

# **Kompetenzverbund Kerntechnik**

**Sustainable Nuclear Energy Technology Platform:**

**Themengebiete der Strategic Research Agenda**

**Interessenlage hinsichtlich deutscher Beteiligung**

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Feststellung deutscher Interessen an Gebieten der SRA .....</b>	<b>3</b>
3.1	Derzeitige und zukünftige Leichtwasserreaktoren .....	3
3.1.1	Langfristiger Betrieb.....	4
3.1.2	Verbesserung der Betriebseigenschaften .....	6
3.1.3	Externe Einflüsse.....	7
3.1.4	Entsorgung und Stilllegung .....	7
3.2	Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe zur Abfallminimierung und optimierten Ressourcennutzung .....	8
3.3	Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum (SFR, LFR, GFR, ADS).....	9
3.4	Anwendung von Kernenergie für andere Zwecke als die Stromerzeugung (HTR).....	11
3.5	Entwicklung von Kompetenzen und Forschungsinfrastrukturen .....	12
3.5.1	Strukturwerkstoffe.....	12
3.5.2	Pränormative Forschung, Regeln und Standards.....	13
3.5.3	Modellierung, Simulation und Methoden .....	14
3.5.4	Brennstoff .....	15
3.5.5	Sicherheit .....	16
3.5.6	Neue Infrastrukturen nuklearer Großforschung .....	16
3.5.7	Ausbildung, Training und Wissensmanagement .....	17
<b>4</b>	<b>Gemeinsame deutsche Positionen.....</b>	<b>18</b>
4.1	Themen hohen gemeinsamen Interesses .....	19
4.2	Themen hohen Einzelinteresses und Unterstützung der übrigen Gruppierungen.....	20
4.3	Themen hohen Einzel-, aber geringen Allgemeininteresses .....	24

<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Wertung .....</b>	<b>27</b>
5.1	Derzeitige und zukünftige Leichtwasserreaktoren .....	27
5.2	Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe zur Abfallminimierung und optimierten Ressourcennutzung .....	27
5.3	Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum und geschlossenem Brennstoffkreislauf (SFR,LFR,GFR,ADS) .....	28
5.4	Anwendung der Kernenergie für andere Zwecke als die Stromerzeugung (HTR).....	28
5.5	Entwicklung von Kompetenzen und Forschungsinfrastrukturen .....	29
<b>6</b>	<b>Weitergehende Kommentare .....</b>	<b>29</b>
<b>7</b>	<b>Quellen .....</b>	<b>33</b>

# 1 Einleitung

SNE-TP: Die Zielsetzung der SNE-TP ist die Schaffung von Voraussetzungen für die Weiterentwicklung und die Ausweitung der Kernenergienutzung, als wesentlichen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-armen Energieversorgung Europas bis 2050, wie er im Strategic Energy Technology Plan (SET Plan) entworfen ist. Hierzu sollen die europäischen Forschungskapazitäten integriert und ausgebaut werden. Zur Beschreibung der Zeithorizonte orientiert sich die SNE-TP an den Definitionen des SET Plans. Danach bedeuten

- kurzfristig (K): bis ca. 2012
- mittelfristig (M): bis ca. 2020
- langfristig (L): bis ca. 2040 bzw. 2050.

Die Konkretisierung der Einzelzielsetzungen der SNE-TP erfolgt in der inzwischen verabschiedeten Strategic Research Agenda (SRA). In die Erstellung der SRA sind französische Gesichtspunkte sehr stark eingeflossen, da sowohl industrieseitig (Betreiber und Hersteller) als auch in der Kernenergieforschung Frankreich eine dominante Rolle in Europa spielt.

Deutschland hingegen besitzt eine gut aufgestellte Forschungslandschaft auf nuklearem Gebiet, hat sich aber hinsichtlich Nutzung und Fortentwicklung der Kernenergie besonderen Regelungen unterworfen. Besonders hinsichtlich der zukünftigen Umsetzung der SRA ist daher die Abstimmung und Bündelung deutscher Ressourcen und Ziele erforderlich, um den deutschen Interessen angemessene Berücksichtigung zu verschaffen. Der Kompetenzverbund Kerntechnik, der als Austausch- und Koordinationsgremium insbesondere für die Forschung auf nuklearem Gebiet fungiert, hat dafür die Aufgabe der Ermittlung deutscher Positionen bezüglich der SRA übernommen, die gemeinsam auf allen Ebenen der SNE-TP vertreten werden können. Darüber hinaus hindert dies einzelne Teilnehmer aber nicht, auf Gebieten ihres besonderen Interesses in den Gremien der SNE-TP eigene Positionen zu vertreten. Dies sollte aber in Abstimmung mit den anderen deutschen Teilnehmern geschehen, um widersprüchliche Diskussionen der deutschen Delegationen in internationalen Gremien zu vermeiden.

Das vorliegende Papier liefert Grundlagen zum gemeinsamen Handeln zur Umsetzung der SRA. Es kann insbesondere als Leitfaden für eine arbeitsteilige Teilnahme an europäischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten dienen und entspricht damit der Zielsetzung des Kompetenzverbundes Kerntechnik.

## 2 Zusammenfassung

Im Folgenden werden die wesentlichen Arbeitsgebiete der SRA aufgegriffen und deren Zielsetzungen hinsichtlich möglicher Mitwirkung deutscher Stellen analysiert und bewertet. Mitwirkung kann hier die Unterstützung von Fach- und Entscheidungsgremien, finanzieller oder materieller Unterstützung oder direkte Mitarbeit an Forschungsprojekten bedeuten.

Die Auswertung folgt der Struktur der SRA und behandelt die Gebiete

- derzeitige und zukünftige Leichtwasserreaktoren
- fortschrittliche Brennstoffkreisläufe zur Abfallminimierung und optimierten Ressourcennutzung
- Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum (SFR, LFR, GFR, ADS)
- Nutzung nuklearer Prozesswärme (HTR)
- Entwicklung von Kompetenzen und Forschungsinfrastrukturen.

Die Einschätzung des deutschen Interesses an aufgeführten Untersuchungsgebieten und Teilfragestellungen gründet sich auf Aussagen bezüglich des konkreten Interesses von Forschungseinrichtungen, Herstellern und Kraftwerksbetreibern an entsprechenden Forschungsaktivitäten. Das Interesse der Forschungseinrichtungen kann dabei bis hin zur Koordinierung großer Konsortien zur Bearbeitung von europäischen Forschungsprojekten reichen. Die Ergebnisse werden nach Gesichtspunkten von Nutzer- und Akteursgruppen gegliedert aufgeführt. Berücksichtigt werden dabei Gesichtspunkte der Industrie, der Forschung sowie, sehr allgemein, der Ausbildung. Die Interessenbekundungen werden in einem Ranking zusammengefasst, das in die drei Kategorien

**0 = neutral**

**1 = Interesse**

**2 = hohes Interesse**

eingeteilt ist.

Auf diese Weise wurden insgesamt 16 Punkte auf für Deutschland relevanten Gebieten erarbeitet.

### **3 Feststellung deutscher Interessen an Gebieten der SRA**

Nachfolgend werden die Haupt- und Teilgebiete der SRA zusammenfassend für die Einschätzungen und Bewertungen der im Kompetenzverbund Kerntechnik vertretenen Interessengruppen zusammengestellt. Aus den einzeln erhobenen Einschätzungen wurden schließlich gemeinsame Positionen für die Mitwirkung deutscher Stellen an Aktivitäten in der SNE-TP abgeleitet. Auf der Grundlage dieser Positionen wird eine effektive Vertretung gemeinsamer deutscher Positionen in europäischen Fachgremien zur zukünftigen Forschung und Entwicklung auf Gebieten der nuklearen Energieerzeugung sowie zu Fragen des Brennstoffkreislaufs ermöglicht.

Unabhängig von aktuellen politischen Zielsetzungen hinsichtlich der Kernenergienutzung in Deutschland werden die Interessen von Industrie und Forschungseinrichtungen dargestellt und die Möglichkeit gegeben, sich an zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Rahmen der SRA der SNE-TP zu beteiligen. Durch die Mitarbeit an diesen Aktivitäten kann insbesondere die notwendige Kompetenz zur Durchführung von Sicherheitsbewertungen bestehender wie zukünftiger nuklearer Einrichtungen auf dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik gewährleistet werden.

#### **3.1 Derzeitige und zukünftige Leichtwasserreaktoren**

Das hauptsächliche Augenmerk liegt in diesem Bereich auf der Absicherung des langfristigen Betriebs der Leichtwasserreaktoren der ersten bis dritten Generation, einschließlich der fortgeschrittenen Reaktorkonzepte, die sich zurzeit in der Einführung in diverse Reaktorflotten in Europa und Asien befinden. Zusätzliche Aufgaben werden bei der weiteren Verbesserung der Betriebseigenschaften, der vorausschauenden Berücksichtigung externer Einflussfaktoren (z. B. Klimaeinflüsse, aber auch gesellschaftlicher/politischer Wandel) sowie auf den Gebieten „Abfallmanagement“ und „Rückbau“ gesehen.

### **3.1.1 Langfristiger Betrieb**

#### **3.1.1.1 Sicherheitsnachweis**

Die Genehmigung und Aufsicht von kerntechnischen Anlagen beruht auf Anforderungen hinsichtlich der sicheren Beherrschung von postulierten Störfällen sowie der Belastbarkeit von Strukturen, Systemen und Komponenten, deren sichere Einhaltung nachgewiesen werden muss. Wichtige Eckpfeiler hierfür sind die Auslegungsbasis, periodische Sicherheitsüberprüfungen inklusive probabilistischer und deterministischer Sicherheitsbewertungen und die damit identifizierten Sicherheitsmargen.

#### **F+E-Ziele**

- a) Harmonisierung der Methoden für die Führung des Sicherheitsnachweises. Schaffung von Grundlagen für die europaweite Einführung von Akzeptanzkriterien für KKW. (M)
- b) Zusammenführung abgestimmter Methoden für deterministische und probabilistische Nachweise für die Sicherheitsbewertung. (M)
- c) Validierung von Prinzipien der Integritätsbewertung anhand der Auswertung von Erfahrungen mit der zweiten Reaktorgeneration. (K)
- d) Europaweit abgestimmte Methoden zur Integritätsbewertung und zum Komponentenverhalten unter internen und externen Einwirkungen. Bestimmung von Referenzgrößen und Vereinbarung von Kriterien zur Begrenzung der Anlagenlebensdauer. (M)
- e) Überprüfung von Methoden für Sicherheitsnachweise hinsichtlich ihrer Gültigkeit für die Beurteilung einer Lebensdauererlängerung von Anlagen. (K)
- f) Erarbeitung gemeinsamen Verständnisses hinsichtlich der Aussagekraft von Qualifikationsnachweisen (z. B. für Material, Methoden oder Personal) und der Ausweitung ihres Gültigkeitsbereichs auf verlängerte Betriebszeiten. (M)
- g) Abstimmung des Verfahrens für Sicherheitsüberprüfungen durch Zusammenführung der Erfahrungen mit unterschiedlichen Anlagen. Entwicklung allgemein gültiger Datenbasen zur Unterstützung von Methoden, die auf Risikoinformationen beruhen. (M)

### **3.1.1.2 Alterungsmechanismen von Systemen, Strukturen und Komponenten**

Fragen der Alterung von Systemen, Strukturen und Komponenten erwachsen aus dem Betrieb von kerntechnischen Anlagen über lange Zeiträume, insbesondere über die ursprünglich geplante Lebensdauer hinaus. Lebensdauererlängerungen auf 60 Jahre sind international bereits Praxis und Laufzeiten von 80 Jahren werden derzeit für Kernkraftwerke der 1. und 2. Generation diskutiert. Während der Auslegung wurde die Lebensdauer unter teilweise extrem konservativen Annahmen nachgewiesen. Für eine realistische Lebensdauerabschätzung stehen heute gesicherte Informationen und fortentwickelte Methoden zur Verfügung. Hierzu gehören die „as built“-Dokumentation, die den tatsächlichen Status einer Anlage nach der Errichtung wiedergibt, die Kenntnis der Betriebsgeschichte, woraus sich die tatsächlichen Belastungen für die Anlage wirklichkeitsnah abschätzen lassen und fortgeschrittene Kenntnis der Alterungsmechanismen, mit denen sich der aktuelle Zustand von Anlagen präziser bewerten lässt und verbesserte Prognosen auch für sehr lange Nutzungszeiten möglich sind.

#### **F+E-Ziele**

- a) Zuverlässige und aussagekräftige Kenntnisse der Werkstoffeigenschaften zur Beurteilung des Langzeitbetriebs. (K)
- b) Allgemeines Verständnis der Alterungsmechanismen, Werkstoff- und Komponenteneigenschaften unter dem Aspekt des Langzeitbetriebs. (M)
- c) Entwicklung fortgeschrittener multiskaliger Modellierungswerkzeuge. (M)
- d) Europaeinheitliche integrierte und qualifizierte Modellierungswerkzeuge, die möglichst auf physikalischen Gesetzen beruhen. (L)

### **3.1.1.3 Verfolgung des Alterungsprozesses**

Der Alterungsprozess muss über die gesamte Lebensdauer von Komponenten und Systemen verfolgt werden. Hierzu ist es notwendig, die Umgebungseinflüsse zu erfassen und deren Einfluss auf Komponenten und Systeme zu verstehen. Dies wird unterstützt durch Analysen und zerstörungsfreie Prüfungen der Komponenten.

### **F+E-Ziele**

- a) Entwicklung und Belegung der Qualifikation sowie risikoorientierte Verfahren für wiederkehrende Prüfungen. (K)
- b) Nachweis der Realisierbarkeit intelligenter Systeme zur Verfolgung des Anlagenzustandes. (M)
- c) Einsatz intelligenter Systeme zur Verfolgung des Anlagenzustandes. (L)

#### **3.1.1.4 Vorbeugende Maßnahmen und Abmilderung von Alterung**

Aus der Kenntnis der Alterungsmechanismen sollten möglichst schonende Betriebsweisen abgeleitet werden. Des Weiteren ist der technische Fortschritt mit einzubeziehen, der es erforderlich machen könnte, Komponenten oder ganze Systeme durch Austausch auf den aktuellen technischen Stand zu bringen.

### **F+E-Ziele**

- a) Richtlinien für Maßnahmen zur Alterungsprävention sowie Weiterentwicklung von Reparatur- und Austausch Techniken. (K/M/L)

#### **3.1.2 Verbesserung der Betriebseigenschaften**

Mit zunehmender Betriebserfahrung entwickeln sich die Betriebsweisen weiter und auch die Anlagen selbst werden modernen Erkenntnissen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit und der Betriebssicherheit weiter angepasst. Dies geschieht auf vielen Gebieten und mit jeweils konkreten Zielsetzungen. Hierzu gehören insbesondere die weitere Minderung der Dosisbelastung für das Betriebspersonal, die Weiterentwicklung der Mensch-Maschine-Schnittstelle, die Übertragung von Betriebserfahrungen auf den weiteren Betrieb der Anlagen sowie auf die Auslegung neuer Konzepte, die Verbesserung der Brennstoffeigenschaften und Optimierung der Kernkonfiguration, die Leistungserhöhung, die Wirkungsgraderhöhung sowie die ganzheitliche Anlagenanalyse.

### **F+E-Ziele**

- a) Schaffung einer allgemeinen Grundlage zur Simulation von geplanten Betriebsverbesserungen der Mensch-Maschine-Schnittstelle. (M)
- b) Methodenentwicklung und Erstellung von Datenbasen für die systematische Interpretation langjähriger Betriebserfahrungen. (M)
- c) Quantitative Ermittlung von Vorteilen und zu lösenden Fragestellungen hinsichtlich des Reaktorkonzepts mit überkritischem Druck. (K) (Anm.: Gehört inhaltlich zu Gen. IV, SCLWR)
- d) Entwicklung eines Verfahrens und Werkzeugs zur Unterstützung des Langzeitbetriebs und einer ganzheitlichen Anlagenanalyse mit europaweiter Zustimmung. (M)

### **3.1.3 Externe Einflüsse**

Äußere Einflüsse können den Betrieb, insbesondere die Verfügbarkeit von nuklearen Anlagen beeinträchtigen. Neben klimatischen Bedingungen können aber auch Änderungen der regulatorischen Anforderungen, die Verfügbarkeit qualifizierten und erfahrenen Personals sowie die gesellschaftliche Akzeptanz eine erhebliche Rolle spielen.

### **F+E-Ziele**

- a) Bewahrung und Übertragung von Wissen und Erfahrungen bezüglich sicherheitstechnisch relevante Störfälle, die sich tatsächlich ereignet haben, auf nachfolgende Reaktorgenerationen. (L)
- b) Leistung von Beiträgen zu europäischen Ausbildungsprogrammen, um die Zahl der Experten auf kerntechnischem Gebiet zu erhöhen. (K)

### **3.1.4 Entsorgung und Stilllegung**

Im Falle des Rückbaus von kerntechnischen Anlagen fallen große Mengen an Material an, die charakterisiert, beprobt und behandelt werden müssen. Des Weiteren können Werkstoffproben von Komponenten genommen werden, die über lange Zeiten betrie-

ben wurden. An diesen Proben können die Analyse- und Bewertungsmethoden für Alterungsprozesse kalibriert werden.

#### **F+E-Ziele**

- a) Europaweite Harmonisierung von Positionen bzgl. Klassifizierung von Material und Freigabekriterien. (K)
- b) Großmaßstäbliche Qualifikation von Stilllegungs- und Dekontaminationstechniken sowie Einbeziehung von Stilllegungsaspekten in die Auslegung von Anlagen. (M)

### **3.2 Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe zur Abfallminimierung und optimierten Ressourcennutzung**

Ausgehend von heutigen Leichtwasserreaktoren wird festgestellt, dass diese weniger als 1 % des natürlich vorkommenden Urans für die nukleare Wärmeerzeugung nutzen. Durch Schließung des Brennstoffkreislaufs in Verbindung mit schnellen Reaktoren könnte die Nutzung von Uran als Brennstoff um mehr als den Faktor 50 gesteigert werden. Gleichzeitig könnten die minoren Aktinide in den Kreislauf zurück geführt werden, wodurch ein großer Teil langlebiger Rest- bzw. Abfallstoffe nicht mehr endzulagern wäre. Überdies könnte auch Thorium, das in großen Mengen verfügbar ist, als weitere Brennstoffressource genutzt werden. Aus Gründen der Nachhaltigkeit wird in der SRA somit dem geschlossenen Brennstoffkreislauf der Vorzug vor der direkten Endlagerung abgebrannten Brennstoffs gegeben.

Die Forschung und Entwicklung zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Brennstoffkreisläufe zielt kurzfristig auf die bessere Nutzung der natürlichen Ressourcen und langfristig zusätzlich auf die Minimierung endzulagernden Abfalls.

#### **F+E-Ziele**

- a) Parameterstudien zu Reaktorkernen fortgeschrittener Reaktoren der dritten Generation mit hohen Konversionsraten (physikalisch-technische und ökonomische Aspekte). (K)
- b) Experimente zur Unterstützung der Auslegung und Konstruktion eines Versuchsreaktors mit hoher Konversionsrate. (M)

- c) Machbarkeitsstudien zur Realisierung von Brennstoffen für sehr hohe Abbrände (100 GWd/t<sub>SM</sub>) für Leichtwasserreaktoren und mögliche Hochtemperaturreaktoren mit hoher Brennstoffausnutzung. (K)
- d) Durchführung von Qualifikations- und Bestrahlungstests mit prototypischen Brennstoffen. (M)
- e) Durchführung von Studien bezüglich Mehrfachaufbereitung von Plutonium, Kernauslegungen mit 100 % MO<sub>x</sub> und HTR-Kernen mit ausschließlicher Plutoniumbeladung. (K)
- f) Untersuchungen von Szenarien zur Entwicklung der Reaktorbestände in Europa hinsichtlich der Brennstoffsituation unter der Annahme des verzögerten Einsatzes schneller Reaktoren. (K, M)
- g) Szenariostudien zur Partitionierung und Transmutation bezüglich ihres Einflusses auf die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen. (K)
- h) Forschung zu fortschrittlichen Wiederaufbereitungsprozessen für LWR- und fortentwickelten Brennstoffen, Auflösung von mit Aktiniden beladenen Brennstoffen und Targets. Konversionsprozesse nach der Separation und vor der Fertigung neuer Brennelemente und Targets. (K)
- i) Entwicklung der P&T-Technologie zur industriellen Reife. (L)

### **3.3            Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum (SFR, LFR, GFR, ADS)**

Im Hinblick auf eine nachhaltige Nutzung der Kernenergie favorisiert die SNE-TP langfristig die Entwicklung von schnellen Reaktoren hoher Konversionsraten in Verbindung mit geschlossenen Brennstoffkreisläufen. Zur Diskussion stehen flüssigmetallgekühlte sowie gasgekühlte Reaktoren. Als Besonderheit sollen auch beschleunigergetriebene Systeme mit unterkritischem Kern untersucht werden. Über ihre Aufgabe zur Stromerzeugung hinaus soll geprüft werden, inwieweit sie sich zur Auskopplung von Prozesswärme auf hohem Niveau eignen. Für alle diese Reaktortypen müssen grundlegende technologische Fragen geklärt werden, um erforderliche Sicherheits- und Sicherungsstandards zu gewährleisten, Abfälle in gewünschtem Maße zu minimieren und die nötige Proliferationssicherheit zu bieten. Letztlich müssen die Systeme aber im Vergleich

zu anderen Lösungsmöglichkeiten im Energieversorgungssektor wirtschaftlich wettbewerbsfähig sein.

### **F+E-Ziele**

- a) Minimierung des Risikos bzgl. der chemischen Reaktionsfähigkeit von Natrium mit Wasser durch Ersatz von Wasser durch andere Fluide zur Wärmeübertragung, widerstandsfähige Wärmeübertrager oder kompakte, einfache Zwischenkreisläufe mit möglichst inerten Fluiden.
- b) Begrenzung der Energiefreisetzung im Falle schwerer Störfälle durch Kernauslegung mit günstigen Reaktivitätskoeffizienten sowie Kern- und Strukturkonstruktionen, die dichte Ansammlungen von Kernfragmenten größeren Umfangs verhindern.
- c) Beurteilung des Einflusses minorer Aktinide auf das Kernverhalten, ausgehend von verschiedenen homogenen wie heterogenen Wiederaufbereitungsweisen.
- d) Weiterentwicklung von Sicherheitssystemen (inhärente Sicherheitseigenschaften, Diversifizierung).
- e) Entwicklung verbesserter Instrumentierung und Techniken speziell für die betriebliche Überwachung.
- f) Erhöhung der Sicherheit gegen äußere Einwirkungen.
- g) Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Vereinfachung von Anlagen, Verbesserung der Handhabung, eine Auslegungslebensdauer von 60 Jahren und Brennstoffe mit Zielabbrand von 200 GWd/t<sub>SM</sub>.
- h) Brennstoffentwicklung für einen Prototyp SFR, verschiedene Arten von Brennstoffen mit minoren Aktiniden, verdichtete Brennstoffe für verbesserte Brutraten.
- i) Materialuntersuchungen zur Korrosion durch flüssiges Blei und betriebliche Überwachung von Kerntragestrukturen.
- j) Brennstoffentwicklung für Bleikühlung einschließlich mit minoren Aktiniden belasteter Brennstoffe.
- k) Bereitstellung angepasster Thermohydraulik- und Kinetikcodes für Betriebs- und Störfallanalysen bleigekühlter Reaktoren.

- l) Durchführung von Experimenten zur Modellentwicklung und Validierung weiterentwickelter Codes.
- m) Entwicklung von Verfahren und Anlagen zur Behandlung von flüssigem Blei.
- n) Entwicklung keramischen Brennstoffs mit keramischer Hülle für gasgekühlte Reaktoren.
- o) Bereitstellung angepasster Thermohydraulik- und Kinetikcodes für schnelle, gasgekühlte Reaktorsysteme sowie Brennstoff- und Komponentenverhalten.
- p) Brennstoffentwicklung für ADS.
- q) Entwicklung von Instrumentierung für den Einsatz in Bleilegierungen.
- r) Entwicklung von Beschleuniger und Targets für den Einsatz in ADS.
- s) Werkstoffqualifikation für den Einsatz in Flüssigmetallumgebung und bei Temperaturen oberhalb 600°C.

### **3.4 Anwendung von Kernenergie für andere Zwecke als die Stromerzeugung (HTR).**

Für die Kraftwärmekopplung in der Verfahrenstechnik bieten sich vor allem Hochtemperaturreaktoren an. Allerdings sind hier in erster Linie die in Frage kommenden Anwendungen, die mögliche Kopplung von nuklearen Wärmequellen und die verfahrenstechnischen Prozesse ungeklärt. Des Weiteren sind werkstoffspezifische Fragestellungen insbesondere für hohe Betriebstemperaturen noch offen. Anders als für andere Konzepte der 4. Generation liegen speziell für HTR mit Graphitkugелеlementen bereits jahrelange Betriebserfahrungen vor, auf denen ein fortschrittliches Konzept aufbauen kann. Es fehlt aber an Konzepten zur Schließung des Brennstoffkreislaufs. Dies gilt besonders für die Dekontamination und Wiederverwertung des Graphits was als Voraussetzung für eine großtechnische Anwendung angesehen wird.

#### **F+E-Ziele**

- a) Entwurf von Wärmeübertragern und Wärmetransportsystemen über große Entfernungen. (K)
- b) Anpassung chemischer Reaktoren und Prozesse an die nukleare Wärmequelle und Optimierung der gekoppelten chemischen und nuklearen Systeme. (K, M)

- c) Definition der Sicherheitsanforderungen und Entwicklung/Anpassung von Nachweismethoden für gekoppelte chemische und nukleare Systeme. (K, M)
- d) Qualifikation der Brennelemente als 1. Barriere. (M) (Anm.: Dieser Punkt ist inhaltlich mit Kap. 3.2 verwandt)
- e) Qualifikation der zu verwendenden Werkstoffe und Komponenten. (M)
- f) Qualifikation von gekoppelten chemischen und nuklearen Systemen. (M)
- g) Entwicklung von Verfahren zur Wiederaufarbeitung abgebrannter Brennelemente und zur Graphitdekontamination. (M)

### **3.5 Entwicklung von Kompetenzen und Forschungsinfrastrukturen**

Begleitend zu den technologischen Entwicklungen sollen wichtige Querschnittsfragestellungen untersucht werden. Speziell für zukünftige Reaktoren sind Materialfragen bezüglich geänderter oder neu zu betrachtender Betriebsrandbedingungen zu klären. Auch sind pränormative Anforderungen speziell an weiterentwickelte bzw. neu zu entwickelnde Reaktorkonzepte zu formulieren. Für die Auslegung und Nachweisführung für neue Reaktorkonzepte sind Simulationswerkzeuge und Beurteilungsmethoden neu bzw. weiter zu entwickeln und anhand geeigneter Experimente zu validieren.

#### **3.5.1 Strukturwerkstoffe**

Die SRA führt aus, dass auf dem Gebiet der Strukturwerkstoffe Fragen zur Alterung unter Betriebsbedingungen, zur Entwicklung neuer Strukturwerkstoffe, zur Charakterisierung und Qualifizierung, zur physikalisch begründeten Werkstoffmodellierung, zu Forschung und Entwicklung hinsichtlich der Unterstützung zur Code- und Methodentwicklung sowie zum Wissensmanagement und zur Entwicklung von Fachkompetenzen zu untersuchen sein werden. Grundsätzlich können die Untersuchungen entsprechend den vorgesehenen Einsatzbedingungen, z. B. nach Bereichen der Betriebstemperatur unterteilt werden. Dabei werden Bereiche von 300°C - 600°C, 600°C - 800°C und höher als 800°C unterschieden und diesen jeweils Klassen von Werkstoffen zugeordnet. Als weitere Unterscheidungsmerkmale werden die Strahlungsresistenz und die Korrosionsbeständigkeit angeführt.

Neben den technologieorientierten Forschungsarbeiten werden in der SRA weitere flankierende Maßnahmen für erforderlich gehalten, die kurz- bis mittelfristig implementiert werden sollten. Langfristig wird vor allem eine Einrichtung zur Durchführung von Bestrahlungsexperimenten mit schnellen Neutronen für notwendig erachtet. Gleiches gilt für die Qualifizierung der für HTR vorgesehenen Graphit- und Keramikqualitäten.

### **Wesentliche Maßnahmen**

- a) Schaffung einer Plattform, die dem Wissenstransfer zwischen Industrie, Herstellern und öffentlichen Forschungseinrichtungen zur Weitergabe der Erfahrungen mit Reaktoren der 2. und 3. Generation zur 4. Generation dient. (K)
- b) Einrichtung einer Plattform für öffentliche und private Laboratorien zur Entwicklung und Weiterentwicklung von Herstellungsverfahren benötigter metallischer und keramischer Werkstoffe. (K)
- c) Herstellung prototypischer Werkstoffe und Entwicklung angepasster Korrosionsschutzsysteme. (M)
- d) Bestrahlungsexperimente mit für schnelle Reaktoren typischen Parametern. (K, M)
- e) Durchführung von Werkstoffqualifikationen für nukleare Umgebungsbedingungen unter Berücksichtigung der Fluenz, der Bestrahlungstemperatur und der chemischen Umgebung. (M)
- f) Entwicklung von physikalisch begründeten Modellen für die Simulation der Mikrostruktur sowie der Gestaltstabilität und Aufstellung konstitutiver Gleichungen für unbestrahlte und bestrahlte Werkstoffe. (M)
- g) Aufstellen einer Arbeitsgruppe, um die F+E-Aktivitäten zur Standardisierung zu nutzen. (K)

### **3.5.2 Pränormative Forschung, Regeln und Standards**

Technische Komponenten und Systeme werden mittels standardisierter Berechnungswerkzeuge und Regeln konstruiert und bewertet. Technologiebezogen werden diese Verfahren in Regelwerken zusammengefasst und bilden die, von allen an der Entwicklung und Nutzung Beteiligten (einschließlich der Gutachter), akzeptierte Bewertungsgrundlage. Speziell für die Konzept- und Prototypentwicklung von Reaktoren der 4.

Generation werden neue Werkstoffe, verfahrenstechnische Systeme und Betriebsweisen entwickelt und qualifiziert, für die es noch keine gültigen technischen Regeln gibt. In der SRA wird daher vorgeschlagen, die Ergebnisse der Forschung frühzeitig auszuwerten und mittelfristig in eine Sammlung von technischen Regeln zu überführen. Als mögliche Basis schlägt die SRA das französische Regelwerk RCC-MR oder die für ITER erstellten Regeln ISDC-IC vor. Kurzfristig werden Arbeiten auf den Gebieten „mechanische Eigenschaften“, „Herstellungsprozess“, „Identifizierung möglicher Schädigungsphänomene bezüglich neuer Werkstoffe“, „kritische Prüfung der gültigen RCC-MR-Regeln“, „Forschung und Entwicklung bezogen auf Auslegungsregeln für Hochtemperaturbedingungen“, „Bewertung von Auslegungsregeln hinsichtlich Fehlertoleranz“ und „entsprechende Prüfanforderungen“ vorgeschlagen. Die Ergebnisse müssen mittel- und langfristig dem fortschreitenden Entwicklungsstand angepasst werden.

### **3.5.3 Modellierung, Simulation und Methoden**

Modelle und Simulationsprogramme sowie Werkzeuge, die Entwickler, Hersteller, Betreiber, Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden sowie Gutachter bei der Wahrnehmung ihrer Aufgaben zur friedlichen Nutzung der Kernenergie unterstützen, sollen im Rahmen der SNE-TP für die nachfolgende Reaktorgeneration bereitgestellt werden. Sie beruhen auf mathematischen Regeln und Modellen, die, entsprechend dem fortschreitenden Stand der Wissenschaft, fortlaufend überprüft und weiterentwickelt werden müssen. Insbesondere zur Entwicklung und Beurteilung neuer Reaktorkonzepte sind die Simulationsprogramme auf Vollständigkeit und Einhaltung des Gültigkeitsbereichs des Modellumfangs zu prüfen und, wo nötig, zu ergänzen bzw. zu erweitern.

#### **F+E-Ziele**

- a) Bereitstellung von Neutronikprogrammen für die Kernausslegung und Sicherheitsanalysen zukünftiger Reaktorkonzepte. (K)
- b) Entwicklung vollständig zeitabhängiger 3D-Neutronentransportcodes sowie zeitabhängiger Monte-Carlo-Verfahren mit Berücksichtigung thermohydraulischer Rückwirkungen. (M)
- c) Weiterentwicklung numerischer Simulationswerkzeuge für Leichtwasserreaktoren. (K) (Anm.: Dies sollte insbesondere für die Entwicklung von CFD-Methoden für Mehrphasen- und Mehrkomponentenströmungen sowie für Flüssigmetalle gelten.)

- d) Entwicklung effizienter Verfahren zur Sensitivitäts- und Unsicherheitsfortpflanzungsanalyse. (M)
- e) Weiterentwicklung von Brennstoffverhaltensprogrammen für Normalbetrieb und bei Störfällen, speziell für neue Brennstoffe der 4. Reaktorgeneration. (K, M)
- f) Kopplung von Reaktorphysik, Brennstoffverhalten, Thermohydraulik und Systemcodes. (K)
- g) Entwicklung fortgeschrittener Kopplungsverfahren für Neutronentransportcodes mit Zweiphasenthermohydraulikcodes sowie Thermohydraulik- und Thermomechanikcodes mit Monte-Carlo-Verfahren. (M)
- h) Etablierung einer gemeinsamen europäischen Codeplattform für multiphysikalische und multiskalige Codes. (L)

#### **3.5.4 Brennstoff**

Für bestehende Reaktoren der 2. und 3. Generation hat die Brennstoffentwicklung zu hervorragenden Produkten geführt. Heutige Brennstoffe besitzen bis hin zu hohen Abbränden gute Betriebs- und Sicherheitseigenschaften. Die 4. Generation von Reaktoren wird jedoch neue und höhere Anforderungen an den Brennstoff stellen. Hierzu gehören höhere Betriebstemperaturen, korrosive Kühlmittel oder Beladung mit minoren Aktiniden. Somit sind neue Brennstoffe zu entwickeln und zu qualifizieren, wobei die langjährigen Erfahrungen der bisherigen Brennstoffentwicklung und -fertigung sowie die Betriebserfahrung soweit wie möglich genutzt werden sollen.

#### **F+E-Ziele**

- a) Ermittlung der Eigenschaften von, mit minoren Aktiniden, beladenen Brennstoffen. (K, M)
- b) Bestrahlungsexperimente für unterschiedliche Untersuchungsziele wie Änderung der Brennstoffeigenschaften und Einschluss durch Bestrahlung. (K, M)
- c) Einzeleffektversuche zur Unterstützung der Modellentwicklung und Simulationscodevalidierung. Grundlegende Brennstoffeigenschaften und entsprechende Modelle sollen in einem Handbuch zusammengefasst und regelmäßig aktualisiert werden. (K, M)

### **3.5.5 Sicherheit**

Sicherheitsforschung sowohl für bereits existierende als auch für neue Reaktoren ist für Kraftwerksbetreiber wie für Genehmigungs- und Aufsichtsbehörden von gleichermaßen hoher Bedeutung, wenn auch unter unterschiedlichen Gesichtspunkten. Aus den sehr zahlreichen Forschungsaktivitäten, die unter den Forschungsprogrammen der Mitgliedsländer durchgeführt werden, sind solche Themen in die SRA zu integrieren, die von den Mitgliedern der SNE-TP in gleicher Weise als prioritär erachtet werden. Wesentliche Themen, denen sich die Sicherheitsforschung widmen muss, liegen auf den Gebieten „Reaktorphysik und -dynamik“, „Thermohydraulik“, „Kritikalität“, „Brennstoffverhalten unter Betriebs- und Störfallbedingungen“, „Einflüsse menschlichen Verhaltens und der Organisation“, „Leittechnik und elektronische Systeme“, „Störungen durch Einwirkungen Dritter und naturbedingte Gefahren“, „Simulation der Gesamtanlage unter Sicherheitsgesichtspunkten“ und „spezielle Fragestellungen bezgl. schwerer Störfälle“. Diese Themen gelten sowohl für existierende wie auch für neue Reaktor-konzepte einschließlich derer der 4. Generation. Speziell für Anwendungen der Kraft-Wärmekopplung sind zusätzlich Forschungsarbeiten zur Sicherheit gekoppelter Systeme der nuklearen Energieerzeugung und zur chemischen Prozessführung durchzuführen.

### **3.5.6 Neue Infrastrukturen nuklearer Großforschung**

Um die SRA umzusetzen, sind neue Einrichtungen zur nuklearen Großforschung erforderlich. Diese umfassen neue, große Bestrahlungseinrichtungen, die flexibel einsetzbar sind, größere Anlagen des Brennstoffkreislaufs sowie große unterstützende Anlagen. Während die bestehenden Großforschungsanlagen, insbesondere auf dem Gebiet der Brennstofffertigung weiterhin genutzt werden, wird Bedarf an neuen Anlagen gesehen, die z. T. bereits in der Planung bzw. im Bau sind.

Auf längere Sicht werden Demonstrationsanlagen für die Konzepte der 4. Reaktorgeneration für erforderlich gehalten. Eine Prototypanlage für den schnellen natriumgekühlten Brutreaktor soll entsprechend der SRA 2020 in Betrieb gesetzt werden. Als Alternativkonzepte sollen zunächst die Ergebnisse früherer Entwicklungsarbeiten für den bleigekühlten Reaktor „European Technology Pilot Plant (ETPP)“ und die alternative gasgekühlte schnelle Demonstrationsanlage ALLEGRO vorangetrieben werden. Bei einer positiven Entscheidung für ALLEGRO soll diese Anlage ab 2020 in Betrieb ge-

setzt werden. Falls die Entscheidung für die ETPP fallen sollte, ist aufgrund der zahlreichen technisch noch nicht hinreichend geklärten Fragestellungen erst mit späterem Betriebsstart zu rechnen (Anm.: Inzwischen wurde die Entscheidung für die Erstellung der schnellen Einrichtung MYRRHA getroffen). Weiter wird die Errichtung einer HTR-Demonstrationsanlage zur Auskopplung nuklearer Prozesswärme mit Unterstützung industrieller Partner als sinnvoll angesehen.

### **Anlagen und Zielsetzung**

- a) Jules-Horowitz-Reaktor (JHR), Material- und Brennstofftests. Produktion von Radioisotopen.
- b) MYRRHA: unterkritische und kritische Bestrahlungseinrichtungen. Demonstration für beschleunigergetriebene Systeme. Produktion von Radioisotopen.
- c) PALLAS: Produktion von Radioisotopen und, in vermindertem Maße, Bestrahlungseinrichtung zur Unterstützung der Brennstoff-, Werkstoff- und Komponentenforschung.
- d) Errichtung eines prototypischen natriumgekühlten schnellen Brutreaktors. (M)
- e) Entwicklung des ETTP (schneller bleigekühlter Reaktor). (M)
- f) Entwicklung der Demonstrationsanlage ALLEGRO (schneller gasgekühlter Reaktor). (M)

### **3.5.7 Ausbildung, Training und Wissensmanagement**

Für den weiteren Ausbau der Kernenergienutzung wird in verstärktem Maße gut ausgebildetes Personal erforderlich. Hierzu muss die Attraktivität kerntechnischer Studiengänge erhöht und die Angebotspalette an Ausbildungsplätzen auf allen Ebenen der technischen Ausbildung erweitert werden. Speziell zur Förderung des akademischen Nachwuchses wird es für erforderlich gehalten, dass sich Universitäten auf europäischer Ebene vernetzen und so optimale Angebote für die kerntechnische Forschung und Lehre schaffen.

Die akademische Ausbildung wird darüber hinaus auch als Eckstein für die internationale Zusammenarbeit mit Staaten außerhalb der EU angesehen.

Industrie und technische Sicherheitsorganisationen sowie Forschungszentren haben einen großen Erfahrungsschatz bei Bau, Betrieb und Beurteilung von kerntechnischen Anlagen angesammelt, die für die Ausbildung des Nachwuchses an den Universitäten nutzbar gemacht werden sollten.

Von besonderer Bedeutung für die praktische Aus- und Weiterbildung von Ingenieuren sind experimentelle Einrichtungen und hier besonders spezielle Reaktoren für Unterrichts- und Trainingszwecke. Diese Einrichtungen sollten erhalten, erweitert und den neuen Anforderungen angepasst werden.

**Maßnahmen:**

- a) Zusammenstellung von Umfang und Inhalten europäischer Lehrangebote auf kerntechnischem Gebiet.
- b) Nutzung von Synergien von kerntechnischer Forschung und Praxis einerseits und universitärer Ausbildung von Nachwuchskräften andererseits.
- c) Ausbau experimenteller Einrichtungen zur Ausbildung von Nachwuchs auf kerntechnischem Gebiet.

#### **4 Gemeinsame deutsche Positionen**

Im Folgenden werden die Interessenlagen der unterschiedlichen Gruppierungen hinsichtlich gemeinsam oder partikulär zu vertretender Interessen innerhalb der SNE-TP mit Bezug zu den Zielsetzungen der SRA auf der Grundlage der in Kapitel 3 zusammengestellten Themen bzw. Maßnahmen dargestellt. Die Grundlage bildet eine nicht vollständige Umfrage, bei der Vertreter der Interessengruppen Hersteller, Betreiber und Forschungseinrichtungen ihre Einschätzungen zu diesen Themen und Maßnahmen dargelegt haben. Bei Vorliegen mehrerer und unterschiedlicher Interessenbekundungen zu Einzelthemen wurde das überwiegende Interesse der Interessengruppe berücksichtigt, wobei mangelndes Interesse seitens Stellen, zu deren Spektrum das betreffende Einzelthema nicht gehört, auch bei der Bewertung nicht berücksichtigt wurde.

Es werden nachfolgend zunächst die Forschungsthemen herausgestellt, an denen das größte gemeinsame Interesse festgestellt wurde. Gefolgt von Themen, die von einzel-

nen Gruppierungen hoch eingeschätzt wurden und für die seitens der übrigen Beteiligten mit Unterstützung gerechnet werden kann. Schließlich werden noch die Themen erläutert, denen mindestens von einer Gruppe sehr hohe Priorität beigemessen wird, während ihnen die anderen Gruppierungen kein oder nur geringes Interesse entgegen bringen. Insbesondere in diesen Fällen sollte die deutsche Haltung in Gremien jeweils im Einzelfall abgestimmt werden, um Kontroversen innerhalb der deutschen Delegationen während der Sitzungen internationaler Gremien zu vermeiden.

Anders als bei den übrigen Reaktorkonzepten, gibt es in Deutschland für Hochtemperaturreaktoren keinen Systemhersteller, der dieses Konzept potenziell unterstützen könnte. Allerdings besteht auf Seiten der Industrie erhebliches Know-how in Bereichen von Schlüsseltechnologien, sodass hier durchaus industrielles Interesse an der weiteren Entwicklung der V/HTR-Konzepte besteht.

#### 4.1 Themen hohen gemeinsamen Interesses

	<b>H</b>	<b>B</b>	<b>F</b>
<b>3.1.1 Langfristiger Betrieb,</b>			
<b>3.1.1.1 Sicherheitsnachweis</b>			
Zusammenführung abgestimmter Methoden für deterministische und probabilistische Nachweismethoden für die Sicherheitsnachweise	2	2	2
<b>3.1.1.2 Alterungsmechanismen von Systemen, Strukturen und Komponenten</b>			
Allgemeines Verständnis der Alterungsmechanismen, Werkstoff- und Komponenteneigenschaften unter dem Aspekt des Langzeitbetriebes	2	2	2
<b>3.1.1.3 Verfolgung des Alterungsprozesses</b>			
Entwicklung und Absicherung der Qualifikation von wiederkehrenden Prüfungen und risikoorientierte Verfahren für wiederkehrende Prüfungen	2	2	2
<b>3.5.5 Sicherheit</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

<b>3.5.7 Ausbildung, Training und Wissensmanagement</b>			
Zusammenstellung von Umfang und Inhalten europäischer Lehrangebote auf kerntechnischem Gebiet	2	2	2

#### 4.2 Themen hohen Einzelinteresses und Unterstützung der übrigen Gruppierungen

<b>3.1.1 Langfristiger Betrieb, 3.1.1.1 Sicherheitsnachweis</b>	<b>H</b>	<b>B</b>	<b>F</b>
Harmonisierung der Methoden für die Führung des Sicherheitsnachweises. Schaffung von Grundlagen für die europaweite Einführung von Akzeptanzkriterien für KKW	2	1	1
Validierung von Prinzipien der Integritätsbewertung anhand der Auswertung von Erfahrungen der zweiten Reaktorgeneration	2	2	1
Überprüfung von Methoden für Sicherheitsnachweise hinsichtlich Gültigkeit für die Beurteilung einer Lebensdauererlängerung	2	1	2
Europaweit abgestimmte Methoden zur Integritätsbewertung und Komponentenverhalten unter internen und externen Einwirkungen. Bestimmung von Referenzgrößen und Vereinbarung von Kriterien zur Begrenzung der Anlagenlebensdauer	2	1	2
Erarbeitung gemeinsamen Verständnisses hinsichtlich der Aussagekraft von Qualifikationsnachweisen und der Ausweitung ihres Gültigkeitsbereichs auf verlängerte Betriebszeiten	2	1	2

<b>3.1.1.2 Alterungsmechanismen von Systemen, Strukturen und Komponenten</b>			
Zuverlässige und aussagekräftige Kenntnisse der Werkstoffeigenschaften zur Beurteilung des Langzeitbetriebs	1	2	2
Entwicklung fortgeschrittener multiskaliger Modellierungswerkzeuge	1	1	2
Europaeinheitliche integrierte und qualifizierte Modellierungswerkzeuge, die möglichst auf physikalischen Gesetzen beruhen	1	1	2
<b>3.1.3 Externe Einflüsse</b>			
Bewahrung und Übertragung von Wissen und Erfahrungen über sicherheitstechnisch relevante Störfälle, die sich tatsächlich ereignet haben, auf nachfolgende Reaktorgenerationen	1	1	2
Leistung von Beiträgen zu europäischen Ausbildungsprogrammen, um die Zahl der Experten auf kerntechnischem Gebiet zu erhöhen	1	1	2
<b>3.3 Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum (SFR, LFR, GFR, ADS)</b>			
Minimierung des Risikos bzgl. der chemischen Reaktionsfähigkeit von Natrium mit Wasser durch Ersatz von Wasser durch andere Fluide zur Wärmeübertragung, widerstandsfähige Wärmeüberträger oder kompakte, einfache Zwischenkreisläufe mit möglichst inerten Fluiden	1	1	2
Begrenzung der Energiefreisetzung im Falle schwerer Störfälle durch Kernauslegung mit günstigen Reaktivitätskoeffizienten sowie Kern- und Strukturkonstruktionen, die dichte Ansammlungen von Kernfragmenten größeren Umfangs verhindern	1	1	2
Beurteilung des Einflusses minorer Aktinide auf das Kernverhalten, ausgehend von verschiedenen homogenen wie heterogenen Wiederaufbereitungsweisen	1	1	2

Weiterentwicklung von Sicherheitssystemen (inhärente Sicherheitseigenschaften, Diversifizierung)	1	1	2
Entwicklung verbesserter Instrumentierung und Techniken speziell für die betriebliche Überwachung	1	1	2
Erhöhung der Sicherheit gegen äußere Einwirkungen	2	1	1
Aufbau und Durchführung von Experimenten zur Modellentwicklung und Validierung weiterentwickelter Codes	1	1	2
<b>3.5 Entwicklung von Kompetenzen und Forschungsinfrastrukturen</b>			
<b>3.5.1 Strukturwerkstoffe</b>			
Herstellung prototypischer Werkstoffe und Entwicklung angepasster Korrosionsschutzsysteme	1	1	2
Bestrahlungsexperimente mit für schnelle Reaktoren typischen Parametern	1	1	2
Durchführung von Werkstoffqualifikationen für nukleare Umgebungsbedingungen unter Berücksichtigung der Fluenz, der Bestrahlungstemperatur und der chemischen Umgebung	1	1	2
Entwicklung von physikalisch begründeten Modellen für die Simulation der Mikrostruktur sowie der Gestaltstabilität und Aufstellung konstitutiver Gleichungen für unbestrahlte und bestrahlte Werkstoffe	1	1	2

<b>3.5.3 Modellierung, Simulation und Methoden</b>			
Bereitstellung von Neutronikprogrammen für die Kernausslegung und Sicherheitsanalysen zukünftiger Reaktorkonzepte	1	1	2
Weiterentwicklung numerischer Simulationswerkzeuge für Leichtwasserreaktoren	1	1	2
Entwicklung effizienter Verfahren zur Sensitivitäts- und Unsicherheitsfortpflanzungsanalyse	1	2	2
Weiterentwicklung von Brennstoffverhaltensprogrammen sowohl für Normalbetrieb als auch für Störfälle, speziell für neue Brennstoffe der 4. Reaktorgeneration	1	1	2
Entwicklung einer gemeinsamen europäischen Codeplattform für multiphysikalische und multiskalige Codes	1	1	2
<b>3.5.6 Neue Infrastrukturen nuklearer Großforschung</b>			
Jules-Horowitz-Reaktor (JHR), Material- und Brennstofftests. Produktion von Radioisotopen	1	1	2
<b>3.5.7 Ausbildung, Training und Wissensmanagement</b>			
Nutzung von Synergien kerntechnischer Forschung und Praxis einerseits und universitärer Ausbildung von Nachwuchskräften andererseits	2	1	2
Ausbau experimenteller Einrichtungen zur Ausbildung von Nachwuchs auf kerntechnischem Gebiet	2	1	2

#### 4.3 Themen hohen Einzel-, aber geringen Allgemeininteresses

	H	B	F
<b>3.1.1 Langfristiger Betrieb,</b>			
<b>3.1.1.3 Verfolgung des Alterungsprozesses</b>			
Nachweis der Machbarkeit intelligenter Systeme zur Verfolgung des Anlagenzustandes	2	0	1
Einsatz intelligenter Systeme zur Verfolgung des Anlagenzustandes	2	0	1
<b>3.1.2 Verbesserung der Betriebseigenschaften</b>			
Quantitative Ermittlung von Vorteilen und zu lösenden Fragestellungen hinsichtlich des Reaktorkonzepts mit überkritischem Druck	0	0	2
<b>3.1.4 Entsorgung und Stilllegung</b>			
Großmaßstäbliche Qualifikation von Stilllegungs- und Dekontaminations-techniken sowie Einbeziehung von Stilllegungsaspekten in die Auslegung von Anlagen	0	2	2
<b>3.2 Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe zur Abfallminimierung und optimierten Ressourcennutzung</b>			
Durchführung von Studien bezüglich Mehrfachaufbereitung von Plutonium, Kernausslegungen mit 100 % MO <sub>x</sub> und HTR-Kernen mit ausschließlicher Plutoniumbeladung	0	0	2
Untersuchungen von Szenarien zur Entwicklung der Reaktorbestände in Europa hinsichtlich der Brennstoffsituation unter Annahme des verzögerten Einsatzes schneller Reaktoren	0	0	2

<b>3.3      Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum (SFR, LFR, GFR, ADS)</b>			
Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Vereinfachung von Anlagen, Verbesserung der Handhabung, eine Auslegungslebensdauer von 60 Jahren und Brennstoffe mit Zielabbrand von 200 GWd/t <sub>SM</sub>	1	0	2
Brennstoffentwicklung für den Prototyp SFR, verschiedene Arten von Brennstoffen mit minoren Aktiniden, verdichtete Brennstoffe für verbesserte Brutraten	0	1	2
Materialuntersuchungen zur Korrosion und Spannungsrisskorrosion durch flüssiges Blei und betriebliche Überwachung von Kerntagestrukturen	0	2	2
Brennstoffentwicklung für Bleikühlung einschließlich mit minoren Aktiniden beladenen Brennstoffen	0	1	2
Bereitstellung angepasster Thermohydraulik- und Kinetikcodes für Betriebs- und Störfallanalysen bleigekühlter Reaktoren	0	1	2
Entwicklung von Verfahren und Anlagen zur Behandlung von flüssigem Blei	0	1	2
Entwicklung von Instrumentierung für den Einsatz in Natrium und in Bleilegitierungen	0	1	2
Entwicklung von Beschleunigern und Targets für den Einsatz in ADS	0	1	2
Werkstoffqualifikation für den Einsatz in Flüssigmetallumgebung und bei Temperaturen oberhalb 600°C	0	1	2

<b>3.4 Anwendung der Kernenergie für andere Zwecke als die Stromerzeugung (HTR)</b>			
Entwurf von Wärmeübertragern und Wärmetransportsystemen über große Entfernungen	0	1	2
Definition der Sicherheitsanforderungen und Entwicklung/Anpassung von Nachweismethoden für gekoppelte chemische und nukleare Systeme	0	1	2
Qualifikation von gekoppelten chemischen und nuklearen Systemen	0	1	2
<b>3.5.3 Modellierung, Simulation und Methoden</b>			
Entwicklung vollständig zeitabhängiger 3D-Neutronentransportcodes sowie zeitabhängiger Monte-Carlo-Verfahren mit Berücksichtigung thermohydraulischer Rückwirkungen	1	0	2
Entwicklung fortgeschrittener Kopplungsverfahren für Neutronentransportcodes mit Zweiphasenthermo hydraulikcodes sowie Thermo hydraulik- und Thermomechanikcodes mit Monte-Carlo-Verfahren	1	0	2
<b>3.5.6 Neue Infrastrukturen nuklearer Großforschung</b>			
MYRRHA: unterkritische und kritische Bestrahlungseinrichtungen. Demonstration für beschleunigergetriebene Systeme. Produktion von Radioisotopen	0	1	2
Errichtung eines prototypischen natriumgekühlten schnellen Brutreaktors	1	0	2
Entwicklung des ETR (schneller bleigekühlter Reaktor)	0	0	2

## **5 Zusammenfassung und Wertung**

Im Folgenden werden die in den obigen Tabellen dargestellten Interessenlagen zusammengefasst, um die Positionen der deutschen Seite unter Berücksichtigung, der wesentlichen, in der SNE-TP aktiven, Interessengruppen zu beschreiben.

### **5.1 Derzeitige und zukünftige Leichtwasserreaktoren**

Die größten Gemeinsamkeiten der Interessenlagen finden sich auf dem Gebiet der Absicherung des langfristigen Betriebes existierender Reaktoren. Dies ist bedingt durch die derzeit laufenden Aktivitäten der deutschen Forschungseinrichtungen sowie durch die unmittelbaren wirtschaftlichen Interessen der KKW-Betreiber und der Hersteller. Dabei haben Einzelthemen, die unmittelbar genehmigungs- und aufsichtsrelevant sein könnten, ungeteiltes hohes Interesse der drei befragten Interessengruppen. Themen, die hingegen der internationalen Harmonisierung von Nachweisverfahren oder der Vertiefung des Verständnisses von Sachverhalten bzw. Prozessen dienen, finden nicht mehr bei allen befragten Gruppen gleichermaßen hohes Interesse.

Des Weiteren werden Fragestellungen der Verfolgung und Überwachung von Anlagenzuständen, zur weiteren Verbesserung der Betriebseigenschaften sowie zur Entsorgung und Stilllegung nur noch zum Teil hohe Prioritäten zugeordnet. Einzelne Gruppen zeigen sogar kein ausgeprägtes Interesse an solchen Themen.

### **5.2 Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe zur Abfallminimierung und optimierten Ressourcennutzung**

In Deutschland ist dies ein Thema, dass von der Forschung z. T. mit sehr hoher Priorität bedacht wird, während sich Hersteller und Betreiber hier nicht wiederfinden. Letzteres liegt zum Teil daran, dass in Deutschland ein Brennstoffkreislaufkonzept vorliegt, das keine Wiederaufbereitung abgebrannter Brennelemente vorsieht. Des Weiteren wird von Seiten der Hersteller und Betreiber derzeit keine Notwendigkeit gesehen, von den bewährten Brennstoffkonzepten grundsätzlich abzugehen. Ein grundlegender Wechsel des Brennstoffkonzepts wäre zum Einen mit hohen Investitionen auf der Herstellerseite verbunden. Zum Anderen können solche neuen Konzepte auch schwer kalkulierbare Risiken für den Betrieb und die Entsorgung der Kernkraftwerke bergen.

Brennstoffkonzepte der 4. Generation sind noch sehr marktfern und daher für Hersteller und Kraftwerksbetreiber in Deutschland eher unattraktiv.

### **5.3            Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum und geschlossenem Brennstoffkreislauf (SFR,LFR,GFR,ADS)**

Hohes Interesse finden die Themen, die sich mit Aspekten von Reaktorkonzepten der 4. Generation und geschlossenem Brennstoffkreislauf befassen, Dieses wird durch Interessenbekundungen sowohl der Hersteller als auch der Kraftwerksbetreiber gestützt. Zahlreiche dieser Themen lassen auch Ergebnisse erwarten, die zu Wissensfortschritten und Weiterentwicklungen bezüglich derzeit betriebener Reaktoren führen können. Dort, wo bereits Arbeiten zu Einzelkonzepten vorgesehen sind, ist das herstellerseitige Interesse eher gering, während seitens der Forschung hohes Interesse an diesen Themen besteht und auch betreiberseitig Interesse gezeigt wird. Speziell für die KKW-Betreiber ist vor allem die Möglichkeit der Transmutation von Plutonium und minoreren Aktiniden in schnellen Systemen von Interesse, da diese Aussichten eine Entspannung der Endlagerproblematik eröffnet.

### **5.4            Anwendung der Kernenergie für andere Zwecke als die Stromerzeugung (HTR)**

Die HTR-Entwicklung wurde in der Vergangenheit in Deutschland mit hoher Intensität bis hin zu Errichtung und Betrieb eines Demonstrationskraftwerks vorangetrieben. Nach der Betriebseinstellung dieser Anlage infolge anhaltender technischer Schwierigkeiten und einer schwindenden Akzeptanz der Kernenergie insgesamt in Deutschland, wurden auch die F+E-Arbeiten zum HTR weitgehend eingestellt. Dennoch ist auf Seiten der Forschung noch erhebliches Know-how und Interesse an weiterführenden Forschungsarbeiten vorhanden. Betreiberseits wird dieses Interesse allerdings nicht geteilt, wohingegen industrielle Kompetenzträger aus Deutschland in ausländische Großprojekte in Südafrika und China eingebunden sind und durchaus an einer Weiterverfolgung der HTR-Technologien interessiert sind.

## **5.5 Entwicklung von Kompetenzen und Forschungsinfrastrukturen**

Weiteste Übereinstimmung der höchsten Interessenlagen finden sich bei dem Querschnittsthema Sicherheit und im Zusammenhang mit der Erhebung und Zusammenstellung von Inhalten der Lehrangebote auf kerntechnischem Gebiet in Europa. Forscher und Hersteller bekunden zudem ihr hohes Interesse an einem Ausbau experimenteller Einrichtungen und an der Nutzung von Synergien zwischen Forschung und Praxis.

Durchgängig hohes Interesse besteht bei der Forschung an Aktivitäten auf den Gebieten der Entwicklung und Qualifizierung von Werkstoffen insbesondere für schnelle Reaktoren hinsichtlich Bestrahlungs- und Korrosionsbeständigkeit, der Modellierung, der Simulation, der Methodenentwicklung sowie zur Errichtung des Jules-Horowitz-Reaktors. Hersteller und Betreiber bezeugen an diesen Themen zwar ebenfalls Interesse, messen ihnen allerdings geringere Priorität bei.

Während die Forschung auch durchgängig hohes Interesse an der Errichtung prototypischer Reaktoren im Zuge der Entwicklung von Reaktoren der 4. Generation äußert, finden diese nur noch begrenztes Interesse bei Herstellern und Betreibern. Dies gilt auch für die Weiterentwicklung von Neutronikcodes sowie von Methoden zu deren Kopplung an Thermohydraulikcodes.

## **6 Weitergehende Kommentare**

Im Rahmen der Bewertung gingen noch zahlreiche wichtige Kommentare zur SRA ein, die, da sie über den zu bewertenden Text der SRA hinausgehen, aber nicht Gegenstand dieser Erhebung sein können. Dennoch sind sie für die weitere Mitarbeit in der SNE-TP von hoher Bedeutung und werden daher nachfolgend kapitelweise aufgeführt. Vorsorglich wird darauf hingewiesen, dass diese Kommentare weder erschöpfend sein können, noch den Anspruch erheben für die gesamte deutsche Seite gleichermaßen wichtig und bedeutend zu sein. Eine Abstimmung hierüber sollte aber unter den deutschen Mitgliedern in den Gremien der SNE-TP erfolgen.

### **Zu Kapitel 3.1.3 Externe Einflüsse**

In dem Kapitel wird die Bewahrung und Übertragung von Wissen und Erfahrungen über sicherheitstechnisch relevante Störfälle, die sich tatsächlich ereignet haben, auf die nachfolgende Reaktorgenerationen beschränkt. Sie sollten aber für die gesamte Reaktorflotte gelten. Damit ist dies eine andauernde Aufgabe ohne zeitliche Eingrenzung.

### **Zu Kapitel 3.2 Fortgeschrittene Brennstoffkreisläufe zur Abfallminimierung und optimierten Ressourcennutzung**

Ein wesentlicher Forschungsgegenstand im Kurzzeitbereich sollte in Machbarkeitsstudien zur Realisierung von Brennstoffen für sehr hohe Abbrände ( $100 \text{ GWd}/t_{\text{SM}}$ ) für Leichtwasserreaktoren bestehen. Mögliche Brennstoffentwicklungen für Hochtemperaturreaktoren mit hoher Brennstoffausnutzung sind hingegen als mittelfristige bis langfristige Aufgabe anzusehen, da es hier zunächst darum gehen muss, überhaupt industrietaugliche Brennstoffe zu entwickeln.

Die Sinnfälligkeit von Studien bezüglich HTR-Kernen mit ausschließlicher Plutoniumbeladung wird kontrovers diskutiert, da in thermischen HTR mit solchen Kernen in höherem Maße höhere Aktinide erzeugt werden.

Brennstoffuntersuchungen und Sicherheitsanalysen zum Einsatz Thorium basierter Brennstoffe soll ein Anhang zur SRA gewidmet werden. Die Nutzung von Thorium als Brennstoff könnte die Reichweite von Brennstoffen für thermische Reaktoren vervielfachen.

### **Zu Kapitel 3.3 Reaktoren der 4. Generation mit schnellem Neutronenspektrum (SFR, LFR, GFR, ADS)**

Die Bereitstellung angepasster Thermohydraulik- und Kinetikcodes für Betriebs- und Störfallanalysen ist für natrium- wie bleigekühlte Reaktoren gleichermaßen erforderlich, da die existierenden Codes mehr als zwanzig Jahre alt sind und somit nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen.

Zur Verringerung der Unsicherheiten in den Reaktivitätsparametern aufgrund ungenauer Kenntnis der Kerndaten ist die Messung von Wirkungsquerschnitten für Konstruktionswerkstoffe neuer Reaktoren und für die Transmutation langlebiger Radionuklide mit höheren Genauigkeiten als heute erforderlich.

Die experimentelle Infrastruktur für die Entwicklung fortgeschrittener schneller Reaktoren sind heiße Zellen für die Untersuchung bestrahlter Werkstoffe, Flüssigmetalllabore, Versuchsstände zur Entwicklung neuer Wärmetauscherkonzepte und zur Entwicklung von Instrumentierung von Flüssigmetall gekühlten Reaktoren bereitzustellen.

### **Zu Kapitel 3.5.3 Modellierung, Simulation und Methoden**

Zur Entwicklung und Beurteilung neuer Reaktorkonzepte sind die Simulationsprogramme aufgrund ihres teilweise beträchtlichen Alters auf Vollständigkeit und Einhaltung des Gültigkeitsbereichs des Modellumfangs zu prüfen und, wo nötig, zu ergänzen bzw. zu erweitern.

Die Entwicklung fortgeschrittener Kopplungsverfahren für Neutronentransportcodes mit Zweiphasenthermohydraulikcodes ist bereits weit fortgeschritten und sollte mit hoher Priorität weiterentwickelt werden. Dem gegenüber wird die Kopplung von Thermohydraulik- und Thermomechanikcodes mit Monte-Carlo-Verfahren durchaus kontrovers diskutiert, da die Notwendigkeit einer vollständigen Zweiwegekopplung mit der Thermomechanik nicht allgemein akzeptiert ist. (M)

Die Etablierung einer gemeinsamen europäischen Codeplattform für multiphysikalische und multiskalige Codes ist bereits Gegenstand des EU-Projekts NURISP und sollte mittel- bis langfristig auf neue Reaktorkonzepte ausgeweitet werden.

### **Zu Kapitel 3.5.6 Neue Infrastrukturen nuklearer Großforschung**

Auf dem Wege zu den Demonstrationsanlagen werden, teils großskalierte, Versuchsanlagen für die Entwicklung von Werkstoffen und Instrumentierung sowie für die Validierung reaktorphysikalischer und thermohydraulischer Simulationsverfahren benötigt. Die Optimierung der Kernausslegung hinsichtlich Reaktivitätsrückkopplung, Brutraten und Aktinidenverbrennung erfordert die Messung nuklearer Wirkungsquerschnitte mit verbesserter Genauigkeit.

Dazu sind insbesondere heiße Zellen für die Untersuchung bestrahlter Werkstoffe, Flüssigmetalllabore, Versuchsstände zur Entwicklung neuer Wärmetauscherkonzepte und zur Entwicklung von Instrumentierung von Flüssigmetall gekühlten Reaktoren bereitzustellen.

Des Weiteren sind Großversuchsstände für die Qualifikation von Komponenten in Flüssigmetallen (z. B. Wärmetauscher) sowie für die Entwicklung und Erprobung von Instrumentierung in Flüssigmetallumgebungen zu erstellen.

In Fortführung der Arbeiten zu Leichtwasserreaktoren sind Versuchsanlagen für die Entwicklung und Validierung von CFD-Verfahren für Mehrphasenströmungen auch für Flüssigmetalle (z. B. Na-Zweiphasenströmungen und einphasiger Wärmeübergang)

Heiße Zellen für bruchmechanische Untersuchungen hochbestrahlter Werkstoffproben sind weiterhin vorzuhalten, um Werkstoffe für neue Reaktoren qualifizieren zu können.

## **7 Quellen**

1. Sustainable Nuclear Energy Technology Platform  
Strategic Research Agenda, May 2009
2. Umfrage unter KKW-Betreibern, Herstellern und Forschungseinrichtungen zur  
Einschätzung von Themen und Maßnahmen der SNE-TP SRA  
GRS, im August 2009 (nicht veröffentlicht)

Projekträger des BMWi  
für Reaktorsicherheits-  
forschung PT R

Schwertnergasse 1  
50667 Köln  
Telefon +49 221 2068-0

Forschungsinstitute  
85748 Garching b. München  
Telefon +49 89 32004-0

Kurfürstendamm 200  
10719 Berlin  
Telefon +49 30 88589-0

Theodor-Heuss-Straße 4  
38122 Braunschweig  
Telefon +49 531 8012-0

[www.grs.de](http://www.grs.de)