
Statusbericht des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST)

verabschiedet in der 163. AST-Sitzung am 10.09.2024

Fortführung der Rechencodeentwicklung in Deutschland (nationale Rechenkette)

INHALTSVERZEICHNIS

1	Anlass der Beratung.....	2
2	Beratungsgang und Sachstandserhebung.....	4
3	Ergebnisse der Beratungen	11
3.1	Zukünftige Aufgabenfelder des Bundes und der Länder im Bereich nukleare Sicherheit.....	11
3.2	Abgeleitete Bedarfe an die nationale Rechenkette.....	12
3.3	Weitere Aspekte hinsichtlich einer Weiterentwicklung der nationalen Rechenkette zur Erfüllung der Aufgabenfelder und Bedarfe.....	16
4	Abkürzungsverzeichnis.....	18
5	Literatur.....	21

1 Anlass der Beratung

Mit der Abschaltung der Kernkraftwerke (KKW) Emsland, Neckarwestheim 2 und Isar 2 am 15.04.2023 endete in Deutschland der Betrieb von Leistungsreaktoren. Vor diesem Hintergrund sowie dem Umstand, dass das BMUV die bisherigen Aufgaben des BMWK im Bereich der Reaktorsicherheitsforschung übernommen hat, wurde seitens des BMUV in der 157. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 17.11.2022 berichtet, dass in diesem Zusammenhang die Frage aufgeworfen worden sei, ob langfristig eine Fortführung der deutschen Codeentwicklung inklusive der Anlagenmodellentwicklung (nationale Rechenkette) für den kerntechnischen Bereich sinnvoll erscheine oder ob es stattdessen sinnvoll sein könnte, sich an der Codeentwicklung in anderen Ländern zu beteiligen und ggf. deren Codes einzusetzen. In diesem Rahmen sollen auch Fragen des kerntechnischen Know-how-Erhalts berücksichtigt werden. Das BMUV bat den Ausschuss, entsprechend zu dieser Frage zu beraten. Die RSK hatte daraufhin auf ihrer 533. Sitzung vom 15.12.2022 dieses Thema als eines der Beratungsthemen im Jahr 2023 festgelegt und den Ausschuss AST um diesbezügliche Befassung gebeten.

Die Aufgabenstellung des RSK-Ausschusses AST war somit, darzustellen, ob und ggf. wie eine Fortführung der nationalen Codeentwicklung sinnvoll sei und die damit verbundenen Möglichkeiten eines kerntechnischen Know-how-Erhalts aufzuzeigen.

Der Ausschuss konzentrierte seine Beratungen dabei auf die Sicherheit von Leistungs- und Forschungsreaktoren im In- und Ausland.

Unter Codeentwicklung wird vom RSK-Ausschuss AST die Weiterentwicklung der nationalen Rechenkette verstanden, um den Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) abzubilden oder den Anforderungen zur Abbildung neuer Reaktorentwicklungen zu genügen.

Unter dem Sammelbegriff „nationale Rechenkette“ werden vom Ausschuss AST insbesondere die von der deutschen Sachverständigenorganisation (Technical Safety Organisation, TSO) GRS gGmbH sowie auch weiteren nationalen Einrichtungen (z. B. den Helmholtz-Zentren und TÜV'en) entwickelten, gepflegten und/oder angewandten Rechencodes, Methoden und Analysewerkzeuge der Reaktorsicherheit für Sicherheitsanalysen sowie für Forschung, Entwicklung und Ausbildung in der Reaktorsicherheit bezeichnet. Zu dem erweiterten Umfang der nationalen Rechenkette zählen auch die für die jeweiligen Rechencodes entwickelten Anlagenmodelle (z. B. für Versuchseinrichtungen, Leistungs- oder Forschungsreaktoren), deren Anwendungen sich von der Codevalidierung bis hin zur sicherheitstechnischen Nachweisführung erstrecken. Die nationale Rechenkette umfasst auch im Ausland entwickelte und in Deutschland eingesetzte Codes, für die bereits Anlagendatensätze entwickelt wurden. Die Codes der nationalen Rechenkette werden z. T. seit Jahrzehnten im wissenschaftlichen Umfeld entwickelt und müssen hohe Validierungs-, Qualitäts- und Dokumentationsstandards erfüllen.

Die folgende Abbildung 1 (in Anlehnung an [1]) gibt einen Überblick über die Codelandschaft für deterministische Analysen, ergänzt u. a. durch Tools zu Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen und probabilistischen Sicherheitsanalysen. Eine übergeordnete Beschreibung der Codes ist in [2] dargestellt.

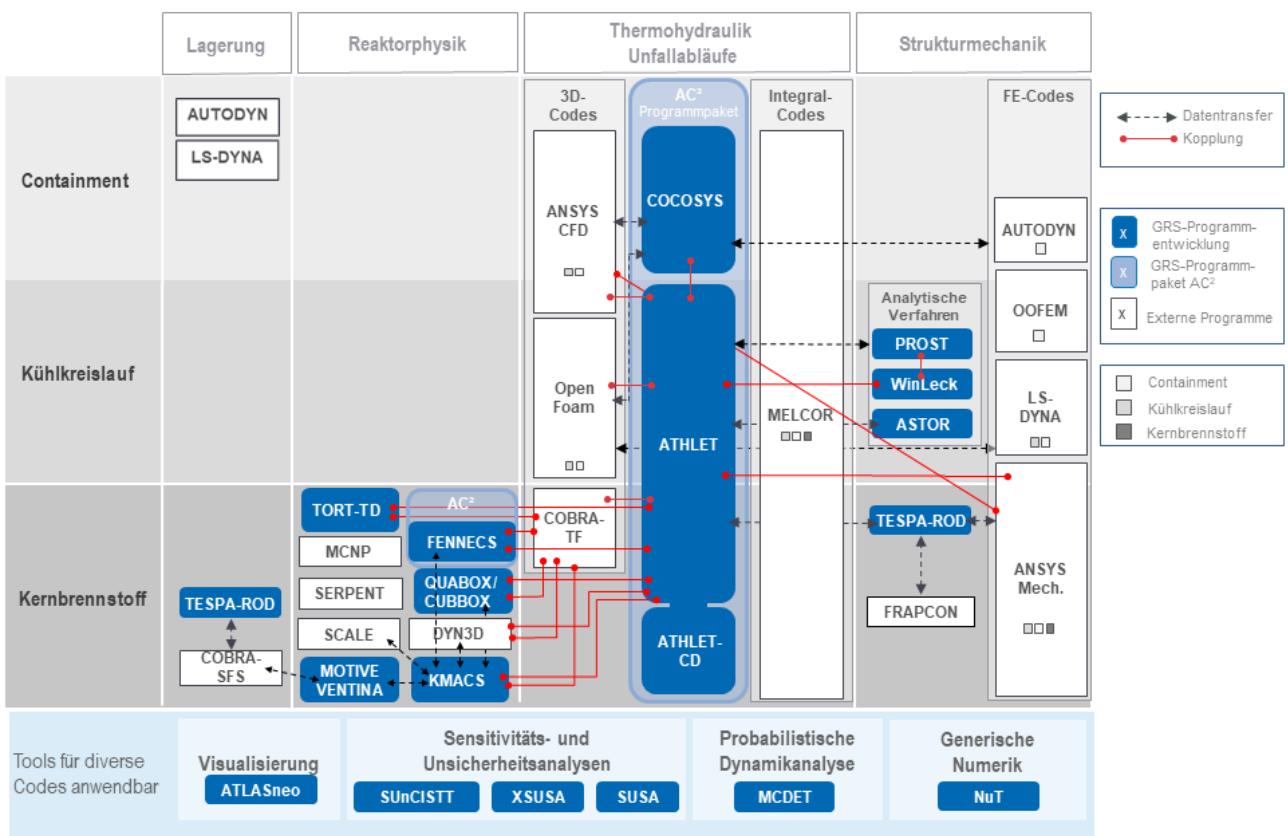


Abbildung 1: Wissenschaftliche Codes (bei der GRS entwickelt bzw. eingesetzt) als Teil der nationalen Rechenkette mit Schwerpunkt auf deterministische Sicherheitsanalysen

Die in Abbildung 1 dargestellten externen Codes umfassen dabei sowohl national- als auch international entwickelte Codes. Ergänzend zu berücksichtigen sind z. B. auch die Codeentwicklungen des KIT im Bereich Neutronik und detaillierter Unterkanal-Thermohydraulik-Modelle.

Die nationale Rechenkette wird neben der GRS von zahlreichen nationalen und internationalen Institutionen für Sicherheitsforschung oder Sicherheitsbewertung von Anlagen durch oder im Auftrag einer Aufsichtsbehörde genutzt.

Die GRS gibt die von ihr entwickelten Rechenprogramme an nationale und auch internationale Partner im Rahmen einer Code-Überlassung weiter. Dabei ist grundsätzlich eine Nutzung für die nicht-kommerzielle Sicherheitsforschung zu kerntechnischen Anlagen sowie zur Unterstützung von Aufsichtsbehörden für deren Aufgaben bzw. die Anwendung durch Aufsichtsbehörden gestattet. Im Zeitraum seit 2012 wurden GRS-Codes an die folgenden Organisationen weitergegeben (aufgeschlüsselt nach Art der Organisation sowie national/international):

- In Deutschland an Forschungseinrichtungen:
Becker Technologies, Fraunhofer IWM, FRM II, FZJ, HZDR, HSZG, IKE, KIT, MPA Stuttgart, RUB PSS, RWTH, THD, TUD, TUHH, TUM, UniBW, Universität des Saarlandes

-
- In Deutschland an sonstige Nutzer:
BASE, EnKK, Framatome, Ingenieurbüro Dr. Blank und G. Schulz, PreussenElektra, TÜV NORD
Ensys GmbH, TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Ariane Group, KSG
 - An internationale Aufsichtsbehörden:
ARN (AR), BAPETEN (ID), CNEN (BR), CNSC (CA), ENSI (CH), ENRRA (EG), LEI (LT), NRA
(SI), NRSC (AM), ONR (GB), Rostechnadzor (RU), SURO (CZ), TAEK (TR), UDJ SR (SK),
VARANS (VN)
 - An internationale TSO einer Aufsichtsbehörde:
KINS (KR), SEC NRS (RU), SSTC NRS (UA), TTSO (TR)
 - An internationale Forschungseinrichtungen:
CNRS (BY), BNTU (BY), BOKU (AT), Cardiff University (UK), Chalmers University (SE), CNL
(CA), CNPRI (CN), CTU (CZ), ELKH (HU), EPFL (CH), FH Nordwestschweiz (CH), FIGES (TR),
Hacettepe University (TR), HEU (CN), JRC (EU), JSI (SI), KTH (SE), MEPhI (RU), Missouri S&T
(US), NRC KI (RU), NUBIKI (HU), PSI (CH), SJTU (CN), STU (SK), SZU (CN), Universiti Teknologi
Malaysia (MY), UOIT (CA), UVJ Řež (CZ), University of Liverpool (UK), UniLux (LU), UNIPI (IT),
USTC (CN), VMU (LT), VNIIAES (RU), VTT (FI), XJTU (CN)
 - An sonstige internationale Nutzer:
AECL (CA), AEMI (HU), ARB (UA), ATECH (RU), AXPO (CH), CNPRI (CN), DCNS (FR),
Energorisk (UA), ENPRO (BG), ESG (UA), FIGES (TR), IPP-Center (UA), JIPNR Sosny (BY), KIEP
(UA), KIWA (SE), NIKIET (RU), NuStar (CN), OKB Gidropress (RU), RAOS (FI), SINAP (CN), STC
Energoatom (UA), VO Safety (RU), VUJE (SK)

Für Kooperationspartner der GRS gibt es zusätzlich die Möglichkeit, Zugang zum Quellcode für GRS-Programme im Rahmen gemeinsamer Entwicklungs- und Validierungsaktivitäten zu erhalten. Derzeit haben die folgenden deutschen Forschungseinrichtungen Zugang zum Quellcode von bestimmten GRS-Programmen, in der Regel AC²-Programme: IKE, HSZG, HZDR, KIT, RUB PSS, TUM.

Der vorliegende Bericht wird auf deterministische Aufgaben (wie Neutronik, Thermohydraulik, Brennstab und Radionuklide inkl. Quelltermangaben) im Kontext der sicheren Ereignisbeherrschung auf den Sicherheitsebenen (SE) 1 bis 4 beschränkt, wobei Unsicherheitsanalysen als Teil der Deterministik verstanden werden. Bei Bedarf wird auf PSA-Anwendung hingewiesen.

Die dargestellten Überlegungen lassen sich grundsätzlich auch auf andere Bereiche übertragen.

2 Beratungsgang und Sachstandserhebung

Die bisherigen Beratungen zu diesem Themenkomplex begannen in der 158. Sitzung des Ausschusses AST am 02.03.2023 mit einer zusammenfassenden Berichterstattung der GRS zum Stand der Rechencode-Entwicklung in Deutschland und wurden in der 159. AST-Sitzung am 11.05.2023 mit Vorträgen deutscher Rechencodenutzer bzw. -entwickler weitergeführt. Auf dieser Sitzung wurde beschlossen, für die

160. Ausschusssitzung am 12.09.2023 einen ersten Entwurf eines Statusberichtes als weitere Diskussionsgrundlage zu erarbeiten. Die Erstellung erfolgte durch eine Ad-hoc-Arbeitsgruppe aus Mitgliedern des Ausschusses, welche durch die GRS unterstützt wurde (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Nationale Rechenkette) zunächst im Umlaufverfahren. Nachfolgend fanden mehrere Sitzungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe statt, in der der Berichtsentwurf weiter angepasst wurde (1. Sitzung am 23.10.2023). In der 160. AST-Sitzung wurde der erste Entwurf des Statusberichts diskutiert und die weiteren Überarbeitungsschritte wurden festgelegt. Die weitere Anpassung des Berichtsentwurfs erfolgte auf der 2. und 3. Sitzung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Nationale Rechenkette am 19.12.2023 und am 29.02./01.03.2024. In der 161. Ausschusssitzung am 13.03.2024 erfolgten ergänzende Berichterstattungen der TÜVe über die dortige Codenutzung. Am 22.04.2024 fand die 4. Sitzung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe statt, in der die Erkenntnisse aus der 161. AST-Sitzung in den Statusberichtsentwurf eingepflegt wurden. In der 162. AST-Sitzung am 16.05.2024 wurde der Statusberichtsentwurf vom Ausschuss erneut beraten. Der angepasste Statusberichtsentwurf wurde nachfolgend der RSK in ihrer 542. Sitzung am 19.06.2024 vorgestellt. Die RSK hatte wenige Anmerkungen zum Berichtsentwurf, die in der 163. AST-Sitzung am 10.09.2024 im Statusberichtsentwurf berücksichtigt wurden, welcher dann einstimmig in dieser Sitzung verabschiedet wurde. Die RSK hat der Veröffentlichung des Berichts auf der RSK-Homepage zugestimmt.

158. RSK-AST Sitzung am 02.03.2023:

In der 158. Sitzung des RSK-Ausschusses AST am 02.03.2023 wurde mit einem Vortrag der GRS die Diskussion zur nationalen Rechenkette begonnen.

- **Bericht GRS:**

Die GRS berichtete anhand eines Foliensatzes [1] zur Rechencode-Entwicklung in Deutschland: Künftiger Bedarf und Eingang in die Beratungen der RSK „Zukunft der deutschen Rechenkette“. Ausgehend von der Diskussion des künftigen Beratungsbedarfs erörterte die GRS den Nutzen der F&E-Vorhaben zu Rechencodes für die Beratungen im RSK-Ausschuss AST, für das Notfallzentrum (NFZ) und damit auch das radiologische Lagezentrum des Bundes sowie für Erkenntnisgewinne für die Reaktorsicherheit. Dann gab sie eine Übersicht der GRS-Codelandschaft mit ihrer nationalen und internationalen Bedeutung einschließlich der umfangreichen Codeüberlassungen an nationale und internationale Anwender (u. a. Aufsichtsbehörden und TSO, Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie) und führte einen Vergleich der eigenständigen Codeentwicklung mit der Nutzung von Fremdcodes aus. Abschließend gab die GRS Beispiele zur Code-, Methoden- und Modellentwicklung.

Zusammenfassend gelangte die GRS dabei zu folgenden Schlussfolgerungen (vgl. auch [3]):

- Auch künftig wird ein Beratungsbedarf gesehen zu
 - Sicherheitsanalysen von Forschungsreaktoren nach Stand von W&T,
 - Methoden der Nachweisführung,
 - sicherheitstechnischen Bewertungen von Reaktoren im (grenznahen) Ausland,
 - Untersuchungen und Ursachenklärung von Phänomenen und aufgetretenen Ereignissen sowie
 - zur Beteiligung an internationalen Diskussionen mit eigenen (unabhängigen) Beiträgen, auch zur Weiterentwicklung des internationalen kerntechnischen Regelwerks (IAEA und EU).

-
- Für die Erfüllung dieses Bedarfs wäre auch künftig die bisherige Kombination notwendig aus:
 - Rechenprogrammen, Methoden und Anlagenmodellen, die nach Stand von W&T unabhängig und eigenständig weiterentwickelt, validiert und/oder angewendet werden und ggf. auch schnell für neue Anforderungen/neue Reaktorkonzepte (z. B. integrated PWR) ertüchtigt werden könnten und
 - Fremdcodes, die sich bereits etabliert haben und zu denen entsprechende Erfahrungen und Modelle vorliegen und weiterentwickelt werden.
 - Die F&E-Arbeiten leisten darüber hinaus auch einen wesentlichen Beitrag,
 - die Kompetenz für die Sicherheitsbewertung von kerntechnischen Anlagen zu erhalten,
 - Mitarbeiter zu binden und zu motivieren und
 - international sichtbar, kooperativ und vernetzt zu bleiben.

In der sich anschließenden Diskussion wurden u. a. Aspekte des möglichen Nutzens einer Fortführung bzw. der Nachteile bei einem möglichen Wegfall der nationalen Rechenkette erörtert:

- Beitrag zur Verbesserung der Sicherheit ausländischer Anlagen durch Überlassung umfassend validierter deutscher Codes,
- Beitrag zur Verbesserung der Nachwuchsgewinnung im kerntechnischen Sektor durch Codeentwicklung,
- Beitrag zum Know-how Erhalt durch Fortführung der nationalen Rechenkette (inkl. Quellcode-Zugriff),
- Einsatz von qualitätsgesicherten Rechencodes für das NFZ der GRS,
- Verlust von Anlageninformationen zu ausländischen Anlagen, die im Zuge der zur Verfügungstellung und dem gemeinsam koordinierten Einsatz der Rechencodes für ausländische Behörden und TSOs, in Erfahrung gebracht werden,
- potentieller Verlust internationaler Kontakte und Netzwerke durch Wegfall der nationalen Rechenkette.

159. RSK-AST Sitzung am 11.05.2023:

In der 159. RSK-AST Sitzung am 11.05.2023 wurden die Beratungen zur Rechenkette mit Vorträgen deutscher Codenutzer weitergeführt.

- **Bericht GRS:**

In Ergänzung zu ihrem Beitrag in der 158. Sitzung des Ausschusses AST folgte ein Bericht der GRS [5] mit Beiträgen der GRS zur Diskussion zur „Zukunft der deutschen Rechenkette“ auf Basis eines Foliensatzes. Diskutiert wurden Informationen über die Nutzung der GRS-Codes von nationalen/ausländischen Organisationen, notwendige Weiterentwicklungen mit Blick auf Fragestellungen zu Forschungsreaktoren sowie zukünftige Codeentwicklungen, die für den Betrieb des Notfallzentrums der GRS notwendig sind. Der

Bericht diente dazu, die Themen und Schlussfolgerungen des Berichts in der 158. AST-Sitzung ergänzend anhand von Beispielen zu illustrieren.

- **Bericht RUB PSS:**

Der Bericht der Ruhr Universität Bochum Plant Simulation and Safety (RUB PSS) [6] baute auf dem Foliensatz „Universitäre Reaktorsicherheitsforschung zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses unter Einbindung von Simulationscodes“ auf. Zur Veranschaulichung wurden zunächst die Reaktorsicherheits-Forschungsthemen der RUB PSS vorgestellt und ein Überblick der PSS-Validierungsmatrizen für den GRS-Code AC² gegeben sowie ergänzend die PSS-Simulationsmatrix des französischen Codes ASTEC dargestellt. Dann wurden die Struktur der Simulationsarbeiten und die verwendeten Simulationswerkzeuge diskutiert. Hier wurden neben den GRS-Codes, auf denen ein Fokus liegt, französische (ASTEC) und US-amerikanische (MELCOR) Codes sowie verschiedene CFD-Tools (ANSYS-CFX und -FLUENT sowie OpenFOAM) und auch Eigenentwicklungen genutzt. Anhand aktuell neu eingeworbener nationaler wie internationaler Forschungsvorhaben wurde die Bedeutung der deutschen Simulationscodes auch für die Einwerbung von (gerade internationalen) Forschungsvorhaben aufgezeigt. Die GRS-Rechenkette wurde dargestellt und der RUB PSS Fokus auf den Bereich Thermohydraulik/Unfallabläufe verdeutlicht. Abschließend wurden die Vorteile der Anwendung einer nationalen Rechenkette diskutiert.

Zusammenfassend kommt RUB PSS zu dem Resümee:

- Die Simulationscodes und hier insbesondere der GRS-Code AC², dessen Quellcode am RUB PSS vorliegt, werden zur Einordnung von Einzelphänomenen, Betriebszuständen und vollständigen Störfallszenarien als Werkzeuge verwendet und einzelne Modelle weiterentwickelt.
- Die Systemcodes bilden über ihre Hauptfunktion hinaus, in Verbindung mit dem Know-how und Know-why, einen Wissenspool der Störfallanalyse, der entsprechend dem aktuellen Stand von W&T ständig weiterentwickelt werden muss und so wesentlich dem Kompetenzerhalt und -aufbau dient.
- Die Verfügbarkeit des Quellcodes ermöglicht eine detaillierte Kenntnis der Modellbasis und damit eine belastbare Qualitätskontrolle und gibt somit die Möglichkeit der Weiterentwicklung.
- Die (leichte) Ansprechbarkeit der Entwickler ist sowohl für die Anwendung als auch für die Weiterentwicklung von erheblicher Bedeutung.
- Die Einwerbung relevanter internationaler und EU-Projekte sowie der Aufbau von Kooperationen setzt häufig und in zunehmendem Maße das Einbringen nationalen Know-hows in Form von Simulationscodes und/oder Versuchsanlagen/Experimenten voraus.
- Die Initiierung einer notwendigen Codeweiterentwicklung zur Abbildung aktueller Entwicklungen in der Anlagen- und Sicherheitstechnik bei Neubauvorhaben (Small Modular Reactors (SMR), Generation III oder „nicht-LWR“) in Europa ist bei Verfügbarkeit einer nationalen Rechenkette deutlich einfacher.
- Die Verfügbarkeit verschiedener Simulationscodes, entwickelt in verschiedenen Ländern, ermöglicht ein Benchmarking. Die vergleichenden Analysen führen zu einer Erhöhung der Simulationsgüte und der

Belastbarkeit der Ergebnisse. Durch eine internationale Wettbewerbsfähigkeit und die mögliche Vernetzung werden Anstöße zur Weiterentwicklung der Sicherheitstechnik und -maßnahmen getriggert.

- **Bericht HZDR/FZJ:**

Das HZDR berichtete anhand eines Foliensatzes [7] zu „Entwicklung und Einsatz von Rechenprogrammen“ am Helmholtzzentrum Dresden Rossendorf (HZDR) und am Forschungszentrum Jülich (FZJ). Mit dem Ziel einer Verfügbarkeit der gesamten reaktorphysikalischen Rechenkette, von der Erzeugung der Wirkungsquerschnittsdaten bis zur Durchführung von Störfallanalysen für den Reaktorkern, nutzt HZDR die Codes HELIOS (Studsvik, Schweden), SERPENT (VTT, Finnland) und entwickelt DYN3D zur Modellierung des Reaktorkerns selbst. Für Multi-Physik-Kopplungen werden sowohl CFD und Unterkanalcodes als auch der GRS-Code ATHLET oder der amerikanische RELAP5-Code verwendet.

Im Bereich Störfallanalysen und schwere Störfälle wendet HZDR die GRS-Codes ATHLET und ATHLET-CD an, arbeitet an der Weiterentwicklung der Modellbasis für ausgewählte Problemstellungen und stellt eine Kopplung der Codes DYN3D und ATHLET bzw. ANSYS-CFX bereit. Im Bereich Reaktordosimetrie wird der Monte-Carlo-Code TRAMO entwickelt und validiert.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die CFD-Modellentwicklung für die nukleare Sicherheitsforschung. Hierbei wird der Open-source-Code OpenFOAM als Referenz-CFD-Code für die Reaktorsicherheitsforschung verwendet und die Arbeiten deutscher Institutionen GRS, Framatome, RUB PSS, KIT, IKE, TUM u. a. zur Mehrphasen-CFD in OpenFOAM werden koordiniert.

Ergänzend wurde über Folien zur „Rechenkette und Strategie am FZJ“ für die Forschung zu schweren Störfällen berichtet. Hier steht die Entwicklung des OpenFOAM-basierten quelloffenen CFD-Codes ContainmentFOAM im Vordergrund. Ausgehend von AC²-COCOSYS-Simulationen zur Identifikation relevanter Szenarien sowie der Anfangs- und Randbedingungen erfolgte dann eine detaillierte 3D-Simulation des Sicherheitseinschlusses.

- **Bericht KIT:**

Das KIT berichtete anhand eines Foliensatzes [8] mit dem Titel „KIT Computational Route for the Safety Assessment and Radiological Risk Prediction of NPPs“ über die Codes zur Störfallanalyse am KIT, unterteilt nach Sicherheitsbewertungen von KKW und Abschätzungen der radiologischen Risiken von KKW.

Das KIT erläuterte zunächst die Motivation ihrer nuklearen Aktivitäten. Ende April 2023 endete die Stromerzeugung mit Kernenergie, der Rückbau wird mehrere Dekaden dauern und hierbei ist Expertise in den Bereichen nukleare Anlagentechnik, Reaktorphysik und Strahlenschutz notwendig. Weiter sind viele KKW in der nahen Umgebung und auch weltweit in Betrieb und nationale Aufsichtsbehörden benötigen belastbare Daten zu den radiologischen Risiken, d. h. mögliche Massen und die zeitlichen Abläufe einer Spaltproduktfreisetzung. Hieraus resultiert eine der Missionen der HGF, die Expertise der Methoden zur Beurteilung hypothetischer Risiken des Betriebs von KKW zu erhalten. Treiber der kontinuierlichen Weiterentwicklung der numerischen Werkzeuge/Codes sind die kontinuierliche Weiterentwicklung der KKW-Technik bei einer Vielzahl von Reaktortypen (Anlagen der Generation III und SMR) sowie die Verbesserungen

der Ökonomie, der Betriebsflexibilität und der Sicherheitsstandards, aber auch die Fortschritte bei numerischen Algorithmen und der Prozessor-/Computerleistung (z. B. durch HPC-Cluster), die die Vorhersagegenauigkeit, Rechengenauigkeit und räumliche Auflösung verbessern.

Die Strategie zur Analyse von Auslegungsstörfällen umfasst zum einen die Entwicklung von In-house-Codes (Eigenentwicklungen), wie z. B. PARAFISH (Neutronik), SUBCHANFLOW und TWOPORFLOW (Thermohydraulik) und KATUSA (Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen), und zum anderen die Anwendung internationaler Codes (wie TRACE, RELAP5), eingebettet in internationale Kooperationen (US NRC Code Application and Maintenance Program (CAMP)). Ergänzend werden durch umfangreiche Multi-Physics- und Multi-Scale-Kopplungen Erweiterungen der Leistungsfähigkeit und des Anwendungsspektrums erreicht. Eine Validierung erfolgt sowohl über In-house-Experimente als auch externe Daten.

Für die verlässliche Vorhersage radiologischer Auswirkungen werden Neutronik-, System-Thermohydraulik-, Störfallanalyse- und Ausbreitungscodes benötigt. Für die Forschung zu schweren Störfällen besteht am KIT eine strategische Partnerschaft mit französischen (IRSN) und US-amerikanischen (US NRC) Organisationen zur Verwendung der Codes ASTEC und MELCOR. Mit der Nutzung von RODOS/JRODOS wird ein gemeinsamer Rahmen zum Notfallmanagement angestrebt.

Zusammenfassend kommt das KIT zu dem Resümee:

- Die gewählte Rechenstrategie ermöglicht basierend auf dem langfristigen Forschungsprogramm von Helmholtz NUSAFF die Sicherheitsbewertung verschiedener Reaktordesigns und ermöglicht weltweit die Vorhersage radiologischer Risiken durch schwere Unfälle.
- Die Forschungsaktivitäten sind in internationale Kooperationen mit US NRC und der französischen IRSN eingebettet.
- Die Codestrategie wird durch ein eigenes experimentelles Programm unterstützt.
- Die Expertise in Reaktorphysik und Neutronik sind hoch relevant für Sicherheitsbetrachtungen einer Zwischenlagerung (Inventar und Nachzerfallswärme) und für die Optimierung der Stilllegung von KKW.

- **Bericht Framatome/AREVA:**

Die Framatome berichtete auf Basis eines Foliensatzes mit dem Titel „*COCOSYS Nutzung in IBUPG*“ [9] über die Nutzung von GRS-Codes in der Framatome GmbH. Die Anwendung des Codes AC²-COCONYS ist für Sicherheitsanalysen in internationalen kommerziellen Neubau- und Nachrüstprojekten sowie in Framatome-internen und auch nationalen und internationalen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zugelassen. Framatome nutzt COCONYS zur Analyse des thermodynamischen Verhaltens und von transienten Prozessen bei schweren Störfällen im Sicherheitsbehälter auch mit dem Ziel des Nachweises der Wirksamkeit von Sicherheitssystemen und führt eine Reihe von Projektbeispielen auch im benachbarten Ausland an.

Zusammenfassend kommt Framatome zu dem Resümee:

- Framatome war an der Entwicklung von COCOSYS beteiligt.
- Die Nutzung von COCOSYS erfolgt als Best-in-class-Software für Containmentanalysen bei postulierten schweren Störfällen.
- **Bericht FRM II:**

Der Bericht des FRM II [4] basierte auf einem Foliensatz „*FRM II: Codes & Methoden*“ und verdeutlicht, dass im Wesentlichen internationale, und z. T. kommerzielle, Codeentwicklungen bei dem Betreiber des FRM II Anwendung finden. Es wird aber auch die GRS-Entwicklung DORT (Neutronik) für schnelle 2D-Abschätzungen genutzt.

161. RSK-AST Sitzung am 13.03.2024:

In der 161. RSK-AST Sitzung am 13.03.2024 wurden die Beratungen mit Berichterstattungen der TÜVé fortgesetzt.

- **Bericht der TÜV NORD EnSys GmbH:**

Die TÜV NORD EnSys GmbH berichtete auf Basis eines Foliensatzes [10] zu den aktuell dort eingesetzten sowie sich in Entwicklung befindlichen Rechencodes im Bereich der Reaktorphysik. Dabei wurde im Wesentlichen das von der TÜV NORD EnSys GmbH entwickelte System RAS (**R**eaktor **A**nalysis **S**ystem) anhand von fünf Anwendungsbeispielen vorgestellt. Nachfolgend wurden weitere Programme dargestellt, die für Aktivierungsrechnungen für kerntechnische Anlagen herangezogen werden. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die Codes CASMO+SIMULATE, MCNP6, SCALE MAVRIC sowie SCALE ORIGEN und FISPACT-II. Abschließend stellte die TÜV NORD EnSys GmbH noch Simulationsmöglichkeiten von Flüssigsalzreaktorzyklen auf Basis verschiedener Rechenprogramme und dreier unterschiedlicher Ansätze vor:

Ansatz 1: auf Basis von SCALE TRITON-MSR,
Ansatz 2: auf Basis von Serpent 2 in Verbindung mit OpenFOAM sowie
Ansatz 3: auf Basis einer Weiterentwicklung von V.S.O.P. in Verbindung mit CITATION.

- **Bericht des TÜV SÜD Industrie Service GmbH:**

Ebenfalls auf Basis eines Foliensatzes [11] berichtete die TÜV SÜD Industrie Service GmbH zum derzeitigen Einsatz von Rechenprogrammen deutscher Entwickler im Bereich der Reaktorsicherheit. Zusammenfassend gelangte der Berichtende dabei zu dem Fazit, dass speziell die Rechencodes AC² (ATHLET, COCOSYS), TESPA-ROD, ATLAS sowie SUSA auch in der Zukunft weiter beim TÜV SÜD Industrie Service GmbH benötigt würden. Dies sei insbesondere auch nötig, um die Tätigkeiten im Rahmen des Aufsichtsverfahrens zum FRM II durchführen und Neubauaktivitäten außerhalb von Deutschland fundiert sicherheitstechnisch

begleiten zu können. Für diese zukünftigen Anwendungen müssten diese Codes allerdings weiterentwickelt werden. Hierzu zähle u. a. eine Erweiterung um neuartige Systeme sowie eine Erweiterung des Anwendungsbereichs (Art der Fluide, Stoffwerte). Zudem müsste auch die Anwenderbetreuung in der Zukunft hinsichtlich des Supports sowie der Anwenderausbildung sichergestellt werden. Weiterhin werden perspektivisch Rechenprogramme für die Umrüstung des FRM II benötigt.

Verschiedene Institutionen berichteten über deutliche Herausforderungen, die die Mitarbeitergewinnung und der Know-how-Erhält zunehmend mit sich bringen.

3 Ergebnisse der Beratungen

Nachfolgend werden die zukünftigen Aufgabenfelder des Bundes und der Länder aus Sicht des RSK-Ausschusses AST dargestellt, um dann die Bedarfe an eine nationale Rechenkette abzuleiten und die hierzu notwendigen Voraussetzungen und Randbedingungen aufzuzeigen.

3.1 Zukünftige Aufgabenfelder des Bundes und der Länder im Bereich nukleare Sicherheit

Basierend auf den dem Ausschuss vorgestellten Berichten und Informationen der verschiedenen Institutionen und den Diskussionen des Ausschusses, ergeben sich aus Sicht des Ausschusses zukünftig insbesondere folgende anstehende Aufgabenfelder:

- Durchführung von Sicherheitsanalysen für in Deutschland in Betrieb befindliche Forschungsreaktoren mit vom Betreiber unabhängigen und dem Stand von W&T entsprechenden Codes,
- Durchführung von Sicherheitsanalysen für im Nach- bzw. Restbetrieb befindliche deutsche KKW mit vom Betreiber unabhängigen und dem Stand von W&T entsprechenden Codes (Anmerkung: hier ist zu berücksichtigen, dass dieses Arbeitsfeld zukünftig wegfallen wird),
- Bereitstellung von Prognosen und Bewertungen zur Unterstützung nationaler radiologischer Lagezentren im Falle von Unfällen in Reaktoren im In- und Ausland,
- Durchführung von Analysen zu aktuellen Sicherheitsfragen für Reaktoren im Ausland,
- Durchführung von Analysen zu Grundsatzaspekten neuer Entwicklungen im Ausland,
- Mitwirkung deutscher Stellen bei der Weiterentwicklung des internationalen kerntechnischen Regelwerks inkl. der Nachweisführung und der Nachweismethoden.

Und als übergeordneter Punkt:

- Erhalt und Weiterentwicklung der notwendigen kerntechnischen Expertise in Deutschland (Kompetenzerhalt). So wird in [12] formuliert: „Um den Erhalt und die Weiterentwicklung der notwendigen Expertise in Deutschland langfristig zu gewährleisten, gilt es Maßnahmen zu ergreifen,

die den bereits bestehenden Fachkräftemangel und den drohenden Verlust von aktiv verfügbarem Wissen und Kompetenz entgegenzuwirken.“

3.2 Abgeleitete Bedarfe an die nationale Rechenkette

Durch die o. g. vielfältigen Aufgabenfelder des Bundes und der Länder besteht aus Sicht des Ausschusses weiterhin Bedarf für validierte Rechencodes und Anlagenmodelle.

Der Aufbau von Kooperationen, der Austausch von Daten, aber auch der Zugang zu relevanten internationalen/europäischen Informationen oder die Durchführung von Forschungsprojekten wird durch das Einbringen nationalen Know-hows insbesondere in Form von nationalen Rechencodesystemen und/oder Versuchsanlagen/-daten wesentlich unterstützt.

Zu berücksichtigen ist hier auch, dass internationale Akzeptanz insbesondere durch eine nationale Verfügbarkeit von Rechencodesystemen und/oder Versuchseinrichtungen aufrechterhalten werden kann, da so ein wissenschaftliches Angebot zu einer Zusammenarbeit vorgelegt werden kann. Die RSK hat in ihrer *Stellungnahme zur „Einschätzung des fachlichen Beitrags der gegebenenfalls erweiterten THAI-Versuchsanlage hinsichtlich der sicherheitstechnischen Bewertung von Forschungs- und Leistungsreaktoren sowie der Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung im Bereich der nuklearen Sicherheit“* [13] als Ergebnis dargestellt, dass Grundsatzentscheidungen der öffentlichen Hand, einzelne national etablierte F&E-Tätigkeiten nicht weiter zu verfolgen, den Kompetenzerhalt und die Nachwuchsgewinnung im kerntechnischen Sektor erschweren können.

Eine Zuordnung der Anwendungsbereiche der nationalen Rechenkette zu den o. g. Aufgabenfeldern ist in Tabelle 1 dargestellt. Ergänzend werden entsprechende Anwender/Nutzer spezifiziert.

Tabelle 1: Exemplarische Übersicht der Verknüpfung der Aufgabenfelder mit Codes der nationalen Rechenkette

Aufgabenfelder	Beispiele und Anwender	Eingesetzte Codes	Beispiele möglicher Codeentwicklungen
Sicherheitsanalysen für Forschungsreaktoren in Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> • Fragestellungen im Zusammenhang mit dem FRM II • Anwendung der nationalen Rechenkette wie AC² durch GRS, TÜVe, deutsche Forschungseinrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Die nationale Rechenkette bietet eine Basis für Sicherheitsanalysen • Angewendete Codes, u. a. AC² und SUSA • Neutronik-Codes <ul style="list-style-type: none"> • Erzeugung Wirkungsquerschnitte für 3D-Neutronenkinetik mit deterministischen Codes (HELIOS, SCALE) oder Monte Carlo Codes (beispielsweise Serpent, MCNP) • 3D-Neutronenkinetik (FENNECS, TORT-TD) 	<ul style="list-style-type: none"> • Phasenübergangsmodelle bei niedrigem Druck und in der Anwesenheit von nicht-kondensierbaren Gasen • AC²/ATHLET-CD für Brennelementgeometrie • Kernzerstörungsmodelle für BE von Forschungsreaktoren • 3D-Neutronenkinetik (FENNECS, TORT-TD) • Brennstabbelastung (TESPA-ROD) • CFD (OpenFOAM) • ATHLET-CD und COCOSYS für den Spaltprodukttransport • Thermohydraulische Kopplung ATHLET/COCOSYS • Werkzeuge/Tools für Kopplung mit AC², Numeriktoolbox
Sicherheitsanalysen für deutsche Kernkraftwerke im Nachbetrieb und Restbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbare Karenzzeit bei Ereignissen im BE-Lagerbecken • Benötigte Sicherheitseinrichtungen in Abhängigkeit der verfügbaren Karenzzeit • Anwender: GRS, TÜVe, deutsche Forschungseinrichtungen • Behälterbeladung 	<ul style="list-style-type: none"> • insbesondere AC² • Inventar- und Nachzerfallsleistungsberechnung mit MOTIVE (inkl. Ventina) • CMS-Modul SNF (Studsvik) 	<ul style="list-style-type: none"> • AC²-programmmodul-übergreifender Spaltprodukttransport • Phasenübergangsmodelle bei niedrigem Druck und in Anwesenheit von nicht-kondensierbaren Gasen • Erweiterung der Referenzdaten in Inventarberechnungstools auf Nach- und Restbetriebsphase

Aufgabenfelder	Beispiele und Anwender	Eingesetzte Codes	Beispiele möglicher Codeentwicklungen
Prognosen und Bewertungen zur Unterstützung nationaler radiologischer Lagenzentren bei Unfällen in inländischen sowie ausländischen Reaktoren	<ul style="list-style-type: none"> • Prognosen und Analysen von Stör- und Unfallabläufen • Berechnung von generischen Quelltermen • Plausibilitätsbewertung von Quelltermprognosen • Bewertung von prognostizierten Zeitdauern bis zum Erreichen weiterer Eskalationsstufen im Unfallablauf • Bewertung von in Vorbereitung befindlichen betreiberseitigen Maßnahmen zur Ereignisbeherrschung und Schadensbegrenzung • Anwender: GRS 	<ul style="list-style-type: none"> • FASTPRO zur Bewertung von Quelltermprognosen (GRS, Voraussetzung: PSA der Stufe 2) • Bibliotheken mit im Hinblick auf potenzielle Fragestellungen im Einsatzfall aufbereiteten Ergebnissen von durchgeführten Störfallablaufanalysen, erstellt u. a. mit den Rechencodes AC² und MELCOR • Inventar- und Nachzerfallsleistungsberechnung mit MOTIVE (inkl. Ventina) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbau und Pflege vorhandener Bibliotheken für bestehende ausländische Kernkraftwerke • Weiterentwicklung der Wissensbasen mit Informationen zur System- und Bautechnik der verschiedenen KKW(-Typen) • Weiterentwicklung von AC², FASTPRO, MOTIVE, VENTINA entsprechend dem Stand von W&T
Analysen zu aktuellen Sicherheitsfragen für Reaktoren im Ausland	<ul style="list-style-type: none"> • Bewertung von auftretenden Ereignissen bzw. Sachverhalten • Ergebnisse von Sicherheitsüberprüfungen, Ergebnisse von Peer Reviews • Fragen zu Langzeitbetrieb/ Laufzeitverlängerungen • Neubauten • Ggf. Bereitstellung von Codes für Regulierungsbehörden in anderen Ländern • Anwender: GRS, deutsche Forschungseinrichtungen, internationale Anwender, TÜV 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung von AC² und SUSA • OpenFOAM • Neutronik-Codes: <ul style="list-style-type: none"> • Erzeugung Wirkungsquerschnitte für 3D-Neutronenkinetik mit dem Kernsimulator KMACS (inkl. HELIOS, SCALE) • 3D-Neutronenkinetik (FENNECS, QUABOX/CUBBOX, TORT-TD) • Strukturmechanik (SM) Codes <ul style="list-style-type: none"> • Sprödbruchsicherheitsnachweis für den RDB (PROST) • Leck-vor-Bruch Bewertung für Rohrleitungen (WinLeck) • Komponentenverhalten bei Stör- und Unfallszenarien (PROST, ASTOR) • Finite Elemente Codes zur Berechnung Komponenten- und Gebäudeintegrität (LS-DYNA, ANSYS Mech., AUTODYN) 	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung der nationalen Rechenkette an den sich entwickelnden Stand von W&T, insbesondere: • Stetige Pflege/ Erweiterung/ Validierung AC², SM-Codes • CFD (OpenFOAM) für spezielle Fragestellungen der Strömungsmechanik • Neue/verbesserte Modelle für Kernzerstörung, Schmelzedynamik, • Erweiterte Komponentenmodelle (Wärmetauscher, Ventile, Leittechnik)

Aufgabenfelder	Beispiele und Anwender	Eingesetzte Codes	Beispiele möglicher Codeentwicklungen
Analysen zu Grundsatzaspekten neuer Entwicklungen im Ausland	<ul style="list-style-type: none"> Fragen zur Entwicklung neuer Reaktordesigns und Reaktorkonzepte, insb. von SMR Fragen zu neuen Entwicklungen im Bereich der Reaktorsicherheit Anwender: GRS, deutsche Forschungseinrichtungen, internationale Anwender 	<ul style="list-style-type: none"> AC² zur Beschreibung des Anlagenverhaltens im Reaktorkern, Kühlkreislauf und Sicherheitsbehälter nach dem fortlaufend und sich entwickelnden Stand von W&T (passive Systeme, neue Kühlmedien, schnelle Systeme) Erzeugung der Wirkungsquerschnitte für 3D-Neutronenkinetik mit dem Kernsimulator KMACS (inkl. HELIOS, SCALE) oder Monte Carlo Codes (Serpent) 3D-Neutronenkinetik (FENNECS, TORT-TD) Referenzmodelle mit Monte Carlo (beispielsweise Serpent, OpenMC) Strukturmechanik (SM) Codes: <ul style="list-style-type: none"> Schätzung von Leckhäufigkeiten für neue Anlagen (PROST) Finite Elemente Codes zur Komponentenintegrität (ANSYS Mech.) 	<ul style="list-style-type: none"> Verbesserung im Hinblick auf integrale gekoppelte Simulationen Modelle für neue Reaktorsysteme (z. B. Einführung von passiven Sicherheitseinrichtungen, Accident Tolerant Fuels (ATF) etc.) Erweiterte Komponentenmodelle (Wärmetauscher, Ventile, Leittechnik) Querschnittsaufgaben wie die Integration zu weiteren Codes Verbesserung der Neutronenphysik im Hinblick auf Systeme mit schnellen Neutronen Weiterentwicklung der nationalen Rechenkette (Rechencodes wie AC², FENNECS, MOTIVE, PROST, ...) unter Berücksichtigung der neuen Entwicklungen und Designs
Weiterentwicklung des internationalen Regelwerks, zugehörige Nachweisführung und -methoden	<ul style="list-style-type: none"> Mitwirkung beim Fortschreiben des internationalen Regelwerks (IAEA) Mitwirkung bei der Entwicklung von europäischen Anforderungen an bestehende und neue Reaktordesigns (WENRA, ENSREG, ENSRA) 	<ul style="list-style-type: none"> Die nationale Rechenkette kann für die Ableitung von Anforderungen an die Nachweisführung und Nachweismethoden herangezogen werden. 	<ul style="list-style-type: none"> Aktive Beteiligung an internationalen Forschungsprogrammen (Benchmarking, Code-zu-Code-Vergleiche, experimentelle Programme, ...)

Für Weiterentwicklungen der nationalen Rechenkette entsprechend des Stands von W&T sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Durch Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten Rechenprogramme, Analysetools und die Anlagenmodellierung, die für Sicherheitsanalysen für KKW im Nachbetrieb und insbesondere für Forschungsreaktoren in Deutschlanderforderlich sind, weiterentwickelt werden. Hierdurch sollen auch zukünftig ausreichend Möglichkeiten, Wissen und Erfahrung in Forschungseinrichtungen und Sachverständigenorganisationen vorgehalten werden, um bei Bedarf die Einhaltung von Anforderungen

aus dem kerntechnischen Regelwerk und die sicherheitstechnische Bedeutung aufgetretener Phänomene oder Ereignisse sowie von Stör- und Unfallszenarien unabhängig analysieren und interpretieren zu können.

- Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten eine eigenständige sicherheitstechnische Einschätzung von Anlagen im Ausland und von international diskutierten Reaktorkonzepten unterstützen und ermöglichen. Hierzu sollten die Entwicklungen der Rechencodes und der Anlagenmodelle mindestens so durchgeführt oder so weit begleitet werden, dass das Anlagenverhalten zutreffend analytisch beschrieben werden kann. Auf dieser Basis sollten Analysen durchgeführt werden können, um
 - ein Verständnis über diese Reaktoren zu erarbeiten,
 - die sicherheitstechnische Auslegung bzw. die sicherheitstechnische Bedeutung von aufgetretenen Ereignissen einschätzen zu können,
 - bei einem kerntechnischen Notfall das radiologische Lagezentrum des Bundes unterstützen zu können und
 - eine ausreichende Kompetenz auf dem Gebiet der deterministischen und probabilistischen Sicherheitsanalysen zu erhalten, die ein internationales Mitwirken an dem Fortschreiten des Stands von W&T und ggf. eine zeitnahe Beratung des BMUV ermöglicht.
- Es ist davon auszugehen, dass Möglichkeiten für die sicherheitstechnische Nachweisführung weiterentwickelt und zunehmend international eingesetzt werden und auch in Regelwerken Eingang finden werden. Durch die technischen Fortschritte z. B. auf dem Gebiet der Rechentechnik, den stetig steigenden Detaillierungsgrad der Simulationsmöglichkeiten, die intensivere Berücksichtigung von Unsicherheiten, die Kombination deterministischer und probabilistischer Methoden und den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz bzw. von maschinellen Lernalgorithmen kündigen sich neue Nachweismöglichkeiten an. Darüber hinaus leisten für spezifische Fragestellungen wie z. B. zum Verständnis neuer Phänomene oder übergreifender Einwirkungen Simulationen einen steigenden Beitrag. Um international bei der Gestaltung des Regelwerks und der sicherheitstechnischen Nachweisführung mitwirken zu können, müssen diese Entwicklungen aktiv begleitet werden.

3.3 Weitere Aspekte hinsichtlich einer Weiterentwicklung der nationalen Rechenkette zur Erfüllung der Aufgabenfelder und Bedarfe

In Deutschland entwickelte Codes der nationalen Rechenkette werden in der Zusammenarbeit mit Universitäten und Helmholtz-Zentren weiterentwickelt und validiert. Hierfür erhalten die nationalen Partner Zugang zum Quellcode, sodass sie eigene Modelle entwickeln können. Diese werden – falls geeignet – in die Programme übernommen und so allen Anwendern zur Verfügung gestellt. Damit können deutsche Forschungseinrichtungen universitäre Abschlussarbeiten und Promotionen anbieten und die Ergebnisse dieser Arbeiten können dauerhaft genutzt werden. Erkenntnisse aus dieser Weiterentwicklung werden publiziert und fließen an die entwickelnde Institution zurück und sind damit für das BMUV verfügbar. Grundsätzlich gibt es in der Wissenschaft einen Trend zu Open-Data und Open-Science. In der Kerntechnik unterliegen viele Daten

und Programme jedoch Ausfuhrbeschränkungen, sodass ein internationaler Austausch dadurch eingeschränkt ist. Auch können in einigen Fällen die Quellcodes von Rechenprogrammen nicht zur Verfügung stehen, sodass Möglichkeiten der Codeentwicklung aber auch der Fehlersuche für den Anwender eingeschränkt sind.

Durch die auch stattfindende Nutzung von international entwickelten Codes (z. B. über die OECD/NEA-Datenbank) können deutsche Experten Zugang zu internationalem Know-how erhalten und ggf. nicht durch nationale Codes abgedeckte Anwendungsfelder bearbeiten.

Durch die jahrzehntelange Entwicklung und Anwendung der nationalen Rechenkette ist in Deutschland ein großes Know-how vorhanden. Die Entwicklung und auch die Einarbeitung in Codes gehen notwendigerweise mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand einher. Ein Ersatz vorhandener Codes in der nationalen Rechenkette mit den vorhandenen Datensätzen durch andere Codes würde daher mit einem erheblichen Aufwand einhergehen und somit nur langfristig möglich sein.

Ferner resultieren aus der Entwicklung und Anwendung der nationalen Rechenkette und der dadurch möglichen internationalen Zusammenarbeit Kontakte zu ausländischen Organisationen und Informationen zu ausländischen Anlagen, die erst eine eigene und damit unabhängige Sprechfähigkeit zu Analysen für ausländische Anlagen erlauben. Dies sind notwendige Voraussetzungen, um Quelltermanalysen und mögliche Auswirkungen auch auf Deutschland unabhängig berechnen zu können. So steht besonders mit dem Codesystem AC² (ATHLET-/CD und COCOSYS) ein leistungsfähiges, umfassend validiertes und auch international eingesetztes Werkzeug zur Verfügung.

Weitere Aspekte einer anwendungsorientierten Grundlagenforschung sind die Teilnahme an internationalen Diskussionen in Expertengruppen, die Fortschreibung des Stands von W&T (z. B. bei den Methoden der Nachweisführung) z. B. bei IAEA, OECD NEA, die Mitarbeit in, durch nationale Projektforschung gestützten, EU-finanzierten Forschungsprogrammen oder die Beteiligung in internationalen Forschungsprogrammen, z. B. mit den Rechencodes AC² und OpenFOAM.

Bei neuen Reaktordesigns stellen sich bei den zu betrachtenden Ereignisabläufen oftmals besondere Herausforderungen, z. B. durch geringere treibende Druckdifferenzen bei freier Konvektion gegenüber erzwungenen Strömungen, und es gibt mehr relevante Phänomene mit signifikant weniger Betriebserfahrungen, sodass Simulationsergebnissen eine besondere Bedeutung für die Sicherheitsbewertung zukommt. Mit eigenständigen Codeentwicklungen wird die Grundlage geschaffen, neue technische Entwicklungen (insbesondere mit Blick auf neue Reaktordesigns und Forschungsreaktoren) sicherheitstechnisch analysieren und Rechenmodelle nach den konkreten Bedürfnissen entwickeln und validieren zu können, sodass eine kontinuierliche aktive Mitgestaltung des Stands von W&T gegeben ist.

Die Entwicklung und Anwendung der nationalen Rechenkette leistet, auch durch die Kooperationen mit Universitäten, einen wichtigen Beitrag, um den Kompetenzerhalt und die Nachwuchsgewinnung auf dem Gebiet der Reaktorsicherheit zu fördern und zu unterstützen und somit die adressierten Aufgabenfelder auch in der Zukunft qualifiziert erfüllen zu können. Diese Aufgabenerfüllung erfordert eine langfristige Planungssicherheit hinsichtlich personeller und dazu auch kontinuierlich bereitgestellter finanzieller Ressourcen.

4 Abkürzungsverzeichnis

AECL (CA)	Atomic Energy of Canada Ltd. (Kanada)
AEMI (HU)	Atomenergia Mérnökiroda Kft., Atomic Energy Engineering Company Ltd. (Ungarn)
ARB (UA)	Analytical Research Bureau for NPP Safety (Ukraine)
Ariane Group	Ariane Group GmbH (Deutschland)
ARN (AR)	Autoridad Regulatoria Nuclear (Argentinien)
ATECH (RU)	Atomtechenergo JSC (Russland)
AXPO (CH)	Axpo Power AG (Schweiz)
BASE	Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung
BAPETEN (ID)	Badan Pengawas Tenaga Nuklir, Nuclear Energy Regulatory Agency (Indonesien)
BNTU (BY)	Belarusian National Technical University (Belarus)
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BOKU (AT)	Universität für Bodenkultur Wien (Österreich)
CNEN (BR)	Comissão Nacional de Energia Nuclear (Brazilien)
CNL (CA)	Canadian Nuclear Laboratories (Kanada)
CNPRI (CN)	China Nuclear Power Technology Research Institute (China)
CNRS (BY)	Center for Nuclear and Radiation Safety (Belarus)
CNSC (CA)	Canadian Nuclear Safety Commission (Kanada)
CTU (CZ)	Czech Technical University (Tschechische Republik)
DCNS (FR)	Direction des constructions navales, seit 2017 Naval Group (Frankreich)
EnKK	EnBW Kernkraft GmbH
ELKH (HU)	Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, Eötvös Loránd Research Network (Ungarn)
ENSI (CH)	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (Schweiz)
ENPRO (BG)	Enpro Consult Ltd. (Bulgarien)
ENRRA (EG)	Egyptian Nuclear and Radiological Regulatory Authority (Ägypten)
EPFL (CH)	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Schweiz)
ESG (UA)	Energy Safety Groupe LLC (Ukraine)
FIGES (TR)	FİGES A.Ş. (Türkei)
Fraunhofer IWM	Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik Freiburg (Deutschland)
FRM II	Forschungsreaktor München II
FZJ	Forschungszentrum Jülich
HEU (CN)	Harbin Engineering University (China)
HGF	Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e.V
HZDR	Helmholz-Zentrum Dresden-Rossendorf
HSZG	Hochschule Zittau/Görlitz
IKE	Institut für Kernenergetik und Energiesysteme
IPP-Center (UA)	IPP-Center LLC (Ukraine)
JIPNR Sosny (BY)	Joint Institute for Power and Nuclear Research Sosny (Belarus)
JRC (EU)	Joint Research Centre (European Commission)
JSI (SI)	Jozef Stefan Institute (Slowenien)
KIEP (UA)	Kyiv Research and Design Institute „Energoproject“ (Ukraine)
KINS (KR)	Korea Institute of Nuclear Safety (Korea)
KIT	Karlsruher Institut für Technologie

KIWA (SE)	KIWA Inspecta Technology AB (Schweden)
KSG	Kraftwerks-Simulator-GmbH (Deutschland)
KTH (SE)	Royal Institute of Technology (Schweden)
LEI (LT)	Lithuanian Energy Institute (Litauen)
MEPhI (RU)	Moscow Engineering Physics Institute (Russland)
Missouri S&T (US)	Missouri University of Science and Technology (USA)
MPA	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
MY	Malaysia
NIKIEI (RU)	N.A. Dollezhal Scientific Research and Development Institute of Power Engineering RDIPE (Russland)
NRA (SI)	Nuclear Regulatory Authority (Slowenien)
NRC KI (RU)	National Research Centre Kurchatov Institute (Russland)
NRSC (AM)	Nuclear and Radiation Safety Center (Armenien)
NUBIKI (HU)	Nuclear Safety Research Institute (Ungarn)
NuStar (CN)	Shanghai NuStar Nuclear Power Technology Co., Ltd. (China)
OKB Gidropress (RU)	Opytno-Konstruktorskoye Byuro Gidropress (Russland)
ONR (GB)	Office for Nuclear Regulation (Großbritannien)
RAOS (FI)	RAOS Project OY (Finnland)
PSI (CH)	Paul Scherrer Institut (Schweiz)
RUB PSS	Ruhr Universität Bochum Plant Simulation and Safety
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Rostechnadzor (RU)	Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Russland)
SINAP (CN)	Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Science (China)
SJTU (CN)	Shanghai Jiao Tong University (China)
SEC NRS (RU)	Scientific and Engineering Center for Nuclear and Radiation Safety (Rumänien)
SSTC NRS (UA)	State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety (Ukraine)
STC Energoatom (UA)	Scientific and Technical Center (Ukraine)
STU (SK)	Slovak University of Technology (Slowakei)
SURO (CZ)	Státní ústav radiační ochrany – National Radiation Protection Institute (Tschechische Republik)
SZU (CN)	Shenzhen University (China)
TAEK (TR)	Turkish Atomic Energy Agency (Türkei)
THD	Technische Hochschule Deggendorf
TUD	Technische Universität Dresden
TUHH	Technische Universität Hamburg
TUM	Technische Universität München
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TTSO (TR)	Turkey Technical Support Organization (Türkei)
UniBW	Universität der Bundeswehr München
UJD SR (SK)	Urad Jadroveho Dozoru - Slovenskej Republiky – NRA Nuclear Regulatory Authority (Slowakei)
UOIT (CA)	University of Ontario Institute of Technology (Kanada)
UJV Řež (CZ)	Nuclear Research Institute (Tschechische Republik)
UniLux (LU)	Universität Luxembourg (Luxemburg)
UNIPI (IT)	Università di Pisa (Italien)

USTC (CN)	University of Science and Technology of China (China)
VARANS (VN)	Vietnam Agency for Radiation and Nuclear Safety (Vietnam)
VMU (LT)	Vytautas Magnus University (Litauen)
VNIIAES (RU)	All-Russian Research Institute for Operation of NPP (Russland)
VO Safety (RU) VO	„Safety“ Joint Stock Company, früher FSUE VO „Safety“ (Russland)
VTT (FI)	Technical Research Centre of Finland (Finnland)
VUJE (SK)	VÚJE, a.s. Engineering, Design and Research Organisation (Slowakei)
XJTU (CN)	Xi'an Jiaotong University (China)

5 Literatur

- [1] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Rechencode-Entwicklung in Deutschland: Künftiger Bedarf und Eingang in die Beratungen der RSK – Zukunft der deutschen Rechenkette –
Vortragsfolien aus der 158. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 02.03.2023
- [2] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Scientific Codes Developed and Used at GRS, Volume 1, Reactor Safety, June 2011,
https://www.grs.de/sites/default/files/2021-11/GRS_Broschuere_Codes_2011.pdf
- [3] Ergebnisprotokoll der 158. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 02.03.2023
- [4] Forschungs-Neutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz (FRM II)
FRM II: CODES & METHODEN
Vortragsfolien aus der 159. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 11.05.2023
- [5] Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Beiträge der GRS zur Diskussion zur Zukunft der deutschen Rechenkette
Vortragsfolien aus der 159. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 11.05.2023
- [6] Ruhr-Universität Bochum (RUB)
Universitäre Reaktorsicherheitsforschung zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses unter Einbindung von Simulationscodes
Vortragsfolien aus der 159. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 11.05.2023
- [7] Helmholtz-Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR)
Entwicklung und Einsatz von Rechenprogrammen
Vortragsfolien aus der 159. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND SYSTEMTECHNIK (AST) am 11.05.2023

-
- [8] Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
KIT Computational Route for the Safety Assessment and Radiological Risk Prediction
of NPPs,
Vortragsfolien aus der 159. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND
SYSTEMTECHNIK (AST) am 11.05.2023
 - [9] Framatome GmbH
COCOSYS Nutzung in IBUPG, Stand: 28.04.2023
Vortragsfolien aus der 159. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- UND
SYSTEMTECHNIK (AST) am 11.05.2023
 - [10] TÜV NORD EnSys GmbH
Berechnungssysteme in der Reaktorphysik
Aktuelle und Entwicklungsprojekte, Stand: 09.11.2023
Vortragsfolien aus der 161. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- und
SYSTEMTECHNIK vom 13.03.2024
 - [11] TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Einsatz von Rechenprogrammen deutscher Entwickler im Bereich der
Reaktorsicherheit
Beitrag des TÜV SÜD zur Diskussion über die „Zukunft der deutschen Rechenkette“,
Vortragsfolien aus der 161. Sitzung des RSK-Ausschusses ANLAGEN- und
SYSTEMTECHNIK (AST) vom 13.03.2024
 - [12] Die Bundesregierung
Konzept zur Kompetenz- und Nachwuchsentwicklung für die nukleare Sicherheit
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWI); August 2020
 - [13] RSK-Stellungnahme - Einschätzung des fachlichen Beitrags der gegebenenfalls
erweiterten THAI-Versuchsanlage hinsichtlich der sicherheitstechnischen Bewertung
von Forschungs- und Leistungsreaktoren sowie der Kompetenz- und
Nachwuchsentwicklung im Bereich der nuklearen Sicherheit, 534. Sitzung der
Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) am 22.02.2023