexperiment JET erreicht: 16 Megawatt Fusionsleistung, was bereits rund 60 Prozent der zur Plasmaheizung nötigen Leistung entspricht. Die Dauer dieser Entladungen lag im Bereich von Sekunden. Um ein brennendes Plasma erzeugen zu können, ist die Wärmeisolierung durch die Magnetfelder an JET nicht ausreichend. Dazu sind größere Anlagen nötig. Erst ITER wird in der Lage sein, mehr Fusionsenergie zu liefern als zur Plasmaheizung erforderlich ist. Dabei sollen die Entladungsdauern bei ITER im Bereich von 10 Minuten liegen. Dies ist lang genug, um alle notwendigen Erkenntnisse gewinnen zu können. In längeren Entladungen ändert sich im Experiment nichts mehr.

Es ist darauf hinzuweisen, dass die Entladungsdauern heutiger Experimente nicht etwa durch physikalische Probleme begrenzt werden, sondern durch die Tatsache, dass die zum Plasmaeinschluss erforderlichen Magnetfelder durch Kupferspulen erzeugt werden. Für lange Entladungsdauern werden jedoch supraleitende Spulen benötigt, wie sie bei Wendelstein 7-X und ITER verwendet werden. Generell muss jedoch auch ein Fusionskraftwerk nicht notwendigerweise kontinuierlich laufen; eine Entladungsdauer von einigen Stunden wäre ausreichend. Nach etwa einer halben Stunde Pause könnte eine neue Entladung starten, was mit Hilfe von Kurzzeitspeichern ohne Einfluss auf die Stromversorgung bleiben würde. Ein Stellarator-kraftwerk könnte allerdings im Dauerbetrieb arbeiten, was ein grundsätzlicher Vorteil ist.

Energie kann in einer Anlage nur gewonnen werden, wenn Fusionsreaktionen von Deuterium mit Tritium stattfinden. Da Wendelstein 7-X nicht mit dem Brennstoff Tritium arbeiten wird, ist es in der Anlage nicht möglich, Energie zu erzeugen. Das Ziel der Forschung ist es stattdessen, einen lang andauernden Plasmabetrieb (mit leichtem Wasserstoff und Deuterium) zu untersuchen und dabei möglichst nahe an die für ein Fusionskraftwerk erforderlichen Dichten und Temperaturen heranzukommen. Da die Fusionsreaktionen und ihre Abhängigkeit von den Plasma-parametern gut bekannt sind, kann man aus einem reinen Deuterium-Betrieb gut auf den entsprechenden Energiegewinn in einem Deuterium-Tritium-Plasma schließen. Dies ist in entsprechenden Experimenten mit Deuterium und Tritium in JET (weltweit größtes Fusionsexperiment, Culham, Großbritannien) und TFTR (früheres Fusionsexperiment in Princeton USA) verifiziert worden.

32. *Ist es gesichert, dass die Fusion als Energiequelle technisch funktioniert? Stehen die dafür notwendigen Technologien und Materialien zur Verfügung? Welche sind noch zu entwickeln? Wie lange werden diese Entwicklungen noch dauern? Welche technologischen Meilensteine werden zu welchen Zeitpunkten voraussichtlich erreicht sein?*

Antwort siehe Fragen 5 und 28.

33. Ist die „erste Wand“ technologisch und in Bezug auf das Material beherrscht? Wie lange halten die Wandkomponenten, bevor sie ausgetauscht werden müssen? Wie ist der Stand der Forschungen hinsichtlich der Entwicklung eines möglichst niedrig aktivierbaren Wandmaterials? Welchen Beitrag zur Erforschung dieser Materialfrage kann Wendelstein 7-X, welchen kann ITER leisten? Welche weiteren Forschungsschritte sind zur Lösung der Materialfrage geplant und welche Rolle spielen dabei Forschungsprojekte wie die „International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) - „Internationale Fusionsmaterial-Bestrahlungseinrichtung“?

Vergleiche auch Antwort auf Fragen 6, 8 und 28.

Die Wandbereiche in Wendelstein 7-X, die stark beansprucht werden, werden mit Kohlenstoff verkleidet, je nach Belastung mit amorphem Kohlenstoff oder CFC. Kohlenstoff kann nicht schmelzen, verunreinigt das Plasma kaum und besitzt hohe Wärmeleitfähigkeit. Wegen dieser günstigen Eigenschaften ist Kohlenstoff das beste Wandmaterial für die Erprobung eines Konzepts, wie es Wendelstein 7-X darstellt. Allerdings hat Kohlenstoff auch Nachteile, weshalb in Wendelstein 7-X später auch Wolfram untersucht werden soll, das derzeit aussichtsreichste Material für die Wand eines Fusionskraftwerks (siehe auch Antwort auf Frage 28). Für ASDEX Upgrade wurden bereits leistungsfähige Verfahren zur Wolframbeschichtung von Kohlenstoffoberflächen entwickelt.

ITER wird von Beginn an eine Wand aus Wolfram und Beryllium besitzen. Dies wird derzeit am europäischen Fusionsexperiment JET im Projekt „ITER-like Wall“ eingehend untersucht. Die Wandbereiche in Wendelstein 7-X, die stark beansprucht werden, werden mit Kohlenstoff verkleidet, je nach Belastung mit amorphem Kohlenstoff oder CFC. Kohlenstoff kann nicht schmelzen, verunreinigt das Plasma kaum und besitzt hohe Wärmeleitfähigkeit. Wegen dieser günstigen Eigenschaften ist Kohlenstoff das beste Wandmaterial für die Erprobung eines Konzepts, wie es Wendelstein 7-X darstellt. Allerdings hat Kohlenstoff auch Nachteile, weshalb in Wendelstein 7-X später auch Wolfram untersucht werden soll, das derzeit aussichtsreichste Material für die Wand eines Fusionskraftwerks (siehe auch Antwort auf Frage 28). Für ASDEX Upgrade wurden bereits leistungsfähige Verfahren zur Wolframbeschichtung von Kohlenstoffoberflächen entwickelt.

ITER wird von Beginn an eine Wand aus Wolfram und Beryllium besitzen. Dies wird derzeit am europäischen Fusionsexperiment JET im Projekt „ITER-like Wall“ eingehend untersucht. ASDEX Upgrade hat bereits den erfolgreichen Plasmabetrieb mit einer vollständig mit Wolfram beschichteten Wand demonstriert. ITER wird zeigen, wie sich diese Materialien für ein kraftwerksähnliches Plasma eignen. Für die Auslegung eines Demonstrationskraftwerks ist dann zu entscheiden, ob die gesamte erste Wand eine Wolframoberfläche besitzen soll – wie in ASDEX Upgrade – oder eine Mischung aus Beryllium (für die niedrig belasteten Flächen) und Wolfram (für die hoch belasteten Flächen). Wendelstein 7-X wird die Eignung von Wolfram für ein Stellaratorplasma prüfen.

Wie schon in der Antwort auf Frage 28 erläutert, müssen Materialien für verschiedene Aufgaben gefunden werden – Material der ersten Wand für den Kontakt des „kalten“ Randschichtplasmas mit der Wand, Material für die Wärmeabfuhr und Material für die Strukturen. Die Eigenschaften dieser Materialien dürfen sich auch unter dem Einfluss von Neutronen nicht nachteilig verändern. Da in Wendelstein 7-X keine hohen Neutronenflüsse erzeugt werden, wird Wendelstein 7-X zur Beantwortung dieser Frage keinen Beitrag leisten können. ITER wird mit Deuterium-Tritium-Plasmen hohe Neutronenflüsse erreichen. Dennoch ist in ITER das Integral der Flüsse, die so genannte Fluenz, auf etwa 1 dpa („displacement per



atom“) begrenzt. Für eine ausreichende Lebensdauer der Kraftwerkskomponenten werden jedoch 100 dpa für die am stärksten mit Neutronen beaufschlagten Materialien angestrebt. Um diese Materialien für den Einsatz in einem Fusionskraftwerk zu qualifizieren, bedarf es einer geeigneten Neutronentestquelle.

In Hochflussreaktoren kann man heute Fluenzen von 100 dpa erreichen und damit Materialien testen. Allerdings besitzen diese Neutronen eine andere Energieverteilung als die Fusionsneutronen, so dass die Tests nur begrenzt zur Extrapolation bis hin zu einem Fusionskraftwerk geeignet sind. Deshalb wird in internationaler Zusammenarbeit an dem Entwurf für die „International Fusion Materials Irradiation Facility“ (IFMIF) gearbeitet. Sie soll Neutronen der passenden Energie mit Hilfe eines Teilchenbeschleunigers erzeugen.

*34. Welche forschungspolitischen Optionen sehen Sie im Hinblick auf die Fusionsforschung? Sind der weiterhin hohe finanzielle Aufwand und die damit verbundenen gesamtgesellschaftlichen Kosten im Bezug auf die bisherigen Ergebnisse gerechtfertigt?*

Die Herausforderungen für eine sichere, umweltfreundliche globale Energieversorgung sind groß (siehe die Antwort zu Frage 18). Trotz langjähriger Beschränkungsmaßnahmen steigt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß weltweit weiterhin stark an (siehe Abbildung in Antwort auf Frage 18). Ein Ende dieser Entwicklung ist nicht erkennbar. Um den Temperaturanstieg zum Ende des Jahrhunderts auf wenige Grad zu begrenzen – das bisherige 2-Grad-Ziel wurde bereits aufgegeben –, sind enorme Anstrengungen erforderlich, um die fossilen Energieträger zu ersetzen. Bisher ist nicht klar, ob dies gelingen kann. Daher muss es Aufgabe der Forschung sein, möglichst viele Optionen zur klimafreundlichen Energiegewinnung ohne CO<sub>2</sub>-Ausstoß zur Verfügung zu stellen. Neben Sonnen- und Windenergie ist die Kernfusion eine dieser wenigen Möglichkeiten! Fusionsforschung wird seit etwa 60 Jahren betrieben. Entgegen mancher gegenteiligen Äußerung sind die bisherigen Ergebnisse durchaus beeindruckend: der Erfolgsparameter für die Fusion ist seither um etwa einen Faktor 100.000 gestiegen, hat sich also alle zwei Jahre verdoppelt (siehe auch Antwort auf Frage 1). Mit diesem Entwicklungstempo kann die Fusionsforschung sogar mit der Computerindustrie mithalten. Allerdings sind diese Erfolge für die breite Öffentlichkeit nur schwer nachzuvollziehen, die den Erfolg nach der gelungenen Energieproduktion bemisst. Eine solche ist allerdings erst möglich, wenn der Erfolgsparameter nochmals etwa um einen Faktor 10 wächst, was erst in Anlagen der Größe von ITER möglich ist. Die sichere und nachhaltige Energieversorgung ist eine der größten Herausforderungen der Menschheit und eine existenzielle Frage. Die Ausgaben für die Energieforschung – in allen Bereichen – sind gemessen an der Größe und Bedeutung dieser Aufgabe sicher nicht zu hoch.

Die Option „Fusion“ muss unbedingt erforscht werden!

*35. Wie lautet die Zeitschiene des Forschungsprojektes Wendelstein 7-X? Wie lange dauert die Experimentalphase, welche Laufzeit besitzt das Projekt und gibt es Planungen für Anschlussprojekte?*

Die Montage von Wendelstein 7-X wird Mitte 2014 abgeschlossen sein, der Forschungsbetrieb Mitte 2015 beginnen. Ab 2019 wird der Einschluss von Wasserstoff-Plasmen im Dauerbetrieb untersucht. Während der typischen Laufzeit solcher Großanlagen von 20 bis 25 Jahren werden Umbauten und Ergänzungen nötig sein, die Wendelstein 7-X im weltweiten Wettbewerb konkurrenzfähig halten.

Planungen für ein Anschlussprojekt ergeben erst Sinn, wenn die ersten Ergebnisse von Wendelstein 7-X vorliegen.

36. *Woran misst sich der wissenschaftliche Erfolg von Wendelstein 7-X, d.h. die Lösung welcher experimenteller Fragen würde als sichtbarer Fortschritt auf dem Weg zur möglichen energetischen Nutzung der Kernfusion gelten?*

Siehe auch Antwort auf Frage 25.

Der erste (ingenieur-) wissenschaftliche Erfolg steht unmittelbar bevor: die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit einer Anlage auf der Basis des Stellaratorprinzips. Der zweite wissenschaftliche Meilenstein ist es, die verbesserte Wärmeisolation des besonders geformten, optimierten Stellarator-Magnetfeldes von Wendelstein 7-X nachzuweisen. Der dritte wissenschaftliche Meilenstein ist es dann, erstmals zu zeigen, dass ein Hochtemperaturplasma dauerhaft eingeschlossen werden kann.

37. *Bestehen nach Ihrer Einschätzung Möglichkeiten, Erkenntnisse aus der Erforschung der Kernfusion und der hierfür notwendigen Technologien für andere Forschungsbereiche, beispielsweise bei der Entwicklung von Energiespeichertechnologien, zu nutzen und welche Bereiche wären das aus Ihrer Sicht?*

Das in Greifswald aufgebaute Know-How auf dem Gebiet der Supraleitungstechnik könnte durchaus für künftige Energiespeichertechnologien relevant werden. Hier sind Verbundprojekte denkbar und wären mit Gewissheit sinnvoll. Das IPP arbeitet seit vielen Jahren mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) auf dem Gebiet der Supraleitung zusammen. Hier laufen bereits Forschungsprojekte zu Energiespeicherung und Energietransport mit Supraleitern, siehe auch:

<http://www.itep.kit.edu/234.php>

Zu anderen Aspekten siehe auch Antwort auf Frage 11.

### **Risiken der Kernfusion für Mensch und Umwelt**

38. *Welche radiologischen und nicht radiologischen Risiken bestehen beim Betrieb eines Fusionsreaktors?*

Überlegungen zur radiologischen Sicherheit gelten dem radioaktiven Tritium und den energiereichen Fusionsneutronen, welche die Wände des Plasmagefäßes aktivieren. Der Brennstoffbestandteil Tritium muss im Fusionskraftwerk (nicht in einem Fusionsexperiment wie Wendelstein 7-X, das ausschließlich mit Wasserstoff und Deuterium arbeitet) gut eingeschlossen sein und darf nicht entweichen. Auch die aktivierten Materialien müssen eingeschlossen bleiben. Wesentlich dafür ist, dass die Aktivität in Metallen fest gebunden ist und nicht ohne großen Energieeintrag freigesetzt werden kann. Weil ein Fusionskraftwerk so geartet ist, dass es keine Energiequellen enthält, die – wenn sie außer Kontrolle geraten – eine Sicherheits-hülle zerstören könnten, sind Vorgänge wie in Tschernobyl oder Fukushima bei einem Fusionskraftwerk aus naturgesetzlichen Gründen nicht möglich. Zum einen ist der Energieinhalt eines Fusionskraftwerkes gering (etwa ein Gramm Deuterium und Tritium in der Brennkammer). Zum anderen handelt es sich bei der Fusion nicht um eine Kettenreaktion; der Brennprozess kommt im Störfall von selbst schnell zum

Erliegen. Die Zerfallswärme der aktivierten Wandmaterialien führt bei weitem nicht an den Schmelzpunkt, selbst bei einem totalen Ausfall der Kühlung. Auch alle nicht-radiologischen Risiken – die mit hohen elektrischen Strömen, Magnetfeldern und Spannungen verbunden sind – können nicht alle Sicherheitsbarrieren beschädigen.

*39. Welche Folgen hätte die Zerstörung eines Reaktors infolge kriegerischer Ereignisse oder Terrorismus? Wie groß wäre das freigesetzte radiotoxische Inventar?*

In mehreren Sicherheitsstudien wurden Störfälle von Fusionskraftwerken in vielen Details untersucht (z.B. SOFT „Symposium on Fusion Technologies“ 2008, 2010, 2012 und Referenzen in Antwort zu Frage 48). Auf Basis der in der Anlage gespeicherten Energien (chemische Energie, Zerfallswärme, etc.) wurde berechnet, welche Konsequenzen bei einem Totalausfall aller aktiven Systeme einschließlich der gesamten Kühlkreisläufe und ohne ein Eingreifen von außen, zu erwarten wären: Die sich am „Zaun“ der Anlage ergebende Belastung liegt unterhalb des Grenzwertes, der von der Internationalen Strahlenschutzkommission für eine Evakuierung empfohlen wird. Darüber hinaus kann das Gebäude so ausgelegt werden, dass z.B. ein Flugzeugabsturz zu keiner zusätzlichen Gefährdung führt (der Absturz kann zwar zu einem Ausfall aller Kraftwerkssysteme führen, bewirkt aber wegen der weiter oben beschriebenen Eigenschaften keine weitere Freisetzung radioaktiven Inventars). Die Radiotoxizität des gesamten Inventars nimmt über 100 Jahre um einen Faktor 10.000 ab.

*40. Welche Arten ionisierender Strahlung bzw. radioaktiver Stoffe werden beim Kernfusionsexperiment Wendelstein 7-X entstehen und welche Schutzmaßnahmen werden ergriffen, um eine Freisetzung dieser Strahlung und Stoffe zu verhindern?*

Während des einige Sekunden bis maximal 30 Minuten dauernden Plasmabetriebs (sowohl in Wasserstoff- wie auch in Deuterium-Plasmen) wird vom Plasma ionisierende Photonenstrahlung ausgesandt. Sie wird jedoch von den Betonwänden der Experimenthalle vollständig abgeschirmt. Außerhalb der Halle tritt keine Wirkung auf.

Ausschließlich in Deuterium-Plasmen entstehen durch (die sehr seltenen) Fusionsreaktionen zwischen zwei Deuteriumkernen Neutronen und geringste Mengen an Tritium (pro Jahr maximal 0,00015 Gramm Tritium, siehe Antwort 47):

- Die Neutronen verlassen die Plasmakammer und werden in den Betonwänden der Halle absorbiert. Die Wände sind so ausgelegt, dass sie diese Neutronen und die bei der Absorption entstehende Gammastrahlung weit unter die Grenzwerte der StrlSchV abschirmen.
- Teilweise aktivieren die Neutronen Metallteile des Experiments, wodurch diese Strukturen selbst radioaktiv werden können und Gammastrahlung emittieren. Um diese Aktivierung gering zu halten, sind die metallischen Komponenten in der Nähe des Plasmas aus Stahl mit niedrigem Kobalt-Gehalt (500 ppm) gefertigt.

Das Tritium lagert sich zum Teil in den Wänden des Plasmagefäßes ab, zum Teil wird es von den Vakuumpumpen abgepumpt. Das Schmieröl aller Vakuumpumpen wird deshalb gesammelt und vorschriftsgemäß entsorgt. Ein Teil des Tritiums wird über das Abgassystem der Torushalle freigesetzt, wobei die Aktivitätsabgabe stets unter den gesetzlichen Freigrenzen bleibt. Dies zeigen Berechnungen, die Teil des Sicherheitsberichtes sind (vergleiche die Antwort auf Frage 15). Die Werte werden im

Rahmen der gesetzlich geregelten Strahlenschutzüberwachung kontinuierlich aufgezeichnet und kontrolliert.

Weil Wendelstein 7-X eine regelbare Quelle ist, ist die Einhaltung des Schutzzieles der StrSchV bei Abgabe von aktivierten Stoffen aus Wendelstein 7-X jederzeit gewährleistet.

*41. Welchen Stand hat die Planung eines Strahlenschutzüberwachungssystems inklusive einer Tritiumüberwachung für Wendelstein 7-X erreicht? Welche Komponenten soll dieses Strahlenschutzüberwachungssystem enthalten?*

Die Planung des Strahlenschutzüberwachungssystems ist abgeschlossen; der Aufbau läuft im Zeitplan. Zu dem System gehören in der Halle redundante, kalibrierte Neutronenzähler, die die Einhaltung der jährlich erlaubten Neutronenerzeugung dokumentieren und sicherstellen, Messgeräte für die Gammadosisleistung sowie verschiedene Gamma- und Neutronendosimeter. Die an die Halle angrenzenden Bereiche werden sowohl durch eine zeitlich aufgelöste Messung der Gammadosisleistung als auch durch Langzeitmessungen der Gamma- und Neutronendosis überwacht. Weitere Neutronen- und Gammamessstellen befinden sich auf dem Dach der Experimenthalle sowie auf dem Betriebsgelände. Auch eine Überwachung der Tritiumabgabe durch die Hallenluft ist im Sicherheitskonzept vorgesehen.

*42. Welche offenen Fragen gibt es in Vorbereitung der Betriebsgenehmigung für Wendelstein 7-X im Hinblick auf den Strahlenschutz der Anlage?*

Aus unserer Sicht gibt es hierzu keine offenen Fragen.

*43. Wie groß würde das radiotoxische Inventar des Kernfusionsexperimentes Wendelstein 7-X in der Betriebsphase sein?*

Das radiotoxische Inventar von Wendelstein 7-X besteht in der Gesamtheit der fest in der Halle lokalisierten und unbeweglichen Experimentstrukturen, deren Baumaterialien (im Wesentlichen Stahl) bei Betrieb mit Deuterium-Plasmen durch Neutronen aktiviert werden. Bei Stilllegung nach Betriebsende des Experimentes verbleiben diese Strukturen in der Experimenthalle, wo ihre Radioaktivität abklingt. Hierbei handelt es sich um rund 800 Tonnen Stahl in direkter Plasmanähe und ähnlich viel, aber geringer aktiviertes Material, das in der Experimenthalle verteilt ist. Hinzu kommen rund 200 Tonnen Experimenteile, die im Laufe der Betriebsdauer ausgetauscht werden und zum Abklingen in der Experimenthalle und anderen gesicherten Räumen des IPP lagern. Die moderaten Halbwertszeiten sind im Wesentlichen durch die Bestandteile des verwendeten Stahls bestimmt, wobei Kobalt-60 nach weniger als zehn Jahren Abklingzeit das bestimmende Leitisotop darstellt. Nach 10 bis 20 Jahren ist für den Großteil des Materials die Restaktivität so weit abgesunken, dass eine Rezyklierung erfolgen kann und das Material für beliebige Zwecke wieder verwendbar wird.

*44. Liegen aktuelle, klar in ihren Rahmenbedingungen und Grundannahmen ausgewiesene Studien über die radioaktive Dosis im Dauerbetrieb für die Beschäftigten und die Umgebung vor? Zu welchen Ergebnissen kommen diese Studien?*

Die Grundannahmen und Rahmenbedingungen des Sicherheitsberichtes zur Errichtungsgenehmigung gelten unverändert. Hiernach kam das Sachverständigen-gutachten zum Sicherheitsbericht (der Errichtungsgenehmigung) zu dem Ergebnis,

dass „die mit dem Betrieb der Anlage verbundenen Auswirkungen auf das Umfeld durchweg deutlich, im Fall von Wasser und Boden um mehrere Größenordnungen, unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen.“ Selbstverständlich wurden und werden bei der baulichen Durchführungen der Strahlenschutzmaßnahmen ständig umfangreiche aktuelle Berechnungen angestellt, um das Schutzziel der StrlSchV sicher einzuhalten. Diese Studien werden im Rahmen der derzeitigen unabhängigen Begutachtung des Strahlenschutzes bei Wendelstein 7-X von den vom Sozialministerium eingesetzten Gutachtern bewertet.

*45. Mit welchen Arten radioaktiven Abfalls (leicht, mittel und stark strahlender Abfall) und mit welchen Mengen wäre im Zuge der umfassenden Nutzung der Kernfusion zu rechnen? Wie schätzen Sie nach dem aktuellen Forschungsstand die Menge des entstehenden radioaktiv kontaminierten Wandmaterials im Vergleich zu einem Spaltreaktor ein?*

Siehe auch Antwort auf Frage 9.

Die aktuelle Kraftwerksstudie der Europäische Gemeinschaft (D. Maisonnier et al.; A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants; EFDA(05)-27/4.10; April 2005.) hat vier Kraftwerksmodelle entwickelt, die ein weites Spektrum physikalischer und technologischer Möglichkeiten abdecken. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen im Strukturmaterial des Plasmagefäßes, im Blanketkonzept und im Kühlmaterial: Selbst mit den heute verfügbaren Materialien berechnet diese Studie für den gesamten während und nach der Laufzeit angefallenen Abfall nach 100 Jahren Abklingzeit etwa 88.000 Tonnen leicht rezyklierbarer Stoffe, 15.000 Tonnen komplex rezyklierbarer Stoffe – die in neuen Kraftwerken wieder verwendet werden können – sowie keine Stoffe, die endgelagert werden müssen. Weitere Materialentwicklungen werden es voraussichtlich ermöglichen, diese Reststoffmengen noch weiter herabzusetzen.

Das Volumen des erzeugten Fusionsabfalls liegt in etwa der gleichen Größenordnung wie das Volumen an radioaktivem Abfall, das ein Spaltreaktor gleicher Energieerzeugung hinterlässt. Die Umwelteigenschaften von Fusions- und Spaltabfall sind jedoch äußerst verschieden: Nach etwa hundert Jahren ist die Aktivität des Fusionsabfalls auf ein Zehntausendstel des Anfangswerts abgesunken. Das biologische Gefährdungspotential der Fusionsabfälle ist nach ein- bis fünfhundert Jahren bereits vergleichbar mit dem Gefährdungspotential der gesamten Kohleasche aus einem Kohlekraftwerk gleicher Energieerzeugung.

*46. Welche Mengen an radioaktivem Abfall werden während des Betriebs von Wendelstein 7-X und beim Abbau der Anlagen anfallen? Wie hoch ist der Anteil langlebiger Nuklide im Abfall? Wie, wo und wie lange wird der Abfall in Greifswald gelagert und wohin werden die radioaktiven Stoffe entsorgt? Würde radioaktiver Abfall nach Ende des Experimentes unter besonderen Sicherheitsvorkehrungen vor Ort gelagert werden müssen und welche Kosten wären damit verbunden?*

Siehe auch Antwort auf Frage 43.

Nach der Stilllegung von Wendelstein 7-X wird sich – vorausgesetzt, die über die ganze Laufzeit des Experiments beantragte Neutronenproduktion von  $3 \times 10^{19}$  Neutronen pro Jahr wurde in jedem Jahr vollständig ausgenutzt – in der Experimenthalle schwach aktiviertes Material in Form fester Stahlstrukturen befinden, die beim Betrieb mit Deuterium aktiviert wurden. Kobalt-60 ist dabei das langlebige Leitisotop

(Halbwertszeit 5,3 Jahre). Mengenmäßig handelt es sich um rund 800 Tonnen Stahl in direkter Plasmanähe und ähnlich viel, jedoch wesentlich geringer aktiviertes Material, das in der Experimenthalle verteilt ist. Hinzu kommen etwa 200 Tonnen Experimentteile, die während des Betriebes ausgetauscht wurden und zum Abklingen in der Halle lagern. Der Anteil von Kobalt an der Gesamtstahlmasse in Plasmanähe beträgt etwa 0,05 Prozent. Wie in der Errichtungsgenehmigung festgelegt, wird dieses Material vor Ort (v.a. in der Experimenthalle) gelagert, bis eine Restaktivität erreicht ist, die ein Rezyklieren und beliebiges Wiederverwenden erlaubt. Für die Freigabe des Materials ist die spezifische Aktivität, d.h. die Aktivität pro Masse, der entscheidende Parameter. Nach 10 bis 20 Jahren ist für den Großteil des Materials die Restaktivität soweit abgesunken, dass das Material für beliebige Zwecke wieder verwendbar wird. Die notwendigen Sicherheitsvorkehrungen für die Lagerung des aktivierten Materials entsprechend den Anforderungen an Brandschutz und Diebstahl nach DIN 25422 werden durch die existierende Infrastruktur abgedeckt. Die hierfür anfallenden Betriebskosten umfassen im Wesentlichen die Unterhaltung und regelmäßige Kontrolle der ungeheizten Halle.

*47. Welche Gefahren birgt das radioaktive Tritium und in welchem Umfang sind Freisetzungen von Tritium aus der Anlage Wendelstein 7-X zu erwarten (z.B. über die Abluft)?*

Siehe auch Antwort auf Frage 40.

Tritium ist ein Beta-Strahler mit einer Halbwertszeit von 12,3 Jahren. Es unterscheidet sich chemisch nicht von Wasserstoff und gasförmig oder in Form von tritiiertem Wasser vom Körper aufgenommen werden. Tritium gehört zur Klasse der schwach radiotoxischen Isotope: Grund ist die vergleichsweise geringe Ionisationswirkung und der Umstand, dass sich das Körperwasser innerhalb von typisch 10 Tagen austauscht.

Tritium wird während des Plasmabetriebes mit Deuterium mit gleicher Rate wie die Neutronen erzeugt. Vorausgesetzt, die über die ganze Laufzeit des Experiments beantragte Neutronenproduktion von  $3 \times 10^{19}$  Neutronen pro Jahr wurde in jedem Jahr vollständig ausgenutzt, würden also pro Jahr 0,00015 Gramm Tritium entstehen. Es lagert sich teils in den Wänden des Wendelstein 7-X ab, teils wird es von den Vakuumpumpen abgepumpt. Das Schmieröl aller Vakuumpumpen wird deshalb gesammelt und vorschriftsgemäß entsorgt. Um die Einhaltung der Auflagen zu überprüfen, wird die Überwachung der Abluft auf Tritium Teil des Strahlenschutzüberwachungssystems von Wendelstein 7-X sein.

Am Garching IPP-Experiment ASDEX Upgrade – wie auch bei zahlreichen anderen Fusionsanlagen weltweit – ist dieser Betrieb seit fast zwei Jahrzehnten Routine.

*48. Welche Störfallszenarien wurden bislang erforscht? Wie hoch ist die Unfallgefahr bei einem Fusionsreaktor des Stellarator-Typs? Gibt es Risikostudien unabhängiger Gutachter über Fusionsreaktoren allgemein und Stellarator-Reaktoren im Besonderen und wie wird dort das Unfallrisiko eingeschätzt? Gibt es medizinische Langzeituntersuchungen bei Mitarbeitern von kerntechnischen Forschungseinrichtungen der Kernfusionsforschung?*

Zum Betrieb von Wendelstein 7-X: Optimale Plasmawerte mit maximaler Neutronenproduktion im Deuteriumbetrieb können nur erreicht werden, wenn die Betriebsparameter sorgfältig eingestellt und eingehalten werden. Jede Abweichung

senkt die Neutronenproduktion oder führt gar zum Erlöschen des Plasmazustandes. Jede Störung des Betriebszustandes oder jedes Versagen einer Steuerungsvorrichtung beendet den laufenden Plasmabetrieb und damit die Neutronenproduktion. Als Störfälle bei Wendelstein 7-X wurden im Sicherheitsbericht betrachtet: (a) die Umwandlung der größtmöglichen gespeicherten Magnetfeldenergie in Wärme und anschließende Beschädigung von Spulen und Strukturmaterial, (b) das Verbrennen der Graphitziegel im Plasmagefäß und das Freisetzen des während des Betriebes angelagerten Tritiums. In beiden Fällen lag die Freisetzung der entsprechenden Aktivitäten weit unter den relevanten Grenzwerten. Inzwischen wurden (und werden) weitere Störfallszenarien für Wendelstein 7-X untersucht, um die Sicherheit der Anlage weiter zu erhöhen. In keinem dieser Fälle traten Probleme in Bezug auf den Strahlenschutz auf.

Das Unfallrisiko bei einem Experiment vom Typ Stellarator unterscheidet sich kaum von der Situation bei einem Tokamak, weil die technischen Komponenten sehr ähnlich sind. Die Ergebnisse der Tokamaks können deshalb auf Stellaratoren übertragen werden.

Auch bei einem Fusionskraftwerk ist davon auszugehen, dass Stellarator und Tokamak vergleichbare Sicherheitseigenschaften besitzen. Die Europäische Gemeinschaft hat seit den 1990er Jahren mehrere Studien zur Sicherheit und den Umwelteigenschaften von Fusionskraftwerken herausgegeben, darunter:

J. Raeder, I. Cook, F.H. Morgenstern, E. Salpietro, R. Bünde, E. Ebert; Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP); Commission of the European Communities, EURFUBRU XII-217/95, June 1995.

W. Gulden and E. Kajlert: Safety and Environmental Assessment of Fusion Power, Long Term Programme (SEAL); Commission of the European Communities, EUR 19071, December 1999.

I. Cook, G. Marbach, L. Di Pace, C. Girard, N. P. Taylor; Safety and Environmental Impact of Fusion (SEIF); Commission of the European Communities, EFDA-S-RE-1, April 2001.

D. Maisonnier et al.; A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants; EFDA(05)-27/4.10; April 2005.

Ganz aktuell ist der von ITER im Rahmen der Lizenzierung vorgelegte Sicherheitsbericht, in welchem sehr viele Störfall-Szenarien detailliert untersucht und Gefahren im Normalbetrieb, bei Betriebsabweichungen und im Störfall analysiert wurden. Dies sind die bislang detailliertesten Sicherheitsstudien, da sie die Grundlage der praktischen Realisierung eines Experimentierkraftwerks darstellen. ITER wurde durch den französischen Ministerpräsidenten am 10.11.2012 lizenziert. Damit hat ITER einen umfassenden Sicherheitsnachweis erbracht.

<http://www.iter.org/safety>

Medizinische Langzeituntersuchungen bei Mitarbeitern an Fusionsanlagen laufen im Rahmen der betriebsärztlichen Untersuchungen. Die Arbeitsbedingungen waren und sind im IPP aber derart, dass weitergehende Überwachungen völlig fehl am Platze wären.

*49. Fusionsneutronen können auch zur Erbrütung von Spaltstoffen (wie Plutonium) genutzt werden. Kann eine diesbezügliche Erbrütung ausgeschlossen werden? Wie sind sonstige Proliferationsrisiken von Fusionsreaktoren einzuschätzen (Tritium-Produktion, Know-how-Transfer, militärisch relevante Forschung)?*

In Wendelstein 7-X ergibt die Erbrütung von Plutonium keinen Sinn, da hierfür der erreichbare Neutronenfluss viel zu gering ist. In einem späteren Fusionskraftwerk wäre das Verfahren (technisch) nicht unmöglich, wäre aber wirtschaftlich und technisch weit weniger attraktiv als das – heute bereits mögliche – Erbrüten von Plutonium in Spaltkraftwerken. Auch die sonstigen Proliferationsrisiken sind niedrig: Die Tritium-Produktion in Schwerwasserreaktoren ist heute ein Standardverfahren, so dass hier Fusionskraftwerke keine neuen Vorteile bringen.

Fusionsanlagen mit magnetischem Einschluss sind militärisch völlig irrelevant und diese Forschung erhält keine Mittel aus militärischen Haushalten.

*50. Wo sehen Sie die ökologischen Nachteile der Energieerzeugung aus der Kernfusion?*

Hauptsächlicher ökologischer Nachteil von Fusionskraftwerken ist wohl, dass es diese grundlasttauglichen und klimafreundlichen Anlagen zurzeit noch nicht gibt. Die Nebenwirkungen künftiger Fusionskraftwerke, die mit der Gewinnung des Brennstoffs, dem Bau, Betrieb und Abbau der Anlagen verbunden sind, werden gering sein. Die von ihnen verursachten externen Kosten – als Indikator für die Umweltverträglichkeit – können sich mit den externen Kosten erneuerbarer Energien gut messen (siehe Antwort auf Frage 51).

*51. Wie schneidet die Kernfusion bei einer Lebenszyklus-Analyse im Vergleich zu anderen Formen der Energiegewinnung ab?*

Im Rahmen des europäischen „ExternE“-Projekts wurden die „externen Kosten“ unterschiedlicher Technologien analysiert. Darunter versteht man all jene Nebenwirkungs-Kosten, die nicht von den eigentlichen Marktteilnehmern getragen werden. Die ExternE-Methode versuchte, alle Nebenwirkungen einer Energie-wandlungstechnik aufzuspüren, ihre Auswirkungen zu beschreiben und – um eine Vergleichszahl zu erhalten – sie schließlich monetär zu bewerten. Um die verschiedenen Kraftwerksarten auf der Basis von Kohle, Erdgas, Kernspaltung, Biomasse, Wasser-, Wind- und Solarenergie sowie Fusion zu vergleichen, wurden alle Auswirkungen im Brennstoff- und Lebenszyklus der jeweiligen Anlagen untersucht. Für die Fusion umfasst diese Analyse die Gewinnung der Rohbrennstoffe Deuterium und Lithium, die Herstellung, den Bau und Betrieb des Kraftwerks sowie die Zwischenlagerung der radioaktiven Reststoffe. Es ergeben sich externe Kosten von rund einem Zehntel Eurocent pro erzeugter Kilowattstunde. Damit kann sich die Fusion leicht mit erneuerbaren Energietechniken wie Sonne und Wind vergleichen.

*52. Wie schätzen Sie die öffentliche Akzeptanz der Fusionstechnologie ein?*

Eine kommunikationswissenschaftliche Analyse der Berichterstattung über Fusionsforschung und -energie, welche die von 2010 bis Februar 2012 in deutschen Printmedien erschienenen Artikel untersuchte, stellte einen insgesamt positiven Tenor der Aussagen zur Fusion fest (Kepplinger et al., 2012). Eine IPP-eigene Analyse von Leserschriften zur Fusion in deutschen Printmedien zeigt, dass in der Öffentlichkeit überwiegend große Hoffnungen auf diese neue Energiequelle gesetzt werden. Die Reaktion der Öffentlichkeit auf IPP-Veranstaltungen wie Vorträge, Tage der Offenen Tür oder Ausstellungen zur Fusionsforschung, ist überwältigend positiv.

*53. Sollte Ihrer Meinung nach die Öffentlichkeit an der Diskussion um die Fusionsforschung beteiligt werden?*



Das IPP sieht sich in der Pflicht und unternimmt große Anstrengungen, die Öffentlichkeit über seine Forschungsarbeit zu informieren.

### **III. Kosten / Wirtschaftlichkeit**

54. *Was hat die gesamte Fusionsforschung (bezogen auf das Land Mecklenburg-Vorpommern, den Bund und die EU) bisher gekostet?*

Stichdatum Ende 2011 (gemäß Drucksache 6/243 Landtag Mecklenburg-Vorpommern) für die Kosten der Fusionsforschung in Mecklenburg-Vorpommern:

Bund 573,5 Mio€  
Land 120,0 Mio€  
EU 191,4 Mio€

Dem stehen 74 Mio€ Investitionen im Land (sogar ohne Gebäude) sowie 236 Mio€ Gehaltszahlungen entgegen.

55. *Wie viel davon ist öffentlich finanziert und welche Investitionen kommen aus der privaten Industrie (bezogen auf das Land Mecklenburg-Vorpommern, den Bund und die EU)?*

Das IPP betreibt Grundlagenforschung im Rahmen der Aufgaben der Max-Planck-Gesellschaft. Diese wird ausschließlich öffentlich finanziert.

Siehe auch Frage 26.

56. *Wie hoch werden die Kosten eingeschätzt, die für einen ersten Testreaktor, einen später geplanten zweiten Testreaktor und die weiteren Entwicklungsschritte bis hin zur ersten kommerziellen Stromerzeugung entstehen können?*

Nach ITER sieht die europäische Planung nur ein Demonstrationskraftwerk (DEMO) bis zu einem kommerziellen Kraftwerk vor. Da aber alle sieben ITER-Partner unbeschränkter Zugriff auf das Know-how haben, könnte die weitere Entwicklung zu einem kommerziellen Kraftwerk nicht mehr – wie bisher – in internationaler Zusammenarbeit aller Partner ablaufen, sondern die verschiedenen Länder könnten eigene Demonstrationskraftwerke bauen, so dass mehrere Anlagen parallel entstünden. Die Kosten für DEMO sind bisher nicht genau abschätzbar. Ein kommerzielles Kraftwerk sollte wegen der Lerneffekte in den Kosten etwas niedriger liegen, was für weitere Kraftwerke entsprechend stärker gelten sollte.

57. *In welcher Höhe und aus welchen Forschungsmitteln fördern gegenwärtig das Land M-V, der Bund und die EU die Kernfusionsforschung im Land? Wie hoch ist der Anteil der Forschungsmittel für die Kernfusion, die das Land M-V oder einzelne Forschungsinstitutionen im Land vom Bund bzw. der EU erhalten, am Gesamtvolumen der Mittel, die aus dem Bundeshaushalt bzw. dem Haushalt der EU für die Energieforschung im Land M-V zur Verfügung gestellt werden? Sind diesbezüglich in der kommenden Haushaltsperiode Änderungen vorgesehen? Welche Konsequenzen könnten sich aus der Tatsache, dass die Kernfusion nicht mehr Bestandteil des laufenden 6. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung ist, für die Fortführung der finanziellen Förderung des Projekts Wendelstein 7-X aus Bundesmitteln ergeben? Ist die europäische Förderung für Wendelstein 7-X für den Zeitraum nach 2013 gesichert?*

Wie aus der Verwaltungsvereinbarung ersichtlich, fördert das Land Mecklenburg-Vorpommern das IPP Greifswald und damit den Aufbau von Wendelstein 7-X mit jährlich 5.282 T€, der Bund mit 47.542 T€ und die EU mit ca. 6 Mio€. Die Höhe der Mittel, die dem Land für andere Projekte der Energieforschung zur Verfügung gestellt werden, ist dem IPP nicht bekannt. Von 2014 bis 2019 sind für die Fusionsforschung konstante Mittel vorgesehen. Die Kernfusion ist Bestandteil des Energieforschungsprogramms der Bundesregierung (siehe Antwort auf Frage 23). Bislang ist das EU-Budget für den Zeitraum nach 2013 nicht bekannt, daher kann es auch noch keine Zusage für die Finanzierung von Wendelstein 7-X enthalten. Die EU-Kommission hat allerdings klar gestellt, dass ihre Finanzierung sich an dem europäischen Fahrplan zur Fusionsenergie bis 2050 orientieren wird, der 2012 veröffentlicht wurde. Da Wendelstein 7-X in diesem Fahrplan einen entscheidenden Platz einnimmt, sind wir zuversichtlich, dass Wendelstein 7-X in etwa dem gleichen Maße wie bisher durch die EU gefördert werden wird.

*58. Wie oft und in welcher Form wird das deutsche und das europäische Fusionsprogramm durch unabhängige Gremien evaluiert? Findet eine regelmäßige Evaluierung des Fusionsexperiments Wendelstein 7-X statt?*

Die Max-Planck-Gesellschaft evaluiert ihre Institute regelmäßig durch international hochrangig besetzte wissenschaftliche Fachbeiräte. Für das IPP trifft sich dieser Fachbeirat bisher jährlich. Zudem besitzt das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik ein Kuratorium, dem namhafte Vertreter aus Wissenschaft, Politik und Industrie angehören. Den Vorsitz hat der Präsident der Max-Planck-Gesellschaft inne. Das Kuratorium überprüft die Tätigkeit und das Programm des Instituts zweimal im Jahr. Das europäische Fusionsprogramm wird von der EU-Kommission über einen Lenkungsausschuss in einem halbjährlichen Takt überprüft. Im Rahmen der „Programmorientierten Förderung“ evaluiert die Helmholtz-Gemeinschaft alle fünf Jahre die Grundausrichtung des IPP und seine strategische Rolle im Forschungsbereich Energie. Auch hierfür wird ein unabhängiges internationales Gremium aus Experten und fachfernen Gutachtern zusammengestellt. Wendelstein 7-X ist in allen o.g. Evaluierungskomitees ein zentraler Berichtspunkt. Berichte des Fachbeirates gehen an den Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft. Zudem wird das Projekt Wendelstein 7-X von einem Projektrat gesteuert, der halbjährlich den Projektfortschritt, Projektrisiken, Kostenstruktur und Zeitplan detailliert begutachtet. Mitglieder des Projektrates sind die Zuwendungsgeber, ein Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft, ein Mitglied des Fachbeirates und ein Mitglied des Kuratoriums. Zusammen mit fallweise angesetzten Sonder- und Zwischenevaluationen wird das Projekt Wendelstein 7-X damit jährlich zwischen 7 und 10 Mal begutachtet.

*59. Welche Schritte mit welchen geschätzten Kosten in welchem Zeitraum müssen ergriffen werden, bis ein wirtschaftlich nutzbarer Fusionsreaktor verfügbar ist?*

Zu den Schritten und Kosten nach ITER siehe Frage 56. Der Europäische „Fahrplan“ sieht ein Demonstrationskraftwerk bis 2045 vor; anschließend könnte ein kommerzielles Kraftwerk gebaut werden.

*60. Wie ist die Wettbewerbsfähigkeit von Fusionsreaktoren im Verhältnis zur Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien einzuschätzen? Gibt es Studien zu dieser Frage (wenn ja, bitte konkret benennen)? Welche Kosten werden in die Wirtschaftlichkeitsberechnungen einbezogen (Forschung, Betrieb,*

*Sicherheitsanlagen, Abfall, Abbau)? Welche Unsicherheiten bestehen in den Kostenschätzungen? Was soll davon die öffentliche Hand tragen?*

Die Stromgestehungskosten der Fusion lassen sich vorerst nur unsicher angeben, da sie stark von den physikalischen und technischen Fortschritten abhängen, die in den nächsten Jahrzehnten erzielt werden können. In der europäischen Kraftwerksstudie „European Fusion Power Plant Conceptual Study“ (PPCS, 2005), welche die zu erwartenden Sicherheits- und Umwelteigenschaften sowie die Kosten eines künftigen Fusionskraftwerks untersucht, wurden daher vier verschiedene Kraftwerksmodelle entwickelt. Sie beleuchten ein weites Spektrum physikalischer und technischer Möglichkeiten: Die jeweils zugehörigen Stromgestehungskosten berücksichtigen die Brennstoffgewinnung, den Bau, Betrieb und Abbau des Kraftwerks sowie die Lagerung der Rückstände. Es ergeben sich Kosten von fünf bis zehn Eurocent pro erzeugte Kilowattstunde für die zehnte Anlage ihrer Art. Damit liegen die Stromkosten der Fusion über den Kosten für konventionelle Kohle- und Kernkraftwerke, aber im gleichen Bereich wie andere umweltfreundliche Energietechniken wie Wind- oder Solarenergie. Berücksichtigt man weitergehende Lerneffekte, lassen sich bei völlig ausgereifter Technologie Kosten von 3 bis 5 Eurocent pro Kilowattstunde erwarten.

Zur Rolle der öffentlichen Hand siehe Antwort auf Frage 63.

*61. Wie fügt sich die Kernfusion in künftige Versorgungs- und Verbrauchsstrukturen ein?*

Mit etwa 1500 Megawatt elektrischer Leistung werden Fusionskraftwerke vor allem die Grundlast bedienen. Sie ließen sich wie heutige Großkraftwerke in das Verbundsystem der Stromversorgung einbinden. Auch in einer von erneuerbaren Energien dominierten Stromwirtschaft fänden Fusionskraftwerke ihren Platz: als Puffer für die von der Witterung abhängigen Wind- und Sonnenkraftwerke. Auch zur Wasserstofferzeugung – zugunsten emissionsarmen Verkehrs – könnten sie genutzt werden.

*62. Kann ein Fusionsreaktor unter den zu erwartenden Randbedingungen (Angebot, Nachfrage, liberalisierte Märkte, Kosten des Umweltschutzes) wirtschaftlich Strom erzeugen? Welche Stromgestehungskosten würden bei der Energieerzeugung durch Kernfusion bei Betrieb des ersten kommerziell Reaktors im Vergleich zur Nutzung anderer Energieträger anfallen? Wären diese Kosten wettbewerbsfähig und wenn nicht, welche Voraussetzungen müssten erfüllt sein, damit die Stromgestehungskosten ein wettbewerbsfähiges Niveau erreichen (z.B. Zahl der gebauten Fusionskraftwerke)?*

Die zukünftige Entwicklung der Energie- und Strommärkte kann nur mit erheblichen Unsicherheiten abgeschätzt werden. Die Randbedingungen, auf die die ersten Fusionskraftwerke ab der Jahrhundertmitte treffen werden, sind daher heute nicht verlässlich vorhersagbar. Sicher ist jedoch, dass die globale Nachfrage nach Primärenergie und Strom im 21. Jahrhundert noch einmal erheblich steigen wird. Europäische Studien gehen von einem Wachstum um mehr als den Faktor drei bei der Primärenergie und einem Faktor sechs bis sieben beim Strom aus. In dieser Situation wird eine ergiebige und nachhaltige Energiequelle wie die Fusion, die – nach kurzer Lernkurve, d.h. bei etwa der zehnten Anlage ihrer Art – bezüglich der Kosten im gleichen Bereich wie Wind- oder Solarenergie liegt, willkommen sein (siehe auch Antworten auf Fragen 60 und 63).

Es ist im Übrigen davor zu warnen, Kraftwerkskonzepte ausschließlich auf Basis der reinen Stromgestehungskosten zu vergleichen. Ein Kostenvergleich macht nur als Systemvergleich Sinn. Hierbei wäre ein System, das mit Fusionsstrom versorgt wird, zu vergleichen mit einem System, das hauptsächlich mit Wind- und Sonnenkraftwerken betrieben wird. Die unterschiedlichen Systemkosten sind dann der Vergleichsmaßstab, nicht die reinen Stromgestehungskosten. Beispielsweise zeigt eine Systemstudie zu einem künftigen transkontinentalen europäisch-nordafrikanischen Stromnetz, in das überwiegend Strom aus erneuerbaren Quellen eingespeist wird, dass selbst bei hohen Investitionskosten Fusionskraftwerke in diesem System eine ökonomisch sinnvolle Rolle spielen würden.

*63. Ließe sich Strom aus der Kernfusion in den Jahren der ersten Fusionskraftwerke ohne staatliche Förderung erzeugen und wenn nicht, wie hoch wird der Anteil staatlicher Förderung bis zum Erreichen eines wettbewerbsfähigen Erzeugermodells geschätzt?*

Da die Gestehungskosten des Fusionsstroms stark von den physikalischen und technischen Fortschritten abhängt, die in den nächsten Jahrzehnten erzielt werden können, lässt sich die Frage heute nicht sicher beantworten. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die ersten Kraftwerke wegen ihrer vergleichsweise hohen Investitionskosten nur mit staatlicher Unterstützung realisiert werden können. Hierfür sind vermutlich weit weniger Mittel nötig, als heute für die Markteinführung der Erneuerbaren Energien aufgewandt werden.

*64. Welche Leistung wird ein kommerziell genutzter Fusionsreaktor haben und wie fügt sich dieses Potenzial in eine zukünftige Struktur der Energieversorgung ein?*

Ein Fusionskraftwerk wird eine elektrische Leistung von ca. 1,5 GW haben. Ein Fusionskraftwerk könnte also sehr gut konventionelle Leistungskraftwerke ersetzen. Es stellt elektrische Leistung in Grundlast zur Verfügung, was vor allem für Ballungsräume attraktiv ist. Langzeitspeicher und Ausbau der Netze sind für die Fusionsenergie nicht erforderlich.

*65. Welchen Energiebedarf wird Wendelstein 7-X im Betrieb für Heizung und Magnete haben?*

Die Magnete sind supraleitend und haben daher während des Betriebes keinen Energiebedarf. Die Heizung setzt während der Erzeugung des Plasmas (zwischen 1 s und 30 min) eine elektrische Leistung zwischen 1 und 20 MW (30 min) bzw. bis zu 50 MW (10 s) um. Den Großteil des Energiebedarfs wird die Kryoplanlage benötigen, um die Magnete auf die für die Supraleitung notwendige Tieftemperatur abzukühlen. In Summe ist für ein Betriebsjahr des Wendelstein 7-X ein Energieverbrauch von rund 17.000 MWh zu erwarten.

*66. Welcher Marktanteil im Strommarkt wird für Fusionsreaktoren im Jahr 2050 bzw. im Jahr 2100 erwartet?*

Die Weltbevölkerung wächst rasant, vor allem in den Entwicklungs- und Schwellenländern: Bis 2100 könnte sie von heute 7 auf über 10 Milliarden steigen. Entsprechend wird der Energieverbrauch ansteigen. Der Weg der Fusion – wie auch der Erneuerbaren – in die künftige Energiewirtschaft hängt stark von den Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ab. Obwohl die Fusion eine neue und vergleichsweise kapitalintensive Technologie ist, wird sie in einem Europa, das

ehrgeizige Reduktionsziele umsetzt, einen deutlichen Anteil an der Stromproduktion erzielen. Unter dieser Voraussetzung könnte Fusion im Jahr 2100 etwa 20 bis 30 Prozent des europäischen Strombedarfs decken. Rein kostenoptimiert, d.h. in einer Welt, die sich um Treibhausgasemissionen nicht kümmert, wird auch Ende des 21. Jahrhunderts die Kohle noch den Hauptanteil der Stromproduktion tragen. Diese Zusammenhänge wurden in europäischen Studien für alle Weltregionen untersucht (siehe Abbildungen).

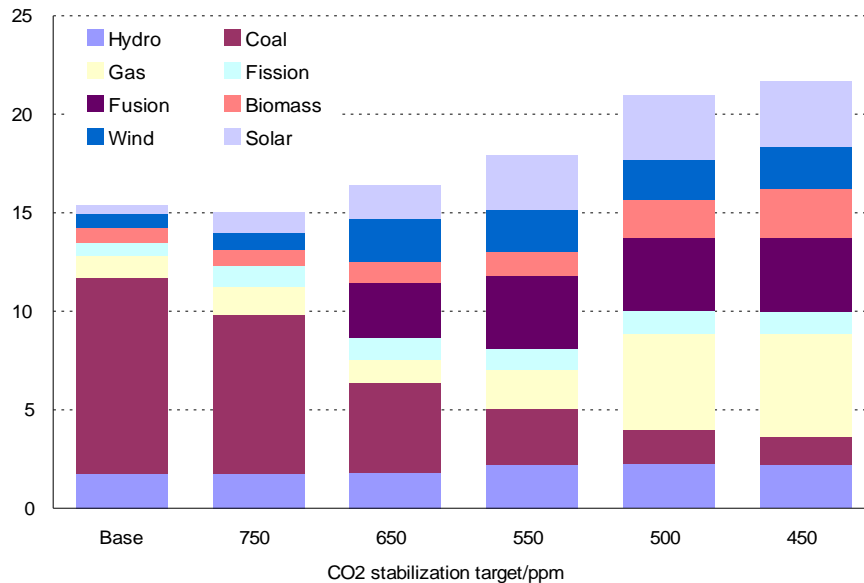


Abbildung: Die Zusammensetzung der Stromversorgung Westeuropas im 21. Jahrhundert hängt stark von der gewählten Umweltpolitik ab. Werden die Treibhausgasemissionen stark beschränkt, kommt es zum Einsatz neuer Technologien. Gewinner wären dann Fusion und Erneuerbare Energien (P. Lako et al, 1998, ECN-C-98-071).

**Global: Jährliche Welt-Stromerzeugung bei Beschränkung auf eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 550 ppm**

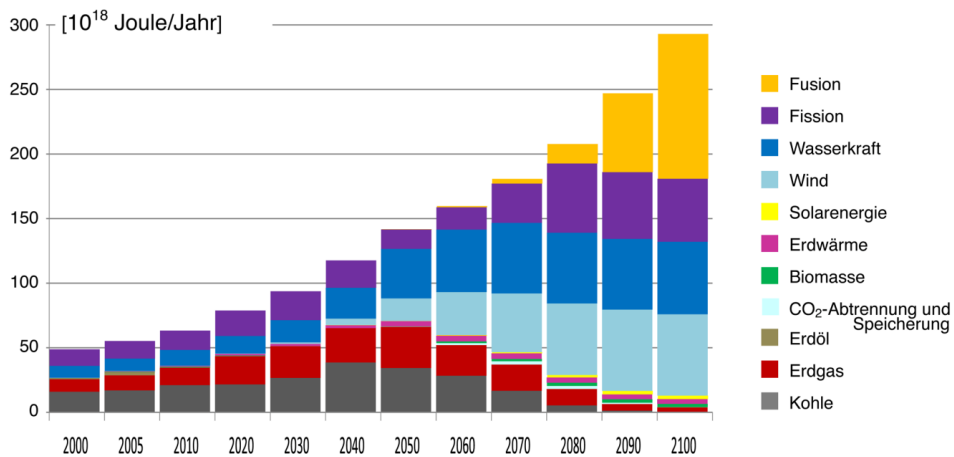


Abbildung: Die globale Stromversorgung im 21. Jahrhundert im Fall einer strengen Beschränkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen: Nach Erdgas und Kernspaltung setzen sich ab 2050 Erneuerbare und Fusion immer mehr durch (EFDA-TIMES-Modell, IPP).

67. *Mit welchen Energieträgern würde die Kernfusion in den Jahrzehnten 2050 ff. hauptsächlich in Konkurrenz stehen?*

In einer Welt mit strenger Beschränkung der Treibhausgas-Emissionen würden Fusionskraftwerke – zusammen mit Erneuerbaren – im Wesentlichen an die Stelle großer Kohle- und Kernkraftwerke treten.

### **Forschungspolitik, energiestrategische Bedeutung für Land und Bund**

68. *Wie ist das Verhältnis eingesetzter Forschungsmittel zum erwarteten Erfolg im Vergleich mit anderen Forschungsschwerpunkten der Energieforschung, wie zum Beispiel der Effizienzverbesserung bei energieintensiven Prozessen und Technologien (energiesparende Produktionsverfahren), der Werkstoff- und Materialforschung oder der Erforschung energie- und ressourcenschonender chemischer Prozesse (Katalysatorforschung)?*

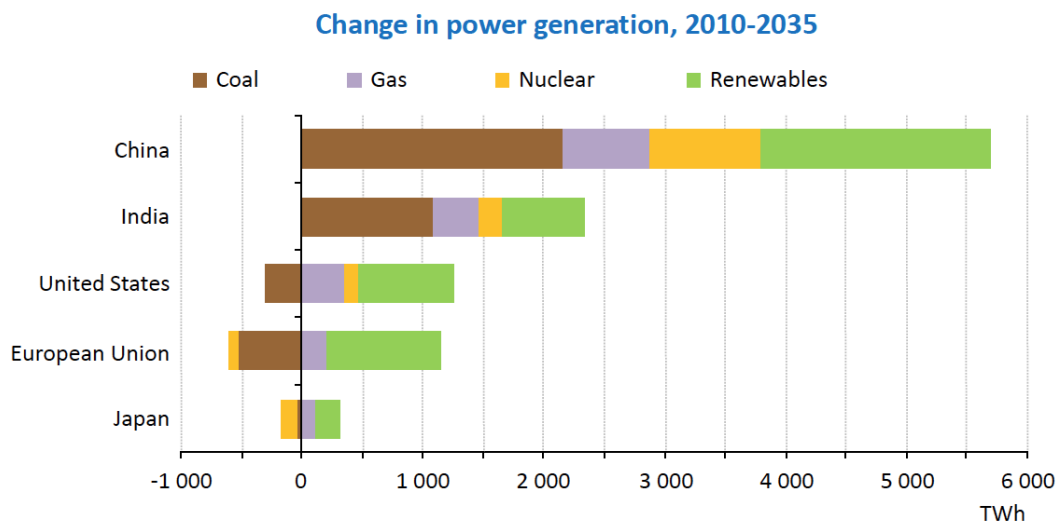
Zwischen diesen Alternativen sollte man keine Konkurrenz herstellen. Kurzfristig und in Deutschland sind die angeführten Beispiele sicher sehr erfolgversprechend. Auch global gesehen sind solche Maßnahmen sehr hilfreich, können aber allein das Energieproblem nicht lösen, weil deutliches Sparpotential nur bei wenigen „reichen“ Ländern besteht, die zurzeit einen extrem hohen Energieverbrauch pro Kopf aufweisen. Für den erwarteten Anstieg im Energieverbrauch werden aber vor allem die heutigen Schwellen- und Entwicklungsländer verantwortlich sein, bei denen der Energieverbrauch pro Kopf zurzeit so gering ist, dass mit wirtschaftlicher Entwicklung trotz sparsamen Umgangs mit Energie ein deutlicher Anstieg zu erwarten ist. Für diesen Bedarf müssen neue Primärenergiequellen – wie die Fusion – entwickelt werden. Methoden, einen sparsamen Energieverbrauch sicherzustellen, sind zusätzlich wichtig.

69. *In Deutschland sind nach Angaben der Agentur für Erneuerbare Energien aktuell ca. 380.000 Menschen in der Branche der Erneuerbaren Energien tätig. Dem gegenüber stehen schätzungsweise einige hundert Fusionsforscher. Welche Beschäftigungseffekte ließen sich erzielen, wenn die Mittel der Kernfusionsforschung der weiteren Erforschung der Nutzung erneuerbarer Energien zur Verfügung stünden?*

Erneuerbare Energien als neue Technologien sind ein wichtiger Faktor auf dem Arbeitsmarkt. Allerdings ist hier (wie auch bei der Fusionsforschung) zu beachten, dass diese Arbeitsplätze durch Gebühren (EEG) bzw. Steuermittel bezuschusst werden. Wenn man die 16 Mrd. € EEG-Förderung des Jahres 2012 als Anschubfinanzierung für 380.000 Arbeitsplätze betrachtet, folgt daraus ca. ein Betrag von 42.000 € Förderung pro Arbeitsplatz und Jahr. Am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik wird die Fusionsforschung mit einem deutschen Förderbetrag von 95 Mio € unterstützt. Davon werden ca. 30 bis 35 Mio € investiert, was jedoch in der Industrie hochqualifizierte Arbeitsplätze schafft. Bleibt ein Betrag von 60 bis 65 Mio € für die ca. 1100 Arbeitsplätze am Institut. Dem entspricht ein Betrag von ca. 55.000 bis 60.000 € pro Arbeitsplatz und Jahr – es handelt sich hier um höchstqualifizierte Wissenschaftler, Ingenieure und Handwerker in der Grundlagenforschung. Man kann bezweifeln, dass sich die Arbeitsmarktsituation in Deutschland deutlich ändern würde, wenn die Aufwendungen für die Fusionsforschung zusätzlich in den Bereich Erneuerbare Energien fließen würden.

70. Ist die Kernfusion überhaupt notwendig, wenn bedacht wird, dass in aktuellen Studien (z.B. WWF-Studie 2013 "Putting the EU on track for 100% Renewable Energy"; European Climate Foundation „Roadmap 2050 - Financing for a Zero-Carbon Power Sector in Europe“, 2011; für Deutschland: Fraunhofer ISE-Studie „100% für Strom und Wärme in Deutschland, 2012; Sondergutachten des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU) „Wege zur 100% erneuerbaren Stromversorgung“, 2010; Studie des Umweltbundesamtes (UBA) „Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen“, 2010; Papier des Sachverständigenrates Umwelt der Bundesregierung „100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, 2010;) für Europa eine 100-prozentige Deckung des Energiebedarfs durch Erneuerbare Energien bis 2050 als möglich erachtet wird und in anderen Erdteilen das Potenzial der Erneuerbaren Energien zumeist noch größer ist?

Erneuerbare Energien werden in Zukunft zweifellos weltweit eine wichtige Rolle spielen. Eine 100-Prozent-Versorgung ist zwar im Szenario darstellbar (auch in Systemstudien des europäischen Fusionsprogramms wurden solche Szenarien durchgerechnet), aber unrealistisch: In den vergangenen zehn Jahren wurde fast die Hälfte des Anstiegs der weltweiten Energienachfrage durch Kohle gedeckt, so die Internationale Energieagentur der OECD (IEA). Im Hauptszenario des aktuellen Weltenergieausblicks 2012, der bis in das Jahr 2035 reicht, geht die IEA davon aus, dass der globale Energieverbrauch um mehr als ein Drittel steigen wird, vor allem in China, Indien und dem Nahen Osten. Fast doppelt so schnell wie der Energieverbrauch wird der weltweite Strombedarf ansteigen. (Dabei wird das bis 2035 erwartete Wachstum des chinesischen Strombedarfs den derzeitigen Stromverbrauch der Vereinigten Staaten und Japans übersteigen.) Obwohl die Hälfte der zuzubauenden Kapazitäten auf erneuerbaren Energien beruhen wird, so die IEA, bleibt dennoch Kohle der weltweit führende Energieträger in der Stromerzeugung. Die zugehörigen Kraftwerke und Infrastrukturen sind auf Lebenszeiten von etwa 40 Jahren ausgelegt – und könnten danach durch Fusionskraftwerke ersetzt werden (siehe Abbildung). Eine attraktive Grundlasttechnologie wie die Fusion mit niedrigen Umweltauswirkungen, hoher Betriebssicherheit, quasi unbegrenzten Ressourcen, ohne langlebigen radioaktiven Abfall und frei von CO<sub>2</sub>-Emissionen wird in dieser Situation von großem Interesse sein.

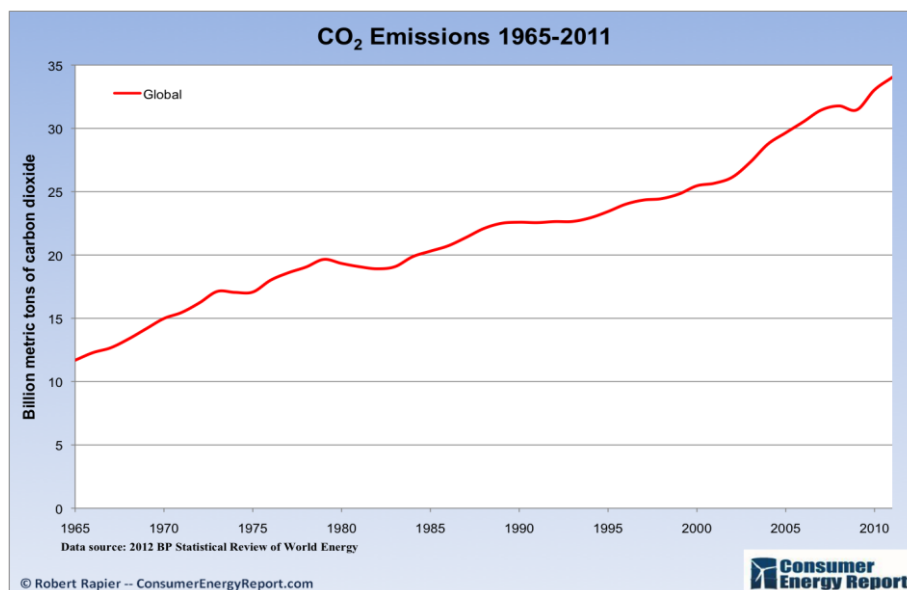


**The need for electricity in emerging economies drives a 70% increase in worldwide demand, with renewables accounting for half of new global capacity**

Zu ganz ähnlichen Zukunftserwartungen wie die IEA kommen auch viele andere, so etwa der Weltenergieericht in seiner Studie „Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050“ (Zitat: „At least by 2050, the world will need to double today’s level of energy supply to meet increased demand. ... Energy from renewable sources will have an important impact on markets during the time period, but will not dominate any market“ (World Energy Council, 2007)) oder der „BP Energy Outlook 2030“ (2013), der für das Jahr 2030 von einem Anteil fossiler Energiequellen an der Weltenergieversorgung in Höhe von 80 Prozent ausgeht. Und im „Konzept für ein integriertes Energieforschungsprogramm für Deutschland“ (2009), das von der Deutschen Akademie der Naturforscher, der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften „acatech“ und der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften erarbeitet wurde, heißt es: „Langfristig muss angestrebt werden, auch in einem regenerativen Energiesystem aus einer erwarteten Knappheits-situation herauszukommen. Hier bietet die Kernfusion, die aufgrund der faktisch unbegrenzten Brennstoffvorräte und der nahezu CO<sub>2</sub>-freien Energieerzeugung ebenfalls zu den regenerativen Energiequellen gezählt werden kann, langfristig die besten Perspektiven.“

71. *Wird die Kernfusion einen Beitrag zu den nationalen und internationalen CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen bis 2050 leisten können?*

Nein. Das CO<sub>2</sub>-Problem wird allerdings im Jahr 2050 keineswegs gelöst sein. Nach 2050 erwartet man bis 2100 einen weiteren Anstieg des Energiebedarfs um rund einen Faktor 2, der Strombedarf wird um einen Faktor 3 wachsen. Zudem steigt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß bislang ungebremst an (siehe Abbildung). Eine Trendwende in naher Zukunft ist nicht zu erwarten, zumal global die Verfügbarkeit von Gas und Öl aufgrund der Fracking-Technologie noch gestiegen ist. Daher ist es sinnvoll und wichtig, wenn nach 2050 eine neue CO<sub>2</sub>-freie Primärenergiequelle zur Verfügung steht, letztlich auch, um den Folgen des Klimawandels technisch begegnen zu können.



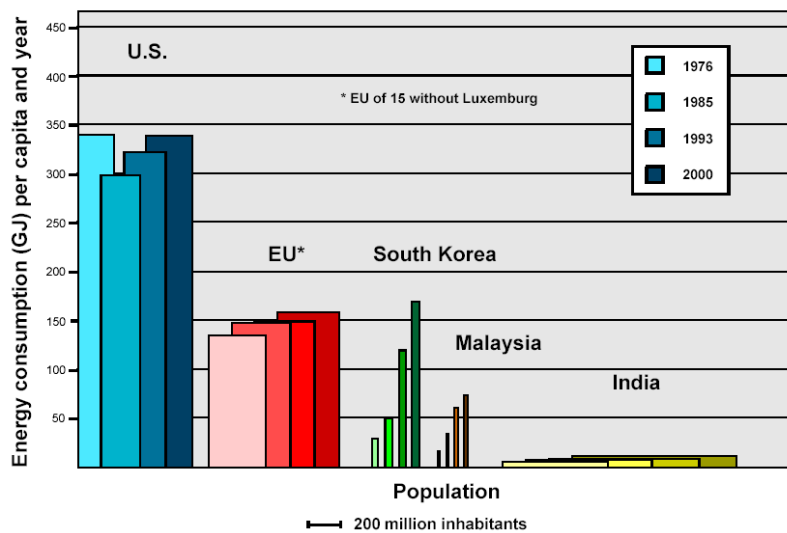
72. *Wird die Erforschung anderer wesentlicher Potenziale künftiger Energieversorgung durch die Forschungsförderung im Bereich der Kernfusion vernachlässigt?*



Wir glauben nicht, dass die Förderung der Kernfusion einen deutlichen (negativen) Effekt auf den Bereich der erneuerbaren Energien hat (siehe auch Antwort auf Frage 69).

73. Insbesondere in Entwicklungsländern wird der Energieverbrauch enorm wachsen. Welchen Beitrag kann die Fusionsenergie leisten, um diesen steigenden Bedarf abzudecken? Glauben Sie, dass Fusionskraftwerke in Entwicklungsländern eine für die dortige Bevölkerung bezahlbare Alternative zu Kohle, Öl und regenerativen Energien sind?

Der Energieverbrauch in heutigen Entwicklungsländern wird dann stark ansteigen, wenn die Industrialisierung in diesen Ländern fortschreitet (siehe Abbildung). Daher wird in Zukunft auch eine Hochtechnologie wie die Fusion für diese Länder nutzbar – zumal der Brennstoff weltweit ohne Einschränkungen verfügbar wäre.



Quelle: Scientific Technical Committee Report 2002