

Strukturwerkstoffe für die Fusionstechnik

A. Möslang, J. Aktaa, J. Konys, IMF; S. Gross, FUSION

Anforderungen an Strukturwerkstoffe

Die rechtzeitige Verfügbarkeit von geeigneten Strukturwerkstoffen ist entscheidend für Langlebigkeit, Reaktorwirkungsgrad, Wirtschaftlichkeit, Sicherheit und Entsorgung von zukünftigen Fusionsreaktoren. In Tab. 1 sind einige Eckdaten für die Entwicklungsstufen von Fusionsreaktoren dargestellt. Die für die Materialentwicklung entscheidenden Daten [1] sind insbesondere Oberflächenwärmestrom und Neutronenbelastung in MW/m^2 , Verlagerungsschädigungsraten, die jeweiligen integralen Jahresdosen, sowie Betriebsmodi und erwartete Gesamtlebensdauer. Langfristig gesehen sind Strukturwerkstoffe zu entwickeln, die in wirtschaftlich attraktiven Blankets und Divertoren einer komplexen Überlagerung intensiver Neutronen- und Wärmestrahlung,

Brut- und Kühlmiteleinflüssen und thermisch-mechanischer Wechselverformung über viele Jahre hinweg standhalten und darüber hinaus umweltschonende radiologische Eigenschaften haben. Dabei dient das sogenannte Blanket – die Ummantelung der Plasmabrennkammer – der Umwandlung der Neutronenenergie in Wärme, der Erbrütung des Brennstoffs Tritium und der Abschirmung der Magnete gegen Strahlung. Die Hauptaufgabe des sogenannten Divertors liegt hingegen in der Abfuhr gasförmiger „Ascheprodukte“ aus der Brennkammer.

Während für das neutronisch hochbelastete Brutblanket das avisierte Temperaturfenster der Strukturwerkstoffe zwischen 250 und 550 °C (eventuell 650 °C) liegt, werden für den thermisch extrem belasteten Divertor Strukturwerkstoffe bzw. Schutzschichten bis ca. 1200 °C gefordert.

Auswahlkriterien

Bei vorgegebenem Designkonzept sind für die Werkstoffauswahl in einem ersten Schritt klassische Eigenschaften zur Thermophysik, Mechanik, von grundlegender Bedeutung. Um die aussichtsreichsten Kombinationen zwischen Strukturwerkstoff, Kühlmedium, Neutronenvervielfacher und Brutmedium zu bestimmen sind darüber hinaus umfangreiche Korrosions- und Kompatibilitätsuntersuchungen notwendig. Schließlich sollte für die ausgewählten Werkstoffklassen industrielle Erfahrung in der Herstellungs- und Verbindungstechnologie sowie in der Halbzeugbearbeitung verfügbar sein. Der neutronisch nur schwach belastete Fusionsreaktor ITER bedarf noch keiner eigenständigen Strukturwerkstoffentwicklung; ein aus der konventionellen Kerntechnik gut bekannter austeniti-

	ITER	DEMO	REACTOR
Fusionsleistung	0.5-0.7 GW	2-4 GW	3-4 GW
Blanket (Erste Wand): – Neutronische Belastung – Integrale Belastung – Integrale Strahlenschädigung	0.5-0.7 MW/m^2 0.2-0.4 MWy/m^2 2-4 dpa	2-3 MW/m^2 3-8 MWy/m^2 30-80 dpa	2-3 MW/m^2 10-15 MWy/m^2 100-150 dpa
Divertor: – Wärmebelastung – Integrale Strahlenschädigung	ca. 10 MW/m^2 ≤ 2 dpa	10-15 MW/m^2 ≤ 27 dpa	10-15 MW/m^2 ≤ 50 dpa
Betriebsmodus	Gepulst (> 400 s) < $5 \cdot 10^4$ Zyklen	Quasikontinuierlich	
Nettowirkungsgrad (Gesamtanlage)			≥ 35 %

Tab. 1: Für die Werkstoffentwicklung relevante Eckdaten zukünftiger Fusionsreaktoren. 1 dpa (displacements per atom) bedeutet, dass während der Bestrahlung jedes Atom im Mittel einmal von seinem Gitterplatz verlagert wurde.

scher Stahl, ein sogenannter X2CrNiMo17-13-3 Stahl (316 LN), reicht dafür aus heutiger Sicht aus.

Ein zweites wichtiges Auswahlkriterium ist das Werkstoffverhalten unter massiver Bestrahlung mit Fusionsneutronen. Auf ihrem Weg durch das Blanket bzw. den Divertor erzeugen die Neutronen durch Stöße mit den Gitteratomen der Materialien die sogenannte Verlagerungsschädigung, welche ihrerseits makroskopische Werkstoffeigenschaften deutlich verschlechtern kann. Als ein Maß dieser sogenannten Verlagerungsschädigung hat sich die Zahl der Verlagerungen pro Gitteratom (*displacement per atom*) etabliert. Schließlich sind mit den hohen Neutronenenergien Kernumwandlungsreaktionen verbunden, bei denen die versprödungswirksamen Elemente Wasserstoff und Helium im Gegensatz zu Spaltreaktoren in signifikanten Konzentrationen anfallen. Die neutroneninduzierte Schädigung der ersten Wand eines Leistungsreaktors wird sich in metallischen Werkstoffen auf typischerweise 25 dpa, 0,025 % Helium und etwa 0,1250 % Wasserstoff pro Betriebsjahr belaufen, so dass an Strukturmaterialien eines Fusionsreaktors bei vergleichbaren Neutronenflüssen und Standzeiten höhere Anforderungen zu stellen sind als an jene konventioneller Spaltungsreaktoren.

Ein drittes und für die Werkstoffentwicklung einzigartiges Auswahlkriterium ist schließlich die bestrahlungsinduzierte Aktivierung. Ein besonderer Vorteil der Fusionstechnologie ist das völlige

ge Fehlen spaltbarer schwerer Elemente und die damit einhergehende Bildung sehr langlebiger und zum Teil weiterhin spaltbarer Radioisotope. Damit verbleibt im Fusionsreaktor als wesentliche Quelle für die Bildung von Radioaktivität ein Neutroneneinfang in plasmanahen Werkstoffen. Es ist deshalb nur konsequent, durch geschickte Wahl von Legierungselementen nur reduziert aktivierbare Werkstoffe anzustreben, um Probleme der Wiederaufarbeitung, Stilllegung und Endlagerung von Anfang an grundlegend zu entschärfen.

Bewertung unterschiedlicher Werkstoffklassen

Die genannten Kriterien haben in jüngerer Zeit zu einer weltweiten Konzentration der FuE-Untersuchungen auf wenige Werkstoffklassen geführt. Für Blanketanwendungen sind dies die drei Strukturwerkstoffklassen der reduziert aktivierbaren ferritisch-martensitischen (RAFM) Stähle, der Vanadiumlegierungen und der SiC/SiC-Faserverbunde. Alle drei Klassen erfüllen zwar heute prinzipiell das Kriterium der „niedrigen Aktivierbarkeit“, sind aber ansonsten schon allein aufgrund ihres unterschiedlichen technischen Entwicklungsgrads nur bedingt vergleichbar. Derzeit untersuchte Vanadium-Legierungen haben zwar eine attraktive Kombination von thermophysikalischen Eigenschaften, Warmfestigkeit und Radioaktivitätszerfall, neigen allerdings bei Bestrahlung unterhalb 400 °C zu erheblichem Bruchzähigkeitsverlust und über die hohe Löslichkeit

interstitieller Verunreinigungen (H-Isotope, O, C, N) zu massiver Versprödung oberhalb ca. 550 °C. SiC/SiC-Faserverbunde zeichnen sich durch geringe Aktivierbarkeit und Nachzerfallswärme sowie durch sehr hohe Einsatztemperaturen aus. Die Wahrung der strukturellen Integrität muss aber für hohe Neutronendosen noch grundlegend nachgewiesen werden. Außerdem fehlen für große SiC/SiC-Komponenten die Herstellungstechnologien sowie ein geeignetes Auslegungsregelwerk für den Komponentenbau. Im Hinblick auf die extreme Wärmebelastung von Divertoren kommen im plasmanahen Bereich aus heutiger Sicht nur hochwarmfeste, oxiddispersionsgehärtete (ODS) W-Legierungen (z.B. W-La₂O₃), und im Kühlmittel ein- und -auslassbereich ebenfalls oxiddispersionsgehärtete, reduziert aktivierbare ferritisch-martensitische (RAFM-ODS) Stähle in Betracht.

Entwicklung und Eigenschaften reduziert aktivierbarer Stähle

Das Forschungszentrum Karlsruhe trug zunächst mit wesentlichen Erweiterungen bestehender Kerndatenbibliotheken und entsprechenden Rechencode-Optimierungen zu einer verlässlichen Vorhersage des Aktivierungsverhaltens in Fusionsreaktoren bei. Mit Hilfe dieser Aktivierungsrechnungen [2] und ausgehend vom konventionellen, ebenfalls am Forschungszentrum entwickelten konventionellen Stahl MANET, beteiligte sich das Zentrum anschließend wesentlich an der weltweiten Entwicklung reduziert

aktivierender, sogenannter RAFM-Stähle durch eine breitangelegte, systematische Legierungsvariation (OPTIFER-Schmelzen). Ein besonderes Merkmal der RAFM-Stahlklasse ist die vollständige Substitution radiologisch unerwünschter Hauptlegierungselemente wie Mo, Ni, Nb durch die Elemente W, Ta und Ti. Als Ergebnis der bisherigen Arbeiten wurde unter Federführung des Forschungszentrums der Referenzwerkstoff EUROFER-97 als 3,5-Tonnenschmelze eingeführt und an europäische Assoziationen

verteilt. In der Abb. 1 ist das berechnete Abklingverhalten für die genannten Stähle, den japanischen Referenzstahl F82H-mod sowie für reines Eisen nach einer angenommenen Bestrahlung von 12,5 MWa/m² in einer Ersten Wand eines DEMO-Reaktors aufgetragen. Der Schnittpunkt der einzelnen Abklingkurven mit dem sogenannten „Hands-on-Level“, ab dem eine ganzjährige Hantierung ohne jegliche Abschirmung erlaubt ist, verdeutlicht das erhebliche Potential einer diesbezüglichen Materialoptimierung.

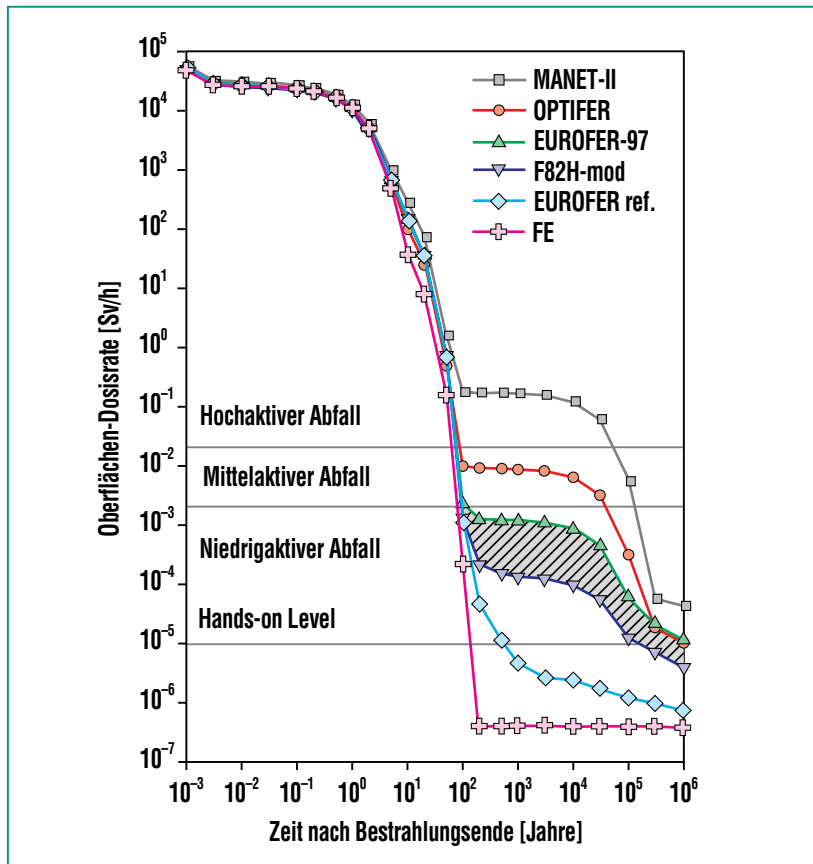


Abb. 1: Berechnetes Abklingverhalten der Oberflächen-Dosisrate in Eisen und ferritisch-martensitischen Stählen nach Bestrahlungsende in der Ersten Wand eines Fusionsleistungsreaktors. Radiologische Verunreinigungen – bisherige Legierungen liegen aus Kostengründen innerhalb der schraffierten Fläche – begrenzen noch das Entwicklungspotential (EUROFER-ref).

Das schraffierte Gebiet heutiger technologischer Großschmelzen ist im Wesentlichen durch den Nb-Gehalt bestimmt und damit letztlich eine Kostenfrage. EUROFER-ref ist mit gleichen Legierungselementen, aber auf der Basis technisch noch umsetzbarer Verunreinigungenkonzentrationen errechnet worden. Für die Praxis von erheblicher Bedeutung ist die Tatsache, dass schon nach etwa 80 Jahren Abklingzeit alle genannten RAFM-Stähle die Klassifikation „mittelaktiver Abfall“ und nach ca. 90-120 Jahren die Klassifikation „niedrigaktiver Abfall“ erfüllen.

Da plasmanahere RAFM-Strukturwerkstoffe je nach Blanketdesign ein weites Temperaturfenster von ca. 250-550 °C abdecken müssen und die Hochtemperatureigenschaften oberhalb 400 °C als unkritisch gelten, steht bezüglich der mechanischen Eigenschaften besonders die Optimierung der Bestrahlungsversprödung im unteren Temperaturbereich bis zu mittleren Schädigungsdosen (15-30 dpa) im Vordergrund derzeitiger Spaltreaktorbestrahlungen. Abb. 2 zeigt, dass reduziert aktivierbare 7-9CrWVTa Stähle wie OPTIFER-V, F82H-mod oder EUROFER weit geringere Sprödbruchübergangstemperaturen aufweisen als konventionelle Stähle wie MANET, und dass hierbei der Bor- bzw. Heliumgehalt eine sehr entscheidende Rolle spielt [3]. Das Isotop ¹⁰B – es ist in natürlichem Bor zu 20% enthalten – wandelt sich unter Neutronenbestrahlung innerhalb kurzer Zeit vollständig in versprödungswirksames Heliumgas um.

Derzeit werden die Bestrahlungen der EUROFER-Entwicklungslinie bis zu 70 dpa ausgedehnt. Des Weiteren sind hier nicht mehr näher beschriebene Korrosionsanalysen sowie breit angelegte metallkundliche, mechanische und verfahrenstechnologische Untersuchungen im Gange zur Etablierung einer auslegungsrelevanten Datenbank.

Ein junges Arbeitsthema befasst sich mit der Neuentwicklung von reduziert aktivierbaren Legierungen mit nanometergroßen, oxidischen Einschlüssen auf pulvermetallurgischer Basis. Erste Langzeit-Festigkeitsuntersuchungen zeigen (Abb. 3), dass oxiddispersionsgehärtete Legierungen wie EUROFER-ODS in auslegungsrelevanten Spannungsbereichen die obere Betriebstemperatur von 550 °C um etwa 100 °C anheben und damit einhergehend in

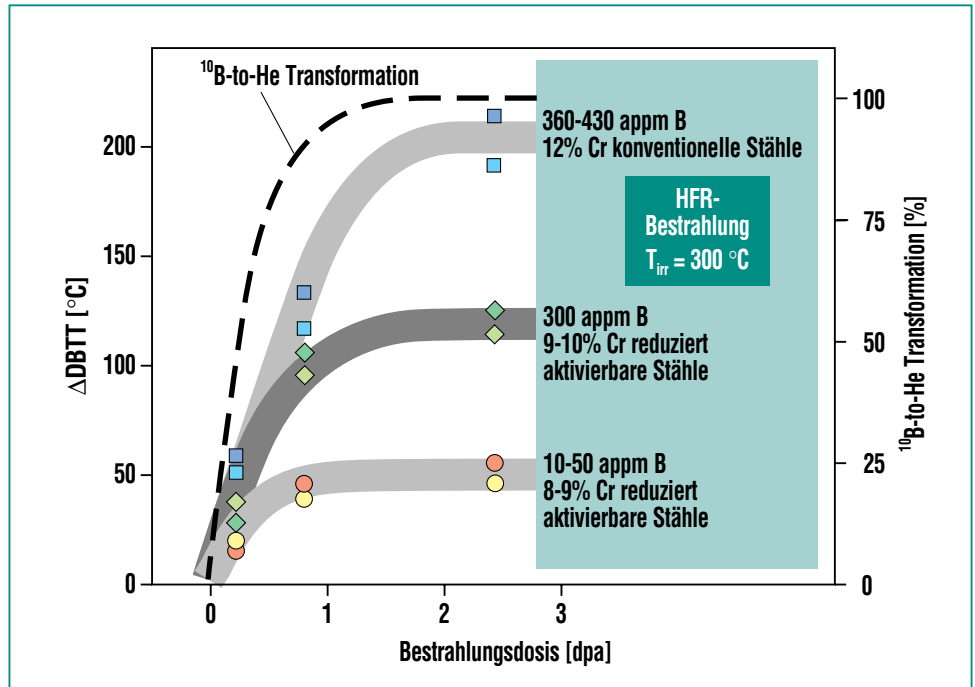


Abb. 2: Sprödbrechübergangstemperatur (DBTT) als Funktion der Verlagerungsschädigung in dpa nach Neutronenbestrahlung. Die reduziert aktivierbaren ferritisch-martensitische Stähle OPTIFER-V, ORNL 3971 und F82H sind mit ihren niedrigen Borgehalten den konventionellen Stählen MANET I und MANET II (obere Bildhälfte) deutlich überlegen.

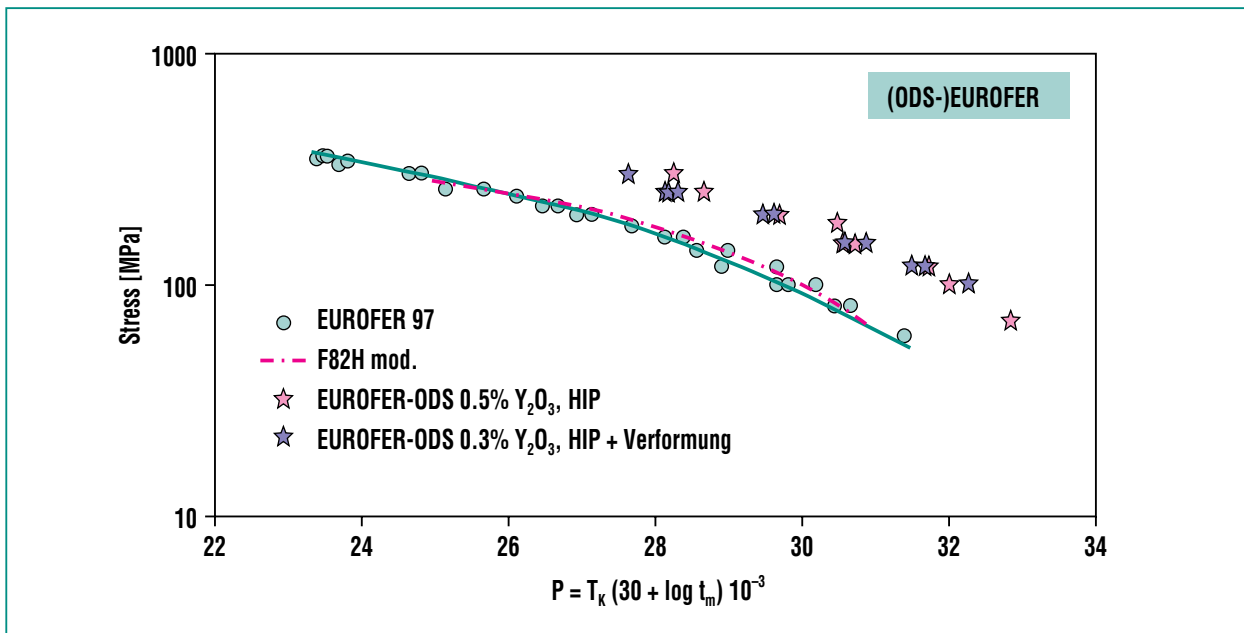


Abb. 3: Zeitstand-Hauptkurven (Larson-Miller-Parameter) für reduziert aktivierbare ferritisch-martensitische Referenzlegierungen. Oxiddispersionsgehärtete Stähle (EUROFER-ODS) erhöhen die obere Einsatztemperatur von 550 °C auf ca. 650 °C.

geeigneten Blanketdesigns den Wirkungsgrad von Fusionsreaktoren erheblich verbessern [4]. Im gezeigten standardisierten Larson-Miller Diagramm lassen sich

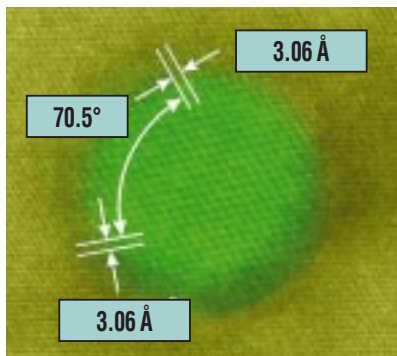


Abb. 4: Hochaufgelöste transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme eines teilkohärenten Y_2O_3 -Teilchens in EUROFER-Stahlmatrix.

auf der Abszisse Bruchzeit t_m und Testtemperatur T_k ineinander umrechnen. Qualität und Leistungsfähigkeit pulvermetallurgisch hergestellter ODS-Legierungen hängen entscheidend von der homogenen Verteilung sowie der mittleren Größe (typischerweise 5-20 nm) der Y_2O_3 -Nanoteilchen ab (Abb. 4).

Parallel zur Werkstoffentwicklung werden am Forschungszentrum Karlsruhe zur mechanischen Auslegung von Komponenten in Fusionsreaktoren Regelwerke (sogenannte Designcodes) zum sicheren Reaktorbetrieb entwickelt, die den speziellen Eigenschaften von RAFM-Stählen Rechnung tragen. Die Arbeiten umfassen die Formulierung neuer

Regeln für verschiedene Temperaturbereiche, die Qualifizierung fortgeschrittener Lebensdauer vorhersage-Modelle sowie die Validierung der Regeln durch Versuche an Blanketkomponenten.

Die Materialforschungsinstitute des Forschungszentrums Karlsruhe decken die wesentlichsten zur Strukturwerkstoffentwicklung notwendigen Expertisen ab. In Europa und Japan ist diese Entwicklung zentraler Bestandteil einer Fusionsstrategie, welche auf dem Weg zu einem Demonstrations-Leistungsreaktor neben ITER auch den Bau einer geeigneten intensiven Neutronenquelle beinhaltet. Da ITER aufgrund der geringen Neutronendosis praktisch keinen Beitrag zur Werk-

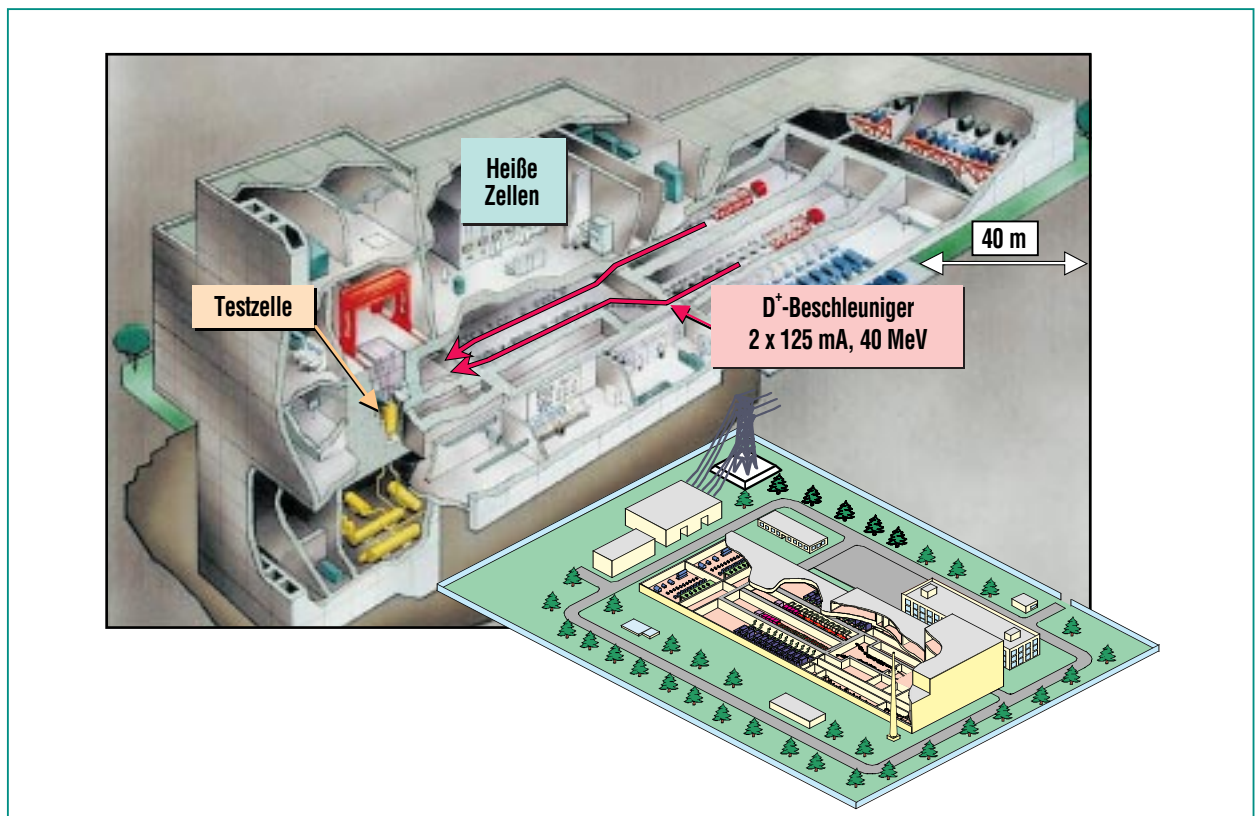


Abb. 5: Designstudie der beschleunigergetriebenen intensiven Neutronenquelle IFMIF zur Werkstoffentwicklung unter fusionspezifischen Belastungen.

stoffentwicklung für Leistungsreaktoren beitragen kann, ist eine solche Neutronenquelle für eine auslegungsrelevante Qualifizierung von Strukturwerkstoffen unabdingbar. Das favorisierte Konzept basiert auf zwei beschleunigergetriebenen 40 MeV Deuteronenstrahlen, welche mit Hilfe eines gemeinsamen Lithiumtargets in einem genügend großen Volumen eine sehr intensive Neutronenquelle mit fusionsähnlichem Spektrum erzeugen (Abb. 5). Im Rahmen einer IEA-kooordinierten Studie werden für diese „International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)“ Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die darauf ausgerichtet sind, die für eine Bauentscheidung erforderlichen technischen Grundlagen zu schaffen [5]. Zu dieser Neutronenquelle hat das Forschungszentrum die Designentwicklung der Bestrahlungskomponenten sowie die Leitung der europäischen Beiträge übernommen.

Zusammenfassung

Wesentliches Ziel einer reaktororientierten Entwicklung ist die Bereitstellung einer Datenbasis von neutronisch und thermisch hochbelastbaren Strukturwerkstoffen, welche darüber hinaus das Kriterium niedrige bzw. reduzierte Aktivierbarkeit erfüllen. Eine seit den frühen neunziger Jahren in Richtung niedrige Aktivierbarkeit betriebene Legierungsentwicklung auf dem Gebiet der ferritisch-martensitische Stähle konnte bis dato zeigen, dass eine wesentliche Verbesserung der radiologischen Eigenschaften gleichzeitig auch mit deutlich verbesserten Bestrahlungseigenschaften einhergeht. Darüber hinaus haben reduziert aktivierbare ferritische Stähle durch Oxiddispersionshärtung das Potential, bis zu 650 °C oder noch darüber hinaus eingesetzt werden zu können. Demgegenüber steht die Wolfram-Legierungsentwicklung

für Divertoren noch am Anfang. Zur fusionsrelevanten Hochdosisbestrahlung aller Werkstoffe wird derzeit unter der Schirmherrschaft der Internationalen Energieagentur (IEA) die intensive Neutronenquelle IFMIF entwickelt.

Literatur

- [1] K. Ehrlich, E.E. Bloom, T. Kondo, *Journ. Nucl. Mater.* 283-287 (2000) S. 79-88
- [2] K. Ehrlich, S.W. Cierjacks, S. Kelzenberg, A. Möslang, "The development of structural materials for reduced long-term activation"; in: *Effects of Radiation on Materials STP 1270*; Hrgr: D.E. Gelles, ASTM West Conshohocken, USA, August 1996, S. 1109-1122.
- [3] H.C. Schneider, B. Dafferner, J. Aktaa, *Journ. Nucl. Mater.* 321 (2003) 135.
- [4] R. Lindau, M. Klimiankou, A. Möslang, M. Rieth, "Development of a RAFM ODS Steel with improved ductility basing on the European RAFM reference steel Eurofer97"; *ICFRM-11*, 6.-12. Dec. 2003, Kyoto
- [5] W. Krauss, J. Konys, P. Norajitra, V. Filatov, "Materials development for gas-cooled high-performance divertors for power plant application"; *ICFRM-11*, 6.-12. Dec. 2003, Kyoto
- [6] A. Möslang et. al., "Recent advances at the International Fusion Materials Irradiation Facility IFMIF"; *19th IAEA Fusion Energy Conference, 14-19 Oct. 2002, Lyon*; Tagungsband http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_019c/html/node328.htm