

wbh

**WILHELM BÜCHNER
HOCHSCHULE**

TRIGA – Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors - Eine vergleichende technologische Innovationssystemanalyse

Jessica Riemer, Prof. Dr. habil Ralf Isenmann



Schriftenreihe der
Wilhelm Büchner Hochschule

Band 17/2025

TRIGA – Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors – Eine vergleichende technologische Innovations - systemanalyse

Riemer Jessica, Prof. Dr. habil. Ralf Isenmann



Schriftenreihe
der Wilhelm Büchner Hochschule

Band 16/2026

Impressum

ISSN (Online) 2751-0514

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Wilhelm Büchner Hochschule Darmstadt 2026

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Werden Personenbezeichnungen aus Gründen der besseren Lesbarkeit nur in der männlichen oder weiblichen Form verwendet, so schließt dies das jeweils andere Geschlecht mit ein.

Herausgeber: Forschungsausschuss der Wilhelm Büchner Hochschule

Layout und Satz: Jan Hartmayer

Projektkoordination: Prof. Steffen Rümpler

E-Mail: Forschung@wb-fernstudium.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Abstract (English)

The objective of this master's thesis is to identify barriers within the innovation system of small modular reactors (SMRs) and to derive recommendations that support the diffusion of SMRs. To achieve this, the TRIGA research reactors innovation system and the SMRs innovation system are analyzed and compared based on literature reviews. Building on these insights, further studies are conducted through semi-structured, qualitative interviews with experts.

The findings demonstrate that the innovation system of TRIGA research reactors is characterized by robust functions that positively reinforce one another. In contrast, the functions within the innovation system of SMRs are partly less robust than those of the innovation system of TRIGA research reactors. This finding is validated by results from the performed expert interviews. Specific weaknesses are identified in the functions market formation, mobilization of resources, and creation of legitimacy. Key challenges include fast prototype construction, a lack of orders and as a result weak supply chains, as well as the need for harmonization and simplification of existing regulations. Both the literature and interviews indicate that network formation among similar reactor types has not been sufficiently addressed for the innovation system of SMRs. The construction of multiple reactors of the same type is mainly viewed from a cost and optimization perspective. However, by using the example of the innovation system of TRIGA research reactors, it was shown that network formation among similar reactor types is not to be underestimated.

The key implications of this study highlight the need for rapid prototype construction, the translation of expressed demand into binding commitments, and regulatory adjustments that address the specific needs of SMRs. For the construction of prototypes, some stakeholders are expressing a desire for financial risks to be covered by the government.

Further research could focus on applying the findings of this thesis to regions that are underrepresented in this study, including Asia, Russia, Africa, the Arab world, and South America.

Abstract (Deutsch)

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Hindernisse des Innovationssystems Small Modular Reactors (SMRs) zu identifizieren und Handlungsempfehlungen abzuleiten, die die Diffusion von SMRs unterstützen. Dafür wurde das Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktor und das Innovationssystem SMRs auf Basis von Literaturauswertungen analysiert und einander gegenübergestellt. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurden weitere Untersuchungen mittels halbstrukturierter, qualitativer Expert*inneninterviews vorgenommen.

Es konnte gezeigt werden, dass das Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktor durch leistungsstarke Funktionen geprägt ist, welche sich gegenseitig positiv beeinflussen. Die Funktionen im Innovationssystem SMRs hingegen sind in Teilen schwächer ausgeprägt als die Funktionen des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktor. Dieses Ergebnis wird auch durch die Aussagen aus den Expert*inneninterviews gestützt. Schwächen konnten vor allem in den Funktionen Marktstehung, Ressourcenmobilisierung und Legitimität herausgearbeitet werden. Identifizierte Herausforderungen sind der Bau von Prototypen, der Mangel an Aufträgen und die dadurch fehlende Investitionssicherheit für Lieferketten, sowie die Harmonisierung und Vereinfachung von bestehenden Regularien. Für das Innovationssystem SMRs, findet der Aspekt der Netzbildung unter gleichartigen Reaktortypen, sowohl in der Literatur als auch in den Interviews keine Berücksichtigung. Das Errichten mehrerer baugleicher Reaktoren wird lediglich aus Sicht des Kosten- und Optimierungseffekt betrachtet. Es konnte jedoch am Beispiel des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktoren gezeigt werden, dass die Netzbildung unter gleichartigen Reaktoren nicht zu vernachlässigen ist.

Die wichtigsten Implikationen, die sich aus den Ergebnissen der Arbeit ableiten lassen, sind der schnelle Bau von Prototypen, die Übersetzung der verbalisierten Nachfrage in verbindliche Zusagen, sowie die Anpassung der Regularien, um den Bedürfnissen für SMRs Rechnung zu tragen. Für den Bau von Prototypen zeichnet sich der Wunsch einiger Akteure ab, dass finanzielle Risiken durch Staaten abgesichert werden.

Weiterführende Forschung könnte sich mit der Übertragung der erzielten Untersuchungsergebnisse auf den in dieser Arbeit unterrepräsentierten asiatischen, russischen, afrikanischen, arabischen und südamerikanischen Raum befassen.

Inhalt

Danksagung	II
Abstract (English)	III
Abstract (Deutsch).....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Naturwissenschaftliche Bezeichnungen und Größen.....	XVI
1 Einleitung	16
1.1 Motivation.....	16
1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage.....	19
1.3 Technologische Innovationssystemanalyse ergänzt durch Experteninterviews als methodisch gestützte Vorgehensweise ..	20
1.3.1 Die Methode der technologischen Innovationssystemanalyse.....	20
1.3.2 Die Methodik der Expert*inneninterviews.....	22
1.3.3 Limitationen	25
2 Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen zu den technologischen Innovationssystemen: TRIGA-Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors.....	27
2.1 Technologische Innovationssystemanalyse als konzeptioneller und methodischer Rahmen.....	27
2.2 Grundlagen für die technologische Innovationssystemanalyse zu TRIGA-Forschungsreaktoren.....	34
2.2.1 Relevante historische Grundlagen zur Entwicklung und	
Diffusion von TRIGA-Forschungsreaktoren.....	34
2.2.2 Technische Grundlagen zu TRIGA-Forschungsreaktoren	
und ihren innovativen Designmerkmalen	39
2.2.3 Anwendungsfelder und Verbreitung der	
TRIGA-Forschungsreaktoren	44
2.3 Grundlagen für die technische Innovationssystemanalyse zu Small Modular Reactors.....	47
2.3.1 Definition von Small Modular Reactor	48
2.3.2 Design- und Schlüsselfaktoren als Grundlage für	
kommerzielle Erfolge von Small Modular Reactors.....	52

2.3.3	Wirtschaftliche Aspekte von Small Modular Reactors.....	54
3	Historisch systematische Untersuchung zu Innovationssystemen für TRIGA – Forschungsreaktoren von 1950 bis heute	58
3.1	Analyse der Funktionen im Innovationsfeld TRIGA-Forschungsreaktoren.....	58
3.2	Die Erfolgsfaktoren von TRIGA Forschungsreaktoren anhand ausgewählter Beispiele.....	65
3.2.1	Das “Atoms for Peace” – Programm	65
3.2.2	Das Rücknahmeprogramm für bestrahlte Brennelemente.....	70
3.2.3	Die Gemeinschaft der TRIGA – Reaktoren.....	73
4	Systematische Untersuchung zum Innovationssystem Small Modular Reactors	75
4.1	Analyse der Funktionen im Innovationssystem Small Modular Reactors	75
4.2	Identifizierung möglicher Schlüsselfaktoren für die Diffusion von Small Modular Reactors am Markt	92
4.2.1	Sicherheitsaspekte im Design.....	92
4.2.2	Modularität als Schlüsselfaktor	94
5	Vertiefende Experteninterviews zu den technischen Innovationssystemanalysen für TRIGA-Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors	97
5.1	Entwicklung des Interviewleitfadens anhand der in den Innovationssystemanalysen herausgearbeiteten Aspekten	97
5.2	Zusammenfassender Überblick über die Interviews und die extrahierten Erkenntnisse.....	101
5.3	Interpretation der Ergebnisse und daraus abgeleitete Schlussfolgerungen.....	122
5.4	Identifizierung wichtiger Akteure zur Verbesserung von Rahmenbedingungen für Small Modular Reactors in Hinblick auf die Diffusion am Markt.....	129
5.5	Reflexion über methodische Herausforderungen und Limitationen der Interviews	131
6	Fazit und Ausblick	133
6.1	Zusammenfassung und Ergebnisse	133
6.2	Implikationen für die Praxis und Entscheidungsträger	137
6.3	Empfehlungen für weitere Forschungsansätze und Entwicklungen	138

Literatur	CXXXIX
Anhang I – Glossar	CL
Anhang II – Categoriesystem für die Auswertung der Experteninterviews unter Verwendung des Programms MAXQDA	CLIII
Anhang III – Wichtige Auszüge aus der „Atoms for Peace“ – Rede von Dwight D. Eisenhower vor der Generalversammlung der Vereinten Nationen	CLVI
Anhang IV – Auszug aus der Research Reactor Database der IAEA: Liste der TRIGA Reaktoren	CLIX
Anhang V – Akteure mit eigenen SMR – Konzepten.....	CLXI
Anhang VI – Neubauprojekte von Kernreaktoren zur kommerziellen Stromerzeugung zwischen Januar 2020 und Oktober 2024.....	CLXVI
Anhang VII – Interviewleitfaden.....	CLXVII
Anhang VIII – Transkripte der durchgeführten Experteninterviews mit MAXQDA – Codes (digital).....	CLXXII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zeitstrahl von 1895 bis 1934 für die wichtigsten wissenschaftlichen Entdeckungen, die zur Entdeckung der Kernspaltung führten, sowie weitere wichtige historische Zeitmarken.....	35
Abbildung 2: Zeitstrahl von 1935 bis 1958 für die Entdeckung der Kernspaltung, sowie die daraus folgende kerntechnische Nutzung, bis hin zum ersten TRIGA – Reaktor. Die Angaben sind ergänzt durch die wichtigsten historischen Zeitmarken.	36
Abbildung 3: Übersicht über die unterschiedlichen Typen von TRIGA Reaktoren. Die zugrundeliegenden Informationen sind entnommen aus (Fouquet u. a., 2003, S. 50–53; IAEA, 2016a, S. 19–34).....	40
Abbildung 4: Funktionsweise des Warm-Neutron-Principle der TRIGA-Brennelemente. Befindet sich das Brennelement in einem kalten Zustand, werden die Neutronen durch die kalten Wasserstoffatome des ZrH-Gitters moderiert. Die Energie der Neutronen kann an die Wasserstoffatome abgegeben werden. Bei heißen Brennelementen sinkt die Moderationsfähigkeit der Wasserstoffatome, da diese sich selbst bereits in einem energiereichen Zustand befinden. Die Neutronen können ihre Energie an die Wasserstoffatome nicht mehr abgeben, eine Spaltung von U-235 kann durch die energiereichen Neutronen nicht ausgelöst werden. Abbildung übernommen aus (Geppert, 2023).....	41
Abbildung 5: Anwendungsbeispiele für TRIGA-Forschungsreaktoren, zusammengestellt aus den Informationen aus (IAEA, 2016a, S. 49–59).....	44
Abbildung 6: Untersuchungsergebnisse der IAEA zur Auslastung der sich noch in Betrieb befindlichen TRIGA – Reaktoren aus 2016. Low steht für weniger als 4 effektive Wochen (EW) Betrieb im Jahr, Medium für 4-20 EWs und High für mehr als 20 EWs. Entnommen aus (IAEA, 2016a, S. 91).	45
Abbildung 7: Übersicht über die wichtigsten Merkmale für SMRs	51
Abbildung 8: Entwicklung der durchschnittlichen globalen Erzeugungskosten für erneuerbare Energien. Entnommen aus (Neuhoff u. a., 2024, S. 229).	55
Abbildung 9: Wichtige Maßnahmen, mit denen SMRs ihre Größennachteile ökonomisch ausgleichen können. Entnommen aus:(OECD & NEA, 2020b, S. 102).....	56
Abbildung 10: Reaktoren, die als TRIGA – Reaktoren gebaut wurden, sortiert nach den Jahren ihrer ersten Kritikalität. Nicht betrachtet	

werden Reaktoren, die nachträglich mit TRIGA-Brennelementen ausgestattet wurden und bei der IAEA als TRIGA modified bzw. converted gelistet sind (IAEA, 2024a).....	60
Abbildung 11: Auswirkungen des „Atoms for Peace“ – Programm auf die unterschiedlichen Funktionen des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktoren. Die Hauptauswirkungen (dicke Pfeile) sind bei den Funktionen Legitimation und Marktbildung zu finden. Davon ausgehend wurden die übrigen Funktionen mit Ausnahme der Suchrichtung angestoßen, wobei nicht sämtliche Funktionen einander beeinflussen (dünne Pfeile).....	66
Abbildung 12: Auswirkungen des Netzwerks von TRIGA – Reaktoren auf die unterschiedlichen Funktionen des Innovationssystems mit Beispielen.....	74
Abbildung 13: Akteure auf dem Gebiet der SMRs, sortiert nach Kategorie und Länder. Daten wurden entnommen von (Riemer, 2024, S. 48–54).....	77
Abbildung 14: Anzahl der Suchergebnisse über die Suchmaschine Google Scholar für die Stichworte "SMR", "SMR nuclear", "SMR reactor" und "Small Modular Reactors" für die Jahre 2004 bis 2024. Stichtag: 16.10.2024	79
Abbildung 15: SMR-Konzepte in der Entwicklung, aufgelöst nach ihrer zugrundeliegenden Technologie. Die Daten wurden von der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten entnommen (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1).....	84
Abbildung 16: SMR-Konzepte in fortgeschrittenen Designphasen, aufgeschlüsselt nach der zugrunde liegenden Reaktortechnologie. Die Daten wurden von der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten entnommen (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1).	85
Abbildung 17: Geschätzte SMR – Kapazitäten für 2023, nach Regionen aufgeteilt. Entnommen aus (NEA & OECD, 2016, S. 11).....	86
Abbildung 18: Auswirkungen des Schlüsselfaktors Modularität von SMRS auf die Funktionen des Innovationssystems.	95
Abbildung 19: Themenblöcke für die Expert*inneninterviews, inklusive der jeweiligen Hintergründe, sowie die daraus abgeleiteten Fragestellung, die im weiteren Verlauf in Fragen für den Interviewleitfaden umgesetzt werden.....	98
Abbildung 20: Übersicht über die Anzahl der codierten Segmente für den Themenblock "Herausforderungen für SMRs", kategorisiert nach den Funktionen eines Innovationssystems.	102

Abbildung 21: Auswertung der Expert*inneninterviews zu dem Thema „Entwicklungsgeschwindigkeiten von Reaktoren“. Es sind die Umstände dargestellt, die heute zu längeren Entwicklungszeiten führen, im

Vergleich zu den 1950er -1980er. Die Größe der Blasen repräsentiert die Häufigkeit der Antworten.....	108
Abbildung 22: Auswertung der Interviews hinsichtlich der Frage nach der Attraktivität der Kerntechnik für junge Talente. Die aufgeführten Länder wurden als positive Beispiele für die Bewertung der Attraktivität angeführt.....	111
Abbildung 23: Auswertung der Expert*innenninterviews zu dem Themenblock "Markterwartung". Dargestellt sind Länder und Regionen, für die eine positive Markterwartung ausgedrückt wurden, sowie die Bedingungen und Anwendungsfälle, die den Einschätzungen zu Grunde liegen.....	114
Abbildung 24: Auswertung aus den Expert*inneninterviews zu dem Themenblock "Markterwartung". Dargestellt sind Aussagen über Länder und Regionen mit eher negativer Markterwartung, sowie Hinderungsgründe, die den Annahmen zugrunde liegen.....	115

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Teilnehmer der Expert*inneninterviews mit der für die Interviews und Textstellenverweise verwendeten Kennung, sowie einer anonymisierten Darstellung des beruflichen Hintergrunds. 22	22
Tabelle 2: Transkriptionsregeln für die Expert*inneninterviews. 23	23
Tabelle 3: Funktionen in technologischen Innovationssystemen und deren Beschreibung. Angelehnt an die Darstellung von (Purkus u. a., 2020, S. 17, Tabelle 1) und basierend auf den Inhalten von (Hekkert u. a., 2007, S. 421–425; Purkus u. a., 2020, S. 17)..... 28	28
Tabelle 4: Übersicht über die Anzahl TRIGA – Reaktoren weltweit, sowie der Reaktoren, die noch als „operational“ bei der IAEA gemeldet sind, sortiert nach Ländern. Die zugrundeliegenden Daten wurden aus der RRDB der IAEA entnommen (IAEA, 2024a)..... 46	46
Tabelle 5: Übersicht über die weltweiten Industrieakteure mit mindestens einem bei der IAEA gelisteten SMR-Konzept. Die Daten stammen aus der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1). 76	76
Tabelle 6: SMR-Konzepte, die sich im Bau befinden. Die Daten wurden von der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten entnommen, ergänzt aus den Informationen aus den Expert*inneninterviews (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1; OPG, 2024)..... 80	80
Tabelle 7: SMR-Konzepte die bereits im Einsatz sind. Die Daten stammen aus der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1). 81	81
Tabelle 8: Ausgewählte Förderprogramme für SMRs weltweit. Aufgeführt ist das Fördervolumen, der Förderer und ergänzende Informationen. .. 89	89
Tabelle 9: Ergebnisse aus der Expert*inneninterviews des Themenblocks "Herausforderungen für SMRs", kategorisiert nach den Funktionen eines Innovationssystems. Dargestellt sind die in den Interviews genannten Herausforderungen und die dazugehörigen Textstellen. ... 102	102
Tabelle 10: Auswertung der von den befragten Expert*innen genannten Maßnahmen, um die Entwicklungszeit von Kernreaktoren zu verkürzen. 109	109
Tabelle 11: Auswertung der Interviews zu den Stärken etablierter Unternehmen, nach Aussagen der befragten Expert*innen. 119	119
Tabelle 12: Vergleich der Startbedingungen von General Atomics in den 1950er und junger Unternehmen heute, nach Aussagen der befragten Expert*innen. 120	120

Tabelle 13: Uran-Bezeichnungen abhängig vom Anreicherungsgrad. Grundlage für die Tabelle sind (kernenergie.ch, 2024; WNA, 2022).....	CL
Tabelle 14: Beschreibung der wichtigsten Grundarten der Radioaktivität nach (Frey, 2021, S. S. 33 Tabelle 2.4)	CLII
Tabelle 15: Staatliche Akteure mit SMR - Konzepten, welche bei der IAEA gelistet sind.	CLXI
Tabelle 16: Private Akteure mit SMR - Konzepten, welche bei der IAEA gelistet sind.	CLXIII
Tabelle 17: Weitere Akteure mit SMR - Konzepten, welche bei der IAEA gelistet sind.	CLXIV
Tabelle 18: Übersicht über Neubauprojekte von Kernreaktoren zur kommerziellen Stromerzeugung, basierend auf den Daten des IAEA Power Reactor Information System (IAEA, 2024b).	CLXVI

Abkürzungsverzeichnis

BWR	Boiling water reactor, Siedewasserreaktor
CAD	Kanadische Dollar
CEA	Komisariat für Atomenergie und alternative Energien, Frankreich
EPR	European Pressurized Water Reactor
FBR	Fast breeder reactor, Schneller Brüter
F&E	Forschung & Entwicklung
FOAK	First of a kind
GBP	Britische Pfund
GCR	Gas-cooled reactor, gasgekühlter Reaktor
HALEU	High assay low enriched Uranium, leichtangereichertes Uran mit einem U – 235 Gehalt zwischen 5 % und < 20 %
HEU	High enriched Uranium, hochangereichertes Uran ab 20 % U – 235
HTGR	High temperature gas-cooled reactor, Hochtemperatur-gasgekühlter Reaktor
IAEA	International Atomic Energy Agency
LEU	Low enriched Uranium, leichtangereichertes Uran mit bis zu 5 % U –
LWGR	Light water graphite-moderated reactor, grafitmoderierter Siedewasser- Druckröhrenreaktor
Mio.	Million
MMR	Micro-Modular-Reaktor
Mrd.	Milliarde
NEA	Nuclear Energy Agency
OECD	Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
PHWR	Pressurized heavy water reactor, Schwerwasserreaktor
PWR	Pressurized water reactor, Druckwasserreaktor
SMR	Small Modular Reactor
UK	United Kingdom, Vereinigtes Königreich
USA	United States of America, Vereinigte Staaten von Amerika
USD	US – Dollar
U.S. DOE	United States Department of Energy, Amerikanisches Energieministerium
U.S. NRC	United States Nuclear Regulatory Commission, Amerikanische Aufsichtsbehörde

Naturwissenschaftliche Bezeichnungen und Größen

Physikalisch Größen

Einheit	Größe
eV	Energie kinetische Energie eines Elektrons nach Durchlaufen einer Beschleunigerspannung von 1 V
W_e	elektrische Leistung
W_{th}	thermische Leistung

SI-Vorsatzzeichen

Faktor	Vorsatz	Vorsatzzeichen
10^{-3}	milli	m
10^3	Kilo	k
10^6	Mega	M
10^9	Giga	G

Chemische Elemente

C	Kohlenstoff
H	Wasserstoff
O	Sauerstoff
Pu	Plutonium
U	Uran
Zr	Zirkon

Isotope

U – 234	Isotop des Uran mit 92 Protonen und 142 Neutronen im Kern
U – 235	Isotop des Uran mit 92 Protonen und 143 Neutronen im Kern
U – 238	Isotop des Uran mit 92 Protonen und 146 Neutronen im Kern
Pu – 249	Isotop des Plutonium mit 94 Protonen und 155 Neutronen im Kern

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Klimawandel und seine Folgen gelten als eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Immer wieder im Fokus ist die Frage, wie wir auch in Zukunft die benötigte Energie für unsere technologisierte Welt bereitstellen können, ohne dabei weiteres CO₂ in die Atmosphäre abzugeben. Kleine modulare Reaktoren, engl. „Small Modular Reactors“ (SMRs), werden von ihren Befürwortern und Unterstützern als wichtiger Baustein eben jener zuverlässigen und CO₂-armen Energieproduktion gesehen. In den vergangenen Jahren hat sich eine erhebliche Erwartungsdynamik um SMRs entwickelt. Fürsprecher von SMRs sehen diese als Lösung der Probleme der Kernenergie: mit der modularen Bauweise und der seriellen Fabrikfertigung von Komponenten sollen die notwendigen Anfangsinvestitionen deutlich gesenkt werden. Die Bauzeiten von SMRs soll deutlich verkürzt sein und sie sollen vielseitiger einsetzbar sein im Vergleich zu den leistungsstärkeren Kernkraftwerken. Die kleine Leistung und neue Brennelementdesigns sollen längere Zyklen bei den Brennelementen erlauben. Neben den bisher üblichen wassergekühlten Reaktoren wurden neue, sog. Advanced – Reaktor – Designs¹ entworfen oder auf bestehenden Ideen aufgebaut. Ein Beispiel dafür sind gasgekühlte Hochtemperaturreaktoren (HTGR). In dieser Aufbruchstimmung haben sich insbesondere in den USA und Kanada viele neue Firmen gegründet, die mit eigenen SMR – Konzepten an dem vermeintlich aufstrebenden Markt teilhaben wollen. Gleichzeitig haben auch etablierte Akteure der Industrie rund um die Kernenergie SMR – Konzepte vorangetrieben und die Entwicklungsbemühungen verstärkt.

Die Realität zeigt aber auch: Die Umsetzung und kommerzielle Nutzung von SMRs kommt nicht in dem Maße voran, wie sich einige Akteure erhofft haben. Stand 2024 sind lediglich drei SMRs in Betrieb. China sticht besonders heraus,

¹ Die IAEA verwendet für den Begriff „Advanced Reactor“ folgende Definition: “a design of current interest for which substantial improvement over its predecessors and/or commercial power reactor designs have been realized” (SMR RF, 2023, S. 7).

in dem es konsequent die Entwicklungsbemühungen rund um die HTGR – Technologie im SMR – Format vorantreibt. Andere Konzepte, wie der im Bau befindliche CAREM in Argentinien, verzögern sich erheblich und die veranschlagten Baukosten übersteigen die geplanten Kosten bereits um ein Vielfaches. Rückschläge waren 2023 auch bei dem jungen Unternehmen NuScale zu beobachten, welches sein Projekt aufgrund gestiegener Kosten und damit fehlender Rentabilität, noch vor dem Baubeginn abbrach.

Nicht nur fehlende Marktreife oder ökonomische Überlegungen hindern SMRs daran den erhofften Durchbruch zu erreichen. Bereits 2021 konstatieren OECD² und NEA³ in ihrem Bericht zu SMRs aus ihrer Sicht wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Kommerzialisierung: ein weltweiter Absatzmarkt mit harmonisierten Regelungen und gemeinsamen Genehmigungsvoraussetzungen für SMRs. Aus ökonomischen Gesichtspunkten ist es wichtig, dass ein SMR – Reaktortyp so oft wie möglich gebaut wird, um von den Kosteneffekten der Serienproduktion zu profitieren. Weiter wird daraus geschlossen, dass sich im Zuge dessen nur wenige SMR – Designs am Ende durchsetzen werden (OECD & NEA, 2021a, S. 9–11). Kritische Auseinandersetzungen mit dem Thema, wie zum Beispiel in der einer Studie des DIW⁴ aus 2023 kommen zu dem Ergebnis, dass Strom aus Kernenergie nicht wettbewerbsfähig ist gegenüber anderen Energiequellen wie zum Beispiel erneuerbare Energien (Wimmers u.a. 2023, S. 112). Darüber hinaus sei zu erwarten, dass auch SMRs, gemessen an den Erfahrungen aus der Vergangenheit, nicht zu großen Innovationen oder der Verbreitung industriell nicht erprobter Reaktorkonzepte führen werden (Wimmers u.a. 2023b, S. 120).

In diesem Spannungsfeld stellt sich die Frage, wie Politik, internationale Gremien und Industrieakteure SMRs unterstützen können, damit diese sich im Energiemarkt etablieren, sofern dies gewünscht ist. An diesem Punkt setzt die vorliegende Masterarbeit an. In der Diskussion um die Rahmenbedingungen für SMRs werden oftmals die Erfahrungen und Regelungen, die mit den bisher

² Organisation für Wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

³ Nuclear Energy Agency

⁴ Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.

genutzten leicht- und schwerwassergekühlten Leistungsreaktoren gemacht wurden, herangezogen. Unter dem Aspekt der geplanten kommerziellen Nutzung von SMRs zur Strom- oder Wärmeproduktion ist dieser Ansatz nachvollziehbar. SMRs und große Kernkraftwerke teilen sich das Anwendungsgebiet und ökonomische Überlegungen.

Dieser Masterarbeit liegt die These zugrunde, dass sich in Bezug auf SMRs der Blick auf eine weitere Quelle von jahrzehntelanger Betriebserfahrung von Reaktoren lohnt, nämlich den Forschungsreaktoren. Diese Annahme gilt unter anderem für die Erfahrungen im regulatorischen Bereich, aber auch für Gemeinsamkeiten in den Designaspekten der Reaktoren. Für diese Arbeit wird jedoch mit dem Vergleich der Innovationssysteme ein relevanter Vergleichsaspekt dieser Überlegung hinzugefügt. Insbesondere der Aspekt der Serienfertigung von SMRs, sowie die Verbreitung der TRIGA – Forschungsreaktoren mit insgesamt 66 Anlagen, die in der Vergangenheit weltweit gebaut worden sind, bilden den Anknüpfungspunkt dieser Masterarbeit.⁵

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Die Motivation, das Forschungsziel, die methodische Herangehensweise, sowie die Limitationen der Arbeit sind in Kapitel 1 zu finden. Kapitel 2 behandelt den konzeptionellen Hintergrund eines Innovationssystems, sowie die zum Verständnis der Innovationssysteme TRIGA – Forschungsreaktor und SMRs notwendigen Grundlagen. Die Analyse der Funktionen des Innovationssystems TRIGA (Kapitel 3) und der Funktionen des Innovationssystems SMRs (Kapitel 4) dienen als Fundament der durchgeführten Expert*inneninterviews. Deren Durchführung, Ergebnisse und deren Interpretation sind in Kapitel 5 aufgeführt. Die Schlussbetrachtungen, bestehend aus den wichtigsten Ergebnissen der Arbeit, den Implikationen für Entscheidungsträgern, sowie der Betrachtung weiterer Forschungsansätze, stehen in Kapitel 6.

⁵ Seit Mitte der 50er Jahre wurden insgesamt 56 originale TRIGA – Reaktoren gebaut und 10 weitere Forschungsreaktoren anderer Bauart auf TRIGA – Brennstoffe umgerüstet. Diese zählen seit der Umrüstung ebenfalls zu den TRIGA – Reaktoren. Zum Zeitpunkt der Masterarbeit sind noch 37 TRIGA – Reaktoren in Betrieb (IAEA, 2024a)

In dieser Masterarbeit wird sich um eine gendergerechte Darstellung bemüht, weshalb sich für die Verwendung des Gendersternchens (Bsp.: Expert*innen) entschieden wurde.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage

Ziel dieser Masterarbeit ist es das Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktor mit dem Innovationssystem SMRs zu vergleichen. Es soll herausgearbeitet werden, was Politik und Akteure rund um SMRs von TRIGA – Forschungsreaktoren lernen können, um die Verbreitung und einen möglichen Erfolg von SMRs positiv zu beeinflussen. Dabei orientiert sich die Arbeit an den folgenden Forschungsfragen:

- Wo liegen die Erfolgsfaktoren des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktor?
- Wie sind die Funktionen im Innovationssystem SMRs besetzt?
- Wo liegen die Unterschiede und die Gemeinsamkeiten der beiden Innovationssysteme?
- Welchen Herausforderungen steht das Innovationssystem SMRs gegenüber und welche Erfahrungen aus dem Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktoren können zur Unterstützung von SMRs übertragen werden?

Es ist nicht intendiert, in dieser Arbeit technische Aspekte einzelner SMR-Konzepte herauszugreifen und diese mit den technischen Aspekten von TRIGA – Reaktoren zu vergleichen. Technische Beispiele, die in dieser Arbeit verwendet werden, dienen lediglich zur Verdeutlichung von Argumenten und mögen im Detail nicht auf jedes einzelne SMR – Konzept am Markt angewendet werden können.

1.3 Technologische Innovationssystemanalyse ergänzt durch Experteninterviews als methodisch gestützte Vorgehensweise

Die Beantwortung der Forschungsfrage erfolgt durch eine technologische Innovationssystemanalyse beider Innovationssysteme, unterstützt durch Literatuarbeit. Ergänzt wird dieser Ansatz durch Expert*inneninterviews. Im Folgenden werden die gewählten Methoden beschrieben.

1.3.1 Die Methode der technologischen Innovationssystemanalyse

Basierend auf den methodischen Grundlagen einer Innovationssystemanalyse (vgl. Abschnitt 2.1) werden anhand der Literatur die Funktionen des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktor und des Innovationssystems SMRs analysiert. Dafür werden die in der Literatur gefundenen Informationen den jeweiligen Funktionen zugeordnet und bewertet.

Für das Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktor werden mit Hilfe historischer Dokumente, sowie einer systematischen Literaturrecherche die Rahmenbedingungen herausgearbeitet, die zu Beginn der Diffusion der TRIGA – Reaktoren herrschten. Die Basis für die Analyse des Innovationssystems SMRs bildet die vorangegangene Vertiefungsarbeit „Brückentechnologie oder alter Hut - Untersuchung zum Stand von Forschung und Entwicklung für Small Modular Reactors (SMR)“. Die in der Vertiefungsarbeit durchgeführte systematische Literaturrecherche wird um die für diese Masterarbeit benötigten Informationen erweitert.

Die Suchstrategie für die systematische Literaturrecherche basiert dabei zunächst darauf, mit Hilfe erster Schlagworte einen groben Überblick zu schaffen. Dafür werden das Rechercheportal der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, sowie übergreifende Plattformen wie Google Scholar oder Research Gate, genutzt. Verwendete Schlagworte dafür sind „TRIGA“, „TRIGA Research Reactors“, „Atoms for Peace“, „Atoms for Peace – Rede“, „SMRs“, „Small Modular Reactors“, „SMR Reactors“ und ähnliche. Vertiefende Suchen finden

zusätzlich auf den Internetseiten und in den Publikationen der IAEA⁶, der OECD, des U.S. NRC⁷, der Europäischen Kommission, der CEA⁸, sowie Internetseiten der Behörden des Vereinigten Königreichs, Kanada und anderen Ländern und Regierungen statt.

Die Einschlusskriterien für die Auswahl der Literatur umfassen:

1. Sprache: Es werden Veröffentlichungen in deutscher und englischer Sprache einbezogen, um die Verständlichkeit der Literatur zu gewährleisten. In begrenztem Umfang werden auch französischsprachige Internetseiten verwendet.
2. Publikationszeitraum: Für das dem Themengebiet SMRs werden Publikationen berücksichtigt, die zwischen den Jahren 2014 und 2019 veröffentlicht wurden. Literatur, die aus den Jahren 2020 bis 2019 stammt, wird die höchste Relevanz zugesprochen. Publikationen vor 2014 werden nur im Einzelfall verwendet. Für das Themengebiet TRIGA – Reaktoren ist das Alter der Publikation kein Ausschlusskriterium. Für die Beschreibung der Methoden dieser Arbeit wird dem Alter der Publikation wenig Relevanz zugeordnet, stattdessen wird darauf geachtet, ein anerkanntes Standardwerk heranzuziehen.
3. Qualität der Veröffentlichung: Es wird darauf geachtet eine hohe Qualität der verwendeten Quellen sicherzustellen. Maßnahmen dazu sind die Verwendung von wissenschaftlichen Büchern, anerkannte Konferenzbeiträge, Zeitschriftenartikel, die einen Peer-Review-Prozess durchlaufen haben, sowie andere vertrauenswürdige und qualitativ hochwertige Quellen. Dazu gehören staatliche und zwischenstaatliche Organisationen. Für Daten und Beschreibungen zu konkreten Reaktorkonzepten wurden die neuesten Veröffentlichungen der IAEA und Datenbanken der IAEA herangezogen.

⁶ International Atomic Energy Agency

⁷ United States Nuclear Regulatory Commission, Aufsichtsbehörde in den Vereinigten Staaten von Amerika

⁸ Kommissariat für Atomenergie und alternative Energien, Frankreich

1.3.2 Die Methodik der Expert*inneninterviews

Die Expert*inneninterviews wurden als halbstrukturierte, qualitative Interviews mit Hilfe eines Interviewleitfadens als Erhebungsinstrument durchgeführt. Diese Form der Datenerhebung ermöglicht einen besseren Einblick in das hochspezialisierte Gebiet der Kerntechnik als die Verwendung einer quantitativen Methode.

Bei der Auswahl von Expert*innen wurde auf folgende Kriterien Wert gelegt:

- Erfahrungen mit TRIGA – Reaktoren oder Expertise bezüglich SMRs
- Auswahl aus unterschiedlichen Schwerpunkten der Kerntechnik
 - Kraftwerks- oder Forschungsreaktorbau
 - Regulatorisches Umfeld wie Aufsichtsbehörden oder übergeordnete Gremien
 - Forschungsbetrieb
- Mindestens 10 Jahre Berufserfahrung auf dem Gebiet der Kerntechnik

*Tabelle 1: Übersicht über die Teilnehmer der Expert*inneninterviews mit der für die Interviews und Textstellenverweise verwendeten Kennung, sowie einer anonymisierten Darstellung des beruflichen Hintergrunds.*

Expert*innen Kennung	Beruflicher Hintergrund
I-1	Mitarbeiter einer französischen Forschungseinrichtung und in den Bau des neuen Jules – Horowitz – Forschungsreaktors involviert
I-2	Professor für Nukleartechnik an einer renommierten amerikanischen Universität
I-3	Kernchemiker an einer renommierten deutschen Universität mit langjähriger Erfahrung an einem TRIGA – Forschungsreaktor
I-4	Sicherheits- und Genehmigungsmanagerin an einem niederländischen Forschungsreaktor
I-5	Koordinator für F&E Projekte eines renommierten Unternehmens im Reaktorbau

I-6	Mitarbeiter einer slowenischen Behörde für nukleare Sicherheit
I-7	Mitarbeiter einer internationalen Organisation, Tätigkeitsschwerpunkt: Sicherheit von Forschungsreaktoren
I-8	Kernchemiker an einer renommierten deutschen Universität mit langjähriger Erfahrung an einem TRIGA – Forschungsreaktor

Darüber hinaus sind alle Expert*innen in diversen Gremien oder Fachgruppen national und international vernetzt. Außerdem wurde bei der Auswahl der Expert*innen darauf geachtet, dass diese aus verschiedenen Ländern stammen, da SMRs vor allem außerhalb von Deutschland ein großes Thema sind. Eine Person ist aufgrund des Alters zusätzlich in einer Zeitzugfunktion und hat den Bau des TRIGA – Forschungsreaktor an der Universität Mainz als Student miterlebt. Eine anonymisierte Übersicht über die Interviewteilnehmenden ist in Tabelle 1 zusammengestellt.

*Tabelle 2: Transkriptionsregeln für die Expert*inneninterviews.*

Wörtliche Transkription	Die Interviews werden wörtlich transkribiert.
Wort- und Satzabbrüche	Wort- und Satzabbrüche werden nicht festgehalten, sondern geglättet, sofern der Gedanke durch den Interviewpartner*in fertig ausgeführt wurde. Andernfalls wurden Satzabbrüche mit „...“ gekennzeichnet.
Doppelte Wörter	Die doppelte Aussprache von Wörtern wird nur erfasst, wenn sie der Betonung dient.
Verständnissignale, Füllwörter	Wortphrasen wie „OK, ähm, mmh,“ etc., der gerade nicht sprechenden Person werden nicht transkribiert. Füllwörter wie „let's say“ o.ä. werden nicht transkribiert, sofern dadurch der Inhalt des Gesagten nicht verzerrt wird.

Emotionale nonverbale Äußerungen	Emotionale Äußerungen, die für die Verständlichkeit des Gesagten wichtig sind, wie z.B. ein Lachen, das einen Witz kennzeichnet, werden in Klammern und kursiv dargestellt.
Unverständliche Wörter	Wörter, die in der Transkription nicht verständlich sind, werden mit einem „(XXX)“ gekennzeichnet.
Anonymisierung	Alle Namen von genannten Personen werden im Transkript mit „(Name)“ gekennzeichnet. Informelle Informationen, die nicht für die Veröffentlichung gedacht sind, werden entfernt und für die spätere Auswertung nicht verwendet.

Die Erstellung des Leitfadens erfolgte in Anlehnung an Gläser und Laudel (Gläser & Laudel, 2010) und ist in Abschnitt 5.1 beschrieben. Da fünf der interviewten Personen einen internationalen Hintergrund haben, wurde als Interviewsprache Englisch festgelegt, welche auch mit den deutschen Interviewpartner*innen verwendet wurde. Sechs der durchgeführten Interviews fanden via Videokonferenz über das Programm Microsoft Teams statt, zwei Interviews konnten persönlich im direkten Gespräch geführt werden. Alle Interviews wurden über Microsoft Teams aufgezeichnet und transkribiert. Das dabei entstandene Material wurde danach händisch und mit Hilfe der Aufzeichnung auf Richtigkeit überprüft und wo nötig korrigiert. Für die Transkription wurden darüber hinaus die in Tabelle 2 dargestellten Regeln verwendet.

Für die Auswertung der Interviews wurde das Programm MAXQDA verwendet. Die Inhaltsanalyse erfolgte nach dem Vorgehen zur fokussierten Interviewanalyse nach Kuckartz (Kuckartz & Rädiker, 2024). Die Kategorien für die Analyse wurden zunächst deduktiv aus dem Interviewleitfaden abgeleitet und während der Analyse induktiv erweitert, wo Anpassungen notwendig wurden. Für die Grobanalyse wurden die Interviewdokumente jeweils zweimal gelesen und codiert. Anschließend wurden die bereits codierten Abschnitte der Interviews, wenn nötig mit weiteren Subkategorien codiert. Diese Subkategorien wurden induktiv aus den Antworten der Interviewpartner*innen abgeleitet. Das Kategoriensystem ist in Anhang II der Arbeit angefügt.

1.3.3 Limitationen

Für die vorliegende Masterarbeit gilt allgemein zu beachten, dass die Verfügbarkeit von Literatur, Expert*innen und anderen Ressourcen, die verwendet wurden, der Sprachbarriere der Autorin unterliegen. Sprachen die genutzt werden konnten sind vor allem Deutsch, Englisch und mit begrenztem Rahmen auch Französisch. Angebote in anderen Sprachen konnten für die Bearbeitung der Forschungsfrage nicht herangezogen werden.

Das Thema „Kernenergie“ unterliegt einer politischen und gesellschaftlichen Diskussion, die je nach Land, Interessensgruppe oder auch Wissens- und Erfahrungsschatz höchst unterschiedlich bewertet wird. Die Arbeit legt Wert darauf, die Pros und Contras zur Kerntechnik und ihrer Historie zu berücksichtigen und das Thema neutral zu bewerten. Dennoch sind folgende Bias der Quellenlage zu beachten:

1. Eine der Aufgaben der IAEA besteht darin die Verwendung der Kerntechnik weltweit zu fördern. Es ist zu erwarten, dass Publikationen zum Thema SMRs die Chancen, Potentiale (insbesondere der CO₂-neutralen Energiegewinnung) und Entwicklungsgeschwindigkeiten positiver bewerten als andere Akteure. Gleichzeitig hat die IAEA aufgrund ihrer Aufgabe als Überwachungsorgan für den friedlichen und sicheren Betrieb von Reaktoren die umfangreichsten und qualitativ hochwertigsten Daten, Datenbanken und Expertisen auf dem Gebiet der Kernenergie. Diese sind für diese Arbeit unverzichtbar.
2. Aufgrund der Zugänglichkeit, Veröffentlichungspraxis und Sprache bilden westliche und europäische Positionen und Publikationen die Basis dieser Arbeit. Die Positionen, Daten und Veröffentlichungen anderer Länder und Regionen sind in dieser Arbeit daher als unterrepräsentiert einzustufen. Dazu zählen: Russland, China, andere asiatische Länder, afrikanische Länder, arabische Länder.

Bei der Auswahl der Gesprächspartner*innen für die Interviews wurde auf das Netzwerk der Autorin dieser Masterarbeit zurückgegriffen. Dadurch spiegelt die Auswahl der Expert*innen jedoch überwiegend eine europäische Perspektive wider. Teilweise sind die Interviews mit den Expert*innen auch merklich von

deren herkunfts- und berufsspezifischen Kontext geprägt. Wie bei der Literatur müssen daher folgende Regionen und Länder als unterrepräsentiert betrachtet werden: Russland, der asiatische Raum, sowie afrikanische und arabische Länder.

Zuletzt muss der soziokulturelle Hintergrund der Autorin berücksichtigt werden. Dieser ist durch das Aufwachsen in Deutschland geprägt. Die dort vorherrschende Diskussion über die Kernenergie, sowohl in den öffentlichen Medien als auch in den Fachkreisen, ist im Vergleich zu anderen Ländern deutlich zurückhaltender, bzw. negativer dem Thema gegenüber. Ebenfalls gilt zu berücksichtigen, dass die Autorin am TRIGA – Forschungsreaktor der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz angestellt ist und dort Aufgaben am Reaktor wahrnimmt.

2 Begriffliche und konzeptionelle Grundlagen zu den technologischen Innovationssystemen: TRIGA-Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors

In diesem Kapitel werden die Grundlagen gelegt, um die in dieser Arbeit betrachteten Innovationssysteme und die durchgeführten Analysen zu verstehen. Physikalische und technische Grundlagen wurden, soweit möglich, vereinfacht. Auf die Beschreibung der methodisch gestützten Innovationssystemanalyse (Abschnitt 2.1) folgen die Besonderheiten zu TRIGA – Reaktoren (Abschnitt 1.1) einerseits und SMRs (Abschnitt 0) andererseits.

2.1 Technologische Innovationssystemanalyse als konzeptioneller und methodischer Rahmen

Der Begriff des technologischen Innovationssystems wurde erstmals von Carlsson und Stankiewicz geprägt. Technologische Innovationssysteme sind Netzwerke von Akteuren, die miteinander unter spezifischen Rahmenbedingungen in einem idealtypisch abgrenzbaren Industrie- oder Branchenkontext interagieren. Die Akteure sind dabei an der Erzeugung, Diffusion und Verwendung einer spezifischen Technologie oder eines Produkts beteiligt. In technologischen Innovationssystemanalysen liegt der Fokus auf dem Fluss von Wissen und Kompetenz und weniger auf dem Fluss von Gütern oder Dienstleistungen (Carlsson & Stankiewicz, 1995, S. 93).

2.1.1 Funktionen eines Innovationssystems

Die Idee der technologischen Innovationssysteme wurde durch die Arbeiten von Edquist mit der Einführung von Funktionen weiterentwickelt (Köhler u. a., 2020, S. 1). Hekkert et al. bringen 2007 Ordnung in die verschiedenen Ideen und definieren sieben Funktionen, die seither in Arbeiten zum Thema technologische Innovationssysteme aufgegriffen werden. Die Funktionen und ihre Beschreibungen sind in der nachfolgenden Übersicht in Tabelle 3 zusammengestellt. Die englischen Begriffe stammen von Hekkert et al., die deutschen

Übersetzungen sind aus der Arbeit von Purkus et al. entnommen (Hekkert u. a., 2007, S. 421–427; Purkus u. a., 2020, S. 17).

Tabelle 3: Funktionen in technologischen Innovationssystemen und deren Beschreibung. Angelehnt an die Darstellung von (Purkus u. a., 2020, S. 17, Tabelle 1) und basierend auf den Inhalten von (Hekkert u. a., 2007, S. 421–425; Purkus u. a., 2020, S. 17).

Entrepreneurial activities / Unternehmerische Aktivitäten

Unternehmer spielen eine zentrale Rolle in Innovationssystemen, indem sie Risiken aufnehmen und das Potential von neuem Wissen, Netzwerken und Märkten in konkrete Handlungen umsetzen. Die dadurch gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse fließen in das Innovationssystem zurück. Die Funktion kann von etablierten Unternehmen, aber auch neuen Marktteilnehmern, übernommen werden. Etablierte Akteure besetzen dabei oftmals weitere der sechs übrigen Funktionen des Innovationssystems. Unternehmertätigkeiten sind ein wichtiger Indikator für ein Innovationssystem und fehlende Tätigkeiten liegen oftmals in Problemen bei den anderen sechs Funktionen begründet.

Knowledge development / Wissensentstehung

Die Basis eines jeden Innovationssystems bilden F&E und Wissensentwicklung. Lernprozesse bringen die Innovation voran. Sie beinhalten „learning by searching“ und „learning by doing“. Wissen beinhaltet nicht nur Wissen um die Technologie selbst, sondern auch Wissen zum „Zusammenspiel von neuen Technologien und Geschäftsabläufen, regulatorischen Rahmenbedingungen oder dem Nutzerverhalten“ (Purkus u. a., 2020, S. 17) ein.

Knowledge diffusion / Wissensverbreitung

Netzwerke dienen dem Wissensaustausch, der im Kontext mit Innovationssystemen wichtig ist, damit politische Entscheidungen auf Basis neuester Erkenntnisse getroffen werden können und umgekehrt F&E geltende oder sich verändernde Normen und Werten berücksichtigen können. Akteure in diesem Netzwerk sind u. a. Forschende, Marktakteure, Verwaltungen, Politik und Zivilgesellschaft.

Guidance of the search / Suchrichtung

Die Suchrichtung repräsentiert den gesellschaftlichen Prozess der Technologiewahl, der unter dem Eindruck knapper Ressourcen stattfindet und auswählt, welche Technologien weiterverfolgt werden sollen.

Einflüsse auf den Prozess ergeben sich u.a. aus politischer Rahmensetzung, Nutzerbedürfnisse und Technologieproduzenten. Die Suchrichtung wird durch die Erwartungen der Akteure getrieben, während sie die Erwartungen gleichzeitig beeinflusst.

Market formation / Marktentstehung

Neue Innovationen stehen in Konkurrenz zu bestehenden Technologien und Märkten. Dies erfordert die Schaffung eines geschützten Marktes, an dem neue Innovationen erprobt und wachsen können. Dies kann durch temporäre Wettbewerbsvorteile (z. B. Subventionen oder Steuervorteile), oder die Bildung von

Nischenmärkten realisiert werden. In dieser Phase müssen zusätzlich positive Erwartungen an die Technologie ausgebildet werden. Es folgt die Phase der Brückenmärkte, in der die Diffusion der Technologie sowie die Zahl der Akteure erhöht wird, bis unter passenden Bedingungen ein Massenmarkt entsteht.

Mobilization of resources / Ressourcenmobilisierung

Finanzmittel sowie Humankapital sind wichtige Ressourcen in einem Innovationssystem. Wie gut diese mobilisiert werden können, beschreibt die Funktion der Ressourcenmobilisierung. Dabei beinhaltet sie auch ergänzende Strukturen, wie zum Beispiel Dienstleistungen, die die Technologie weiter unterstützen.

Creation of legitimacy / Legitimität

Legitimität beschreibt die gesellschaftliche Akzeptanz von Innovationen sowie ihre Kompatibilität mit bestehenden institutionellen Rahmenbedingung. Aufstieg und Wachstum von unterstützenden Interessengruppen und deren Lobbyarbeit spielen eine wichtige Rolle, um eine Innovation in der Gesellschaft zu etablieren und positive Erwartungen zu wecken.

Durch eine Analyse der Funktionen eines technologischen Innovationssystems können unterstützende und blockierende Faktoren erkannt und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden (Köhler u. a., 2020, S. 1, Spalte 2). Dafür werden die Aktivitäten von Akteuren untersucht, um so die Veränderungen im System abzubilden (Hekkert u. a., 2007, S. 418)

Insbesondere für die Innovationssystemanalyse SMRs sollen zudem die drei Thesen berücksichtigt werden, die eine dem Fraunhoferinstitut zugehörige Autorengruppe um Koschatzky 2016 aufgestellt hat (Koschatzky u. a., 2016, S. 2 f.). Diese Thesen lauten wie folgt:

1. *Klassische Innovationssysteme und die Politik berücksichtigen neue Akteure und Organisationen zu wenig, da diese in einer klassischen technologischen Innovationssystemanalyse in den Akteuren und Funktionen unzureichend abgebildet werden können.*
 - Zunahme der Bedeutung von zivilgesellschaftlichen Gruppen, die direkt oder indirekt Einfluss auf das Innovationsgeschehen haben.
 - Zunahme der Bedeutung von Philanthropen (Privatpersonen oder Unternehmen).

- Organisation der Akteure oftmals informell und wird durch eine auf formale Organisationen ausgerichtete Politik ungenügend eingebunden.
2. *Akteure können nicht mehr klar einer Funktion im Innovationssystem zugeordnet werden, was innovationspolitische Gestaltungen erschwert.*
- Akteure nehmen mehrere Rollen in einem Innovationssystem wahr (Bsp.: Abnehmer, die selbst zur Wissensgeneration beitragen).
 - Crowdfunding, welches in der Finanzierung von Innovationen eine Rolle spielen kann.
3. *Radikale Innovationen entstehen in Nischen, mit national und internationalen Akteuren.*
- Fördermaßnahmen müssen auch die internationale Dimension berücksichtigen und Öffnungsprozesse in Nischen unterstützen.
 - Erstickungsgefahr für neue Technologien durch Regularien, die auf bestehenden Technologien ausgerichtet sind.

Für die Relevanz der Thesen für das Innovationssystem SMRs können folgende Beispiele angeführt werden: Hinter der kanadischen SMR-Roadmap⁹ steht ein Lenkungsausschuss aus einer Gruppe von kanadischen Provinzregierungen, Territorialregierungen und Energieversorgungsunternehmen, die das Potenzial der Entwicklung, Demonstration und Einführung von Kernreaktoren in Kanada untersuchen (Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018 Vorwort). Auch werden im Innovationssystem Kerntechnik im allgemeinen Funktionen mehrfach besetzt. So übernimmt der Staat in für das Innovationssystem wichtigen Ländern nicht nur eine Akteursrolle in der Wissensentstehung in Form von Universitäten oder staatlichen Forschungsinstitutionen, sondern führt auch unternehmerische Funktionen in Form von Staatsunternehmen aus. Staaten beeinflussen zudem die Suchrichtung durch Förderprogramme, Aufsichtstätigkeiten und Prägung der Legitimation. SMRs sind vor allem Nischenprodukte und müssen daher auf

⁹ Zu finden unter www.smrroadmap.ca

einen internationalen Markt setzen, um die benötigten Produktionszahlen zu erreichen. Sie werden auch für die Erprobung bisher nicht erprobter Technologien genutzt, wodurch Anpassungen in den bestehenden Regelwerken notwendig werden. Diese Thematik findet sich auch in der Auswertung der Expert*inneninterviews wieder (vgl. Kapitel 5.2 und Kapitel 5)

2.1.1 Motoren eines Innovationssystems

Das Modell der Motoren eines Innovationssystems wird genutzt, um zu beschreiben, wie ein Innovationssystem positiv beeinflusst werden kann. Köhler et al. merken jedoch an, dass in der Literatur rund um die technologische Innovationssystemanalyse eine tieferen Betrachtung der Motoren mit Ausnahme der Arbeit von Walrave und Raven ausbleibt (Köhler u. a., 2020, S. 2, Spalte 1). Walrave und Raven identifizieren und testen in ihrer Arbeit vier Motoren, die ein Innovationssystem voranbringen oder blockieren können:

1. Wissenschafts- und Technikmotor:

Schlüsselfunktionen: Wissensentwicklung, Wissensverbreitung, Suchrichtung und Ressourcenmobilisierung.

Anfängliche Versuchsprojekte und unternehmerische Tätigkeiten im Innovationssystem sind durch die Wissensproduktion und -verbreitung geprägt. Bestätigten die daraus resultierenden Ergebnisse die Erwartungen, treiben diese die politische und finanzielle Unterstützung voran. Werden die Ergebnisse aus den Projekten jedoch als negativ empfunden, verringern diese die Unterstützung (Walrave & Raven, 2016, S. 1834 f.).

2. Unternehmensmotor:

Schlüsselfunktionen: Ähneln dem Wissenschafts- und Technikmotor, sind jedoch zusätzlich durch die Funktionen Unternehmerische Aktivitäten und Schaffung von Legitimität geprägt.

Die Unternehmerische Aktivitäten im Innovationssystem nehmen zu, wodurch die Legitimität der Technologie in Augen von Geldgebern und Politik erhöht wird. Dadurch können Unternehmen vorübergehende externe Ressourcen mobilisieren. Durch Aktivitäten in Nischenmärkten können jedoch auch erste finanzielle Ressourcen innerhalb des Innovationssystem generiert werden, die dann wieder in die Wissensentwicklung zurückfließen können (Walrave & Raven, 2016, S. 1835).

3. Systembildungsmotor:

Schlüsselfunktionen: Marktentstehung, andere Funktionen auch relevant.

Der Systembildungsmotor beschreibt eine Dynamik des Innovationssystems, in dem sich die Akteure zunehmend in Netzwerken organisieren und infrastrukturelle Entwicklungen voranschreiten. Auch die Art der Akteure erweitert sich, so kann es zum Beispiel zu Gründungen von Nutzergemeinschaften kommen und Regulierungsvorschriften werden neugestaltet. Diese Phase wird als besonders herausfordernd beschrieben, da der Ressourcenbedarf hoch ist, diese aber noch nicht vollständig aus dem Innovationssystem selbst heraus generiert werden können (Walrave & Raven, 2016, S. 1835).

4. Marktmotor:

Schlüsselfunktionen: alle Funktionen, Schaffung von Legitimität weniger kritisch.

Der Marktmotor ist durch eine erhebliche Nachfrage gekennzeichnet, die ausreicht, um die notwendigen Prozesse des Innovationssystems aufrecht zu erhalten. Das Innovationssystem selbst wird befürwortet, die soziale und politische Unterstützung ist institutionalisiert, die Legitimität wird nicht mehr in Frage gestellt (Walrave & Raven, 2016, S. 1835).

Der Ansatz der technologischen Innovationssystemanalyse in seinen Betrachtungen ist jedoch limitiert. So bietet es nur begrenzt ein konzeptionelles Verständnis dafür, wie das entstehende Innovationssystem mit seinem breiten Umfeld, wie zum Beispiel konkurrierenden Märkten, agiert (Walrave & Raven, 2016, S. 1835).

2.2 Grundlagen für die technologische Innovationssystemanalyse zu TRIGA-Forschungsreaktoren

Im Folgenden werden die Grundlagen gelegt, die benötigt werden, um die Diffusion von TRIGA-Forschungsreaktoren nachvollziehen zu können. Abschnitt 2.2.1 behandelt die historische Dimension, bestehend aus wichtigen wissenschaftlichen Entdeckungen rund um die Kernspaltung, sowie den zentralen politischen Ereignissen. Abschnitt 2.2.2 gibt ein Überblick über wichtige technische Designaspekte der TRIGA – Reaktoren selbst.

2.2.1 Relevante historische Grundlagen zur Entwicklung und Diffusion von TRIGA-Forschungsreaktoren

Die Entdeckung der Kernspaltung bildet die Grundlage für kerntechnischen Technologien. Den Grundstein für ihre Entdeckung legte Henri Becquerel 1896 mit der Entdeckung der Radioaktivität (vgl. Zeitstrahl in Abbildung 1), wie Wohlfarth in seinem Werk „40 Jahre Kernspaltung“ konstatiert. So fand Henri Becquerel heraus, dass Uransalze in der Lage waren eine Fotoplatte zu schwärzen, ohne dass diese mit Licht in Berührung gekommen war (Wohlfarth, 1979, S. 1). Es folgten die Entdeckung der a- und b-Strahlung durch Ernest Rutherford 1899, der das Uransalz weiter untersuchte. Weitere zehn Jahre später folgte die Erklärung worum es sich bei der entdeckten a-Strahlung handelt, nämlich einem Helium-Kern (Wohlfarth, 1979, S. 2 f.). Mit dem Bohr'sche Atommodell, begründete Niels Bohr 1913 die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, denen das Atom unterliegt (Wohlfarth, 1979, S. 3). Im Jahr 1919 gelang Ernest Rutherford die erste künstliche Kernumwandlung. Er bestrahlte Stickstoff mit a-Teilchen, was Sauerstoff und hochenergetische Wasserstoffkerne

zum Ergebnis hatte (Wohlfarth, 1979, S. 4 f.).

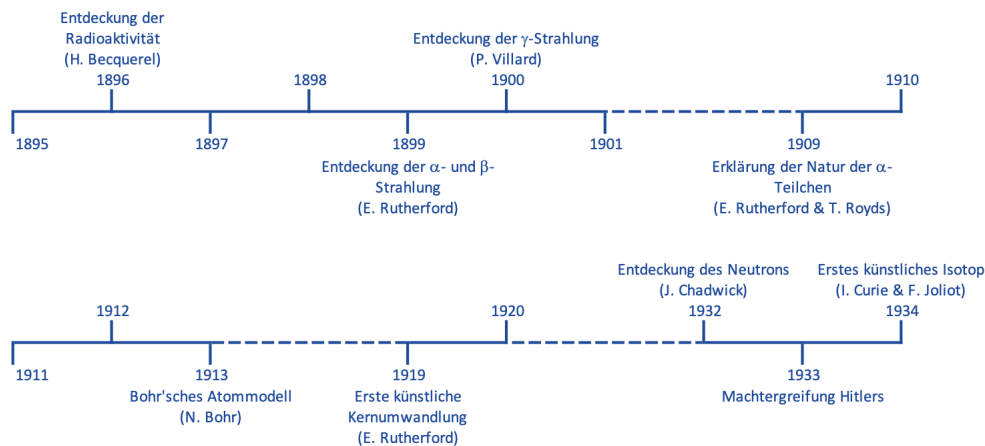


Abbildung 1: Zeitstrahl von 1895 bis 1934 für die wichtigsten wissenschaftlichen Entdeckungen, die zur Entdeckung der Kernspaltung führten, sowie weitere wichtige historische Zeitmarken.

Der nächste große Entwicklungssprung war die Entdeckung des Neutrons durch James Chadwick. Diese lieferte einen essenziellen Baustein zum Verständnis des Atomkerns. Unabhängig voneinander schlugen auf der Basis dieser Entdeckung die beiden Wissenschaftler Werner Heisenberg und Dmitri Iwanenko das noch heute gültige Atommodell vor, nachdem Atomkerne aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt sind. Der Atomkern wird von einer Hülle aus Elektronen in Anzahl der Protonen im Kern umgeben, so dass ein Atom nach außen hin elektrisch neutral geladen ist (Wohlfarth, 1979, S. S. 5 f.). Es folgte 1934 das erste künstliche Isotop, hergestellt von Irène Curie und Frédéric Joliot. Die Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn und Fritz Straßmann im Dezember 1938, sowie deren physikalischen Erklärung durch Lise Meitner¹⁰ und Otto Frisch im Januar 1939 (Wohlfarth, 1979, S. 16–22) fällt historisch gesehen in eine weltpolitisch turbulente Zeit. Nach der Machtergreifung Hitlers 1933 überfiel Deutschland am 01.09.1939 Polen und setzte damit den Startpunkt für den zweiten Weltkrieg (Müller, 2015, S. 10). Wissenschaftler wie Flügge beschäftigten sich früh mit der Frage, ob die neu entdeckte Kernspaltung technisch nutzbar gemacht werden kann (Flügge, 1979). Der

¹⁰ Otto Hahn, Fritz Straßmann und Lise Meitner arbeiteten am Kaiser-Wilhelm-Institut über Jahre hinweg eng zusammen. Aufgrund ihrer jüdischen Wurzeln war Lise Meitner jedoch gezwungen Deutschland zu verlassen. Hahn und Straßmann unterrichteten Meitner über ihre Entdeckungen via Briefkontakt (Wohlfarth, 1979, S. 13–17).

Wissenschaftler Dyson schreibt in seiner Biographie jedoch auch von einer Sorge in der Fachwelt vor der militärischen Nutzung des Potentials der Kernspaltung (Dyson, 1979, S. 94).

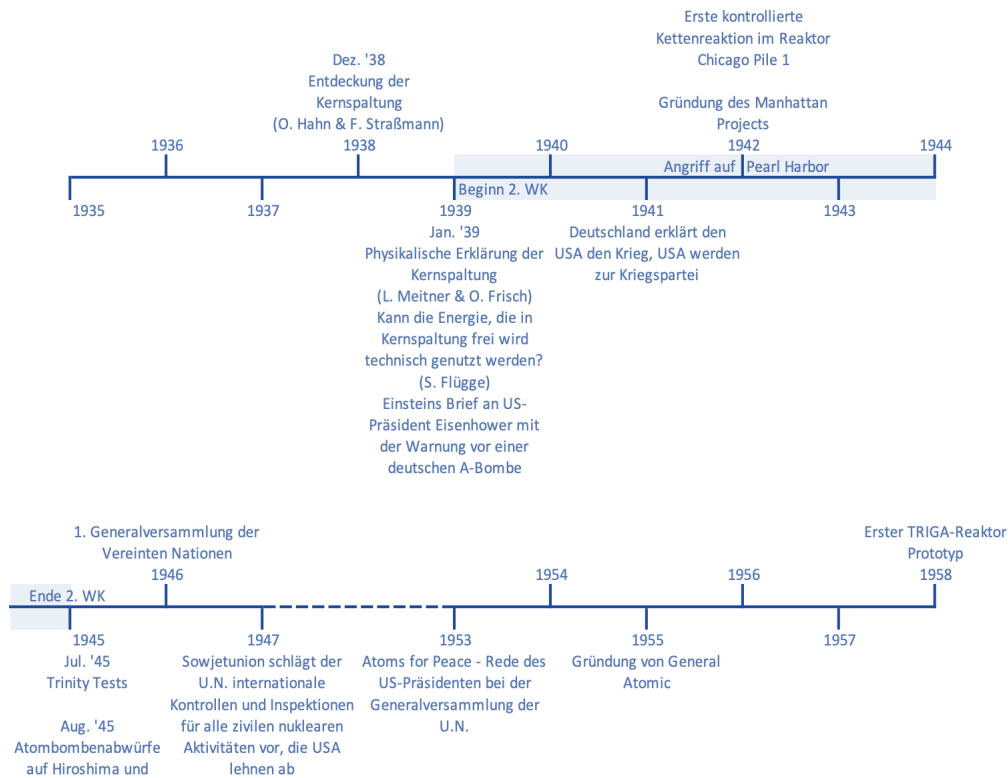


Abbildung 2: Zeitstrahl von 1935 bis 1958 für die Entdeckung der Kernspaltung, sowie die daraus folgende kerntechnische Nutzung, bis hin zum ersten TRIGA – Reaktor. Die Angaben sind ergänzt durch die wichtigsten historischen Zeitmarken.

Angesichts des zweiten Weltkriegs entwickelte sich die technische Nutzung der Kernenergie zunächst in Richtung jener befürchteten militärischen Zwecke (vgl. Zeitstrahl in Abbildung 2). Als Teilschritte dieser Entwicklung müssen folgende Ereignisse gesehen werden:

1. Ein Brief Albert Einsteins an den damaligen US-Präsidenten Franklin Roosevelt im August 1939, einen Monat bevor der Krieg in Europa

2. ausbricht, in dem er die Sorge vor einer deutschen Atombombe ausdrückte (Craig & Jungerman, 1986, S. 10).
3. Der Angriff Japans auf Pearl Harbor 1942 und der Eintritt der USA in den Zweiten Weltkrieg (Müller, 2015, S. 113).
4. Die Gründung des Manhattan Projekts im Jahr 1942 mit dem Ziel der Entwicklung einer Atombombe (Craig & Jungerman, 1986, S. 11).
5. Der erste Kernreaktor der Welt, welcher in Chicago unter der Tribüne eines Sportstadions 1942 in Betrieb genommen wird. Anwendungszweck der zur damaligen Zeit entwickelten Kernreaktoren war die Produktion von Plutonium für die Verwendung in Atombomben (Craig & Jungerman, 1986, S. 12 f.)

Die Entwicklungen gipfelten vorerst in den Abwürfen von amerikanischen Atombomben auf die japanischen Städte Hiroshima und Nagasaki im August 1945 (Craig & Jungerman, 1986, S. 10–15). Bei diesen beiden Angriffen verstarben nach Schätzungen zwischen 70.000 – 246.000 Personen direkt durch den Abwurf der Bomben und in den ersten Monaten danach¹¹ (bfs, 2023; Gaulkin, 2020). Überlebende und ihre nachfolgenden Generationen leiden zum Teil heute noch unter den Spätfolgen der Strahlenexposition (bfs, 2023).

Technologien, die die Potenziale der Kernspaltung nutzen, waren in den ersten Jahren nach dem zweiten Weltkrieg durch das Monopol der USA geprägt. Die Sowjetunion begann ebenfalls die Entwicklung einer Atombombe, was in einem Wettrüsten mit den USA endete. Erste Vorschläge der Sowjetunion zu einer kontrollierten Freigabe von Material zur zivilen Nutzung wurden 1947 von den USA noch abgelehnt (Craig & Jungerman, 1986, S. 21). Der Umbruch erfolgte erst durch die „Atoms for Peace“ – Rede des US-amerikanischen Präsidenten Eisenhower vor der Generalversammlung der Vereinten Nationen im Jahre 1953. Auszüge der Rede sind im Anhang III zusammengestellt. Ziel war es, unter dem „Atoms for Peace“ – Programm, spaltbares Material aus

¹¹ Die Frage nach den Toten durch die Atombombenabwürfe ist nicht einfach zu beantworten, wie vergangene Bemühungen dazu zeigen. Insbesondere die Frage nach dem Zeitpunkt, wann die Toten betrachtet werden, ist entscheidend. Viele Opfer waren einer sehr starken Strahlenbelastung ausgesetzt, die noch Wochen und Monate nach dem eigentlichen Ereignis zum Tod führte. Für weiterführende Informationen sind die Themenseite des Bundesamts für Strahlenschutz (bfs, 2023), das seine Zahlen aus Japan bezieht, sowie der zitierte Artikel von Gaulkin (Gaulkin, 2020) der die Problematik der Zählung der Toten beleuchtet, zu empfehlen.

militärischen Beständen einer internationalen Organisation zu übergeben. Nationen, die an einer friedlichen Nutzung des spaltbaren Materials interessiert waren, wurde der Zugang dazu gewährt. Bedingung war jedoch, dass diese Staaten unter Aufsicht, der im weiteren Verlauf gegründeten, IAEA¹² standen (Craig & Jungerman, 1986, S. 28).

Durch die „Atoms for Peace“ – Rede, und den damit verbundenen Auftakt für die Entwicklungen rund um die zivile Nutzung der Kerntechnik, trafen sich im August 1955 bei der 1. Genfer Atomkonferenz (International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy) erstmals Wissenschaftler verschiedener Nationen, um das Thema der zivilen Nutzung der Kerntechnik zu diskutieren.

Die Gründung von General Atomics ist eine Folge jener Konferenz. Einer der Organisatoren, der Physiker Frederic de Hoffmann, erkannte die Chancen der Zeit und überzeugte noch im selben Jahr seinen damaligen Arbeitgeber General Dynamics Corporation¹³ eine Unterabteilung für die Entwicklung von kommerziellen Reaktoren zu gründen. Es folgte ein Sommersymposium, zu dem sich Wissenschaftler und Ingenieure mangels anderer Infrastruktur in einem leerstehenden Schulhaus trafen und die Entwicklung der Reaktoren für General Atomics aufnahmen (Dyson, 1979, S. 96; General Atomics, o.J.). Ergebnisse waren das Konzept des TRIGA Reaktors, sowie der charakteristische TRIGA-Brennstoff. Wichtiges Designmerkmal war die inhärente Sicherheit des Reaktors. Es folgte 1958 die Errichtung des Prototyps TRIGA Mark I in San Diego (Dyson, 1979, S. 101). Der kommerzielle Vertrieb startete bereits im selben Jahr, mit der Vorstellung eines zweiten, funktionstüchtigen TRIGA – Reaktors. Dieser wurde für die breite Öffentlichkeit auf der zweiten Genfer Atomkonferenz ausgestellt (General Atomics, o.J.).

¹² Die IAEA wurde 29.07.1957 als ein Organ der Vereinten Nationen gegründet.

¹³ Das Geschäftsmodell von General Dynamics ist der Verkauf von Rüstungsgütern (General Dynamics, o.J.)

2.2.2 Technische Grundlagen zu TRIGA-Forschungsreaktoren und ihren innovativen Designmerkmalen

Bei einer Innovationssystemanalyse geht es vor allem um die Akteure des Systems, sowie deren Handlungen und weniger um die technischen Aspekte der Innovation selbst. Dennoch ist es unerlässlich, in diesem Abschnitt die für das Verständnis der Diffusion der TRIGA – Reaktoren wichtigen technischen Aspekte kurz vorzustellen. Weitergehende Informationen zu TRIGA – Reaktoren sind in dem IAEA – Dokument „History, Development and Future of TRIGA Research Reactors“ zu finden (IAEA, 2016a).

Insgesamt wurden von General Atomics über die Jahre sechs Reaktordesigns entwickelt (IAEA, 2016a, S. 19). Bei allen Designs handelt es sich um sogenannte Poolreaktoren, d.h. sie besitzen einen offenen Reaktortank. Außerdem werden alle mit Leichtwasser gekühlt. Eine Übersicht der unterschiedlichen Designs mit den wichtigsten Eckpunkten ist in Abbildung 3 zu finden.

TRIGA Reaktoren				
Basis-Design-Features: Offener Pool-Reaktor, leichtwasser-moderiert, homogener $UZrH_x$ - Moderator-Brennstoff				
TRIGA Mark I	TRIGA Mark II	TRIGA Mark III	TRIGA ACPR	High-Power TRIGA Design
Erstes TRIGA Design	Verbessertes Design für Bestrahlungen	Kern ist bewegbar und kann im Tank in unterschiedliche Positionen gebracht werden	ACPR = Annular Core Pulsed Reactor)	Multipurpose Reactor (MPR)
Kern unterhalb des Bodens	Kern oberhalb des Bodens	Größeres Tankdesign aufgrund des beweglichen Tanks	Ebenfalls stark auf die Pulsfunktion ausgerichtet, neues Core-Design	TRIGA-Design mit der größten Leistung > 5 MW, daher nicht mehr pulsbar
Kühlung: natürliche Konvektion des Wassers bis 2 MW Leistung	Kühlung: natürliche Konvektion des Wassers bis 2 MW Leistung	Größeres Tankdesign aufgrund des beweglichen Tanks	Ausgelegt für Materialtests bei hoher Leistung mit Bestrahlungsposition für Tests von Brennelementen für Leistungsreaktoren	Kompakteres Kerndesign, um die Leistung auch mit TRIGA-Brennelementen zu erreichen
Pulsfunktion	Pulsfunktion	Pulsfunktion		Quadratisches Kerndesign, quadratische Anordnung der BE
Bestrahlungspositionen: - Rohrpost - Zentrales Bestrahlungsrohr	Bestrahlungspositionen: - Rohrpost - Zentrales Bestrahlungsrohr - 4 Strahlrohre - Thermische Säule - Großbestrahlungseinrichtung	Höhere Leistung als TRIGA Mark I und II		Aktive Kühlung notwendig
		TRIGA Mark F		
		Pulsfunktion steht im Vordergrund		
		Schmale Pulse mit hoher Leistung		

Abbildung 3: Übersicht über die unterschiedlichen Typen von TRIGA Reaktoren. Die zugrundeliegenden Informationen sind entnommen aus (Fouquet u. a., 2003, S. 50–53; IAEA, 2016a, S. 19–34)

Die entscheidende Innovation für den Erfolg von TRIGA – Reaktoren ist der charakteristische und in allen TRIGA – Reaktoren verwendete Brennstoff aus Uran-Zirkonium-Hydrid (UZrH_x). Der Brennstoff ist das Entwicklungsergebnis der von Edward Teller herausgegebenen Grundidee eines „Safe Reactors“. Designziel war ein Reaktor, der so sicher ist, dass er einer Gruppe von High-school-Schülern gegeben werden könne, ohne dass man sich Sorgen machen müsse, dass sie Schaden nähmen (Dyson, 1979, S. 97). Edward Teller zog dabei für das Reaktordesign eine Sicherheit, basierend auf der Physik des Reaktors, der Sicherheit durch technischen Lösungen vor (Dyson, 1979, S. 98). Physikalische Grundlage für die inhärente Sicherheit des Brennstoffs Uran-Zirkonium-Hydrid (UZrH_x) ist das sogenannte „Warm Neutron Principle“, welches im Folgenden kurz erläutert werden soll.

Warm Neutron Principle

Beim Betrieb eines Reaktors ist es unerlässlich, dass die Spaltung des Kernbrennstoffs (meistens U-235) kontrolliert abläuft. Die bei der Kernspaltung freiwerdenden Neutronen sind für eine erneute Spaltung zunächst zu energiereich (mehrere MeV) und müssen moderiert, das heißt auf die benötigte Energie zur Spaltung eines weiteren U-235 Kerns abgebremst werden. Diese Energie beträgt von ca. 25 meV. Dieser Vorgang erfolgt, indem die Neutronen ihre Energie durch Stöße an einen Stoßpartner abgeben, der diese aufnimmt. In vielen Reaktoren erfolgt die Moderation an Wasserstoffatomen im Kühlwasser, welches den Reaktorkern umgibt. Bei TRIGA – Reaktoren findet die Moderation sowohl im Brennelement selbst als auch im Kühlwasser statt. Das Brennelement besteht aus einer Moderator-Brennstoff-Matrix (Taylor u. a., 1964, S. 99). In dieser Matrix befindet sich das angereicherte Uran als Brennstoff, sowie das Moderator material aus Zirkon (Zr) und Wasserstoff (H) in einer ZrH_x – Gittermatrix. Dieser Aufbau ist schematisch in Abbildung 4 dargestellt.

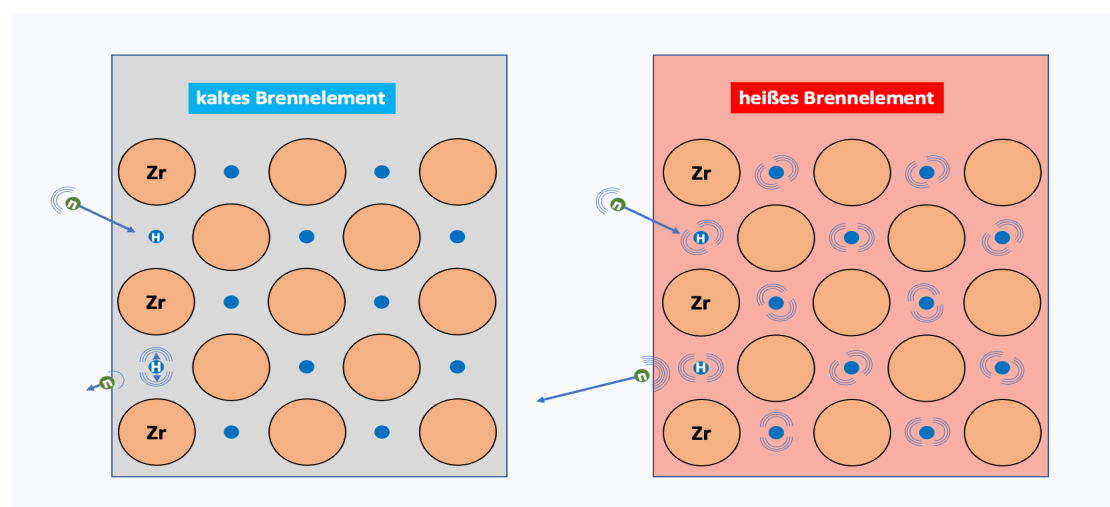


Abbildung 4: Funktionsweise des Warm-Neutron-Principle der TRIGA-Brennelemente. Befindet sich das Brennelement in einem kalten Zustand, werden die Neutronen durch die kalten Wasserstoffatome des ZrH -Gitters moderiert. Die Energie der Neutronen kann an die Wasserstoffatome abgegeben werden. Bei heißen Brennelementen sinkt die Moderationsfähigkeit der Wasserstoffatome, da diese sich selbst bereits in einem energiereichen Zustand befinden. Die Neutronen können ihre Energie an die Wasserstoffatome nicht mehr abgeben, eine Spaltung von U-235 kann durch die energiereichen Neutronen nicht ausgelöst werden. Abbildung übernommen aus (Geppert, 2023).

Die Wasserstoffatome verhalten sich in der ZrH_x – Gitterstruktur wie freie Oszillatoren mit konkreten Energieniveaus. In einer kalten Gitterstruktur heben

Wechselwirkungen der Neutronen mit den Wasserstoffatomen diese auf ein höheres Energieniveau an. Damit können die Neutronen bis zu einer Energie von ca. 130 meV abgebremst werden. Die restliche Moderation der Neutronen auf die benötigte Energie von ca. 25 meV findet im Tankwasser statt.

Ein Leistungsanstieg im Reaktor führt zu einer steigenden Temperatur des Brennelements, wodurch die Oszillationsenergie des Wasserstoffs zunimmt. Dadurch sinkt jedoch dessen die Moderationsfähigkeit: Die Wasserstoffatome besetzen im Oszillatorbild bereits sehr hohe Energieniveaus durch die Wärme, die Wahrscheinlichkeit für einen Energietransfer von Neutronen auf die Wasserstoffatome nimmt stark ab. Die Brennstoffmatrix kann die Energie der

eintreffenden Neutronen nicht mehr aufnehmen. Dies führt innerhalb weniger Millisekunden zum Einbruch der Kettenreaktion und infolgedessen der Reaktorleistung (Dyson, 1979, S. 99; Taylor u. a., 1964, Sp. 4, 10 f., 12 ff.).

Die oben beschriebene Eigenschaft des TRIGA-Brennelements, der inhärenten Sicherheit gegenüber ungewollter Leistungsexkursionen, wird für einen speziellen Betriebsmodus von TRIGA – Reaktoren genutzt: Sie können gepulst betrieben werden, sofern ihre Leistung maximal 3 MW_{th} ¹⁴ im Dauerbetrieb beträgt. Im Pulsbetrieb wird die Leistung des Reaktors, für einen kurzen Zeitraum von wenigen Millisekunden, um ein Vielfaches erhöht. So erreicht der TRIGA – Reaktor Mainz im Pulsbetrieb bis zu $250 \text{ MW}_{\text{th}}$ für 30 ms, bei einer möglichen Leistung von $100 \text{ kW}_{\text{th}}$ im Dauerbetrieb (Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, 2024). Dafür wird der Reaktor zunächst in einem stabilen Gleichgewicht, d.h. bei einem effektiven Neutronenmultiplikationsfaktor von $1,0^{15}$ bei niedriger Leistung betrieben. Nachfolgend wird mit Hilfe von Druckluft einer der neutronenabsorbierenden Kontrollstäbe sehr rasch aus seiner Position ‚geschossen‘ und der Reaktor in einen prompt überkritischen Zustand gebracht. Durch den daraus resultierenden Leistungsanstieg erwärmt sich das Brennelement, die Moderationsfähigkeit sinkt wie oben beschrieben ab und die Kettenreaktion bricht zusammen (Eberhardt, o.J.)

Die Pulsfähigkeit des TRIGA – Reaktors ist ein direkter Beweis seiner inhärenten Sicherheit gegenüber einer unkontrollierten Leistungsexkursion. Die Betriebstemperatur, und damit auch die maximale Leistung des Reaktors, ist jedoch durch diese Eigenschaft eingeschränkt. So eignen sich TRIGA-Brennelemente nicht für die Verwendung in Leistungsreaktoren zur Erzeugung von Wasserdampf zur Stromproduktion mit einer Turbine.

¹⁴ Die Leistung von TRIGA - Reaktoren wird durch die maximale Leistung im Dauerbetrieb charakterisiert.

¹⁵ Ein Neutronenmultiplikationsfaktor von 1,0 bedeutet, dass Neutronen, die bei einer Kernspaltung frei werden genau eine weitere Kernspaltung auslösen. Überschüssige Neutronen müssen durch Neutronenabsorber (Steuerstäbe) im Kern abgefangen werden.

2.2.3 Anwendungsfelder und Verbreitung der TRIGA-Forschungsreaktoren

Die von General Atomics für den TRIGA – Reaktor vorgesehenen Anwendungen sind bereits im Namen des Reaktors wiederzufinden. TRIGA ist ein Akronym und steht für ‚*Training, Research und Isotope (Production)*‘ sowie dem Hersteller ‚*General Atomics*‘ (General Atomics, o.J.). Im Laufe der Zeit haben sich viele Anwendungen an TRIGA – Reaktoren etabliert, die vor allem abhängig von der jeweiligen Leistung und Bestrahlungspositionen des betreffenden TRIGA – Reaktors sind. Nicht alle Anwendungen sind an jedem TRIGA – Reaktor durchführbar. Eine Zusammenstellung von Beispielen ist in dem Dokument der IAEA nachzulesen, ein breiter Überblick daraus wurde in Abbildung 5 zusammengestellt.

<u>Anwendungsbeispiele für TRIGA-Forschungsreaktoren</u>			
Training	Research	Isotope	Sonstige
Ausbildung und Schulung von <ul style="list-style-type: none"> - Studierenden - Reaktoroperatoren - Fachpersonen auf dem Gebiet der Reaktortechnik Ausbildung von Personen im Strahlenschutz	Grundlagenforschung, vor allem auf den Gebieten der Physik und Chemie Angewandte Forschung <ul style="list-style-type: none"> - Neutronenaktivierungsanalyse - Materialtests - Neutronenradiographie 	Isotopenproduktion für unterschiedliche Anwendungszwecke <ul style="list-style-type: none"> - Tracer - Kurzlebige Isotope - Isotope für die Ausbildung von Studierenden - Medizinische Zwecke (in limitiertem Rahmen) 	Kommerzielle Bestrahlungen von Edelsteinen Borneutroneneinfangtherapie (BNCT)

Abbildung 5: Anwendungsbeispiele für TRIGA-Forschungsreaktoren, zusammengestellt aus den Informationen aus (IAEA, 2016a, S. 49–59).

Es ist jedoch anzumerken, dass die IAEA in ihrer Untersuchung von 2016 für viele der verbliebenen TRIGA – Reaktoren eine nicht ausreichende Auslastung attestiert hat und wie in Abbildung 6 auf der nächsten Seite gezeigt wird. So werden weltweit 11 TRIGA – Reaktoren weniger als vier effektive Wochen pro Jahr bedient.

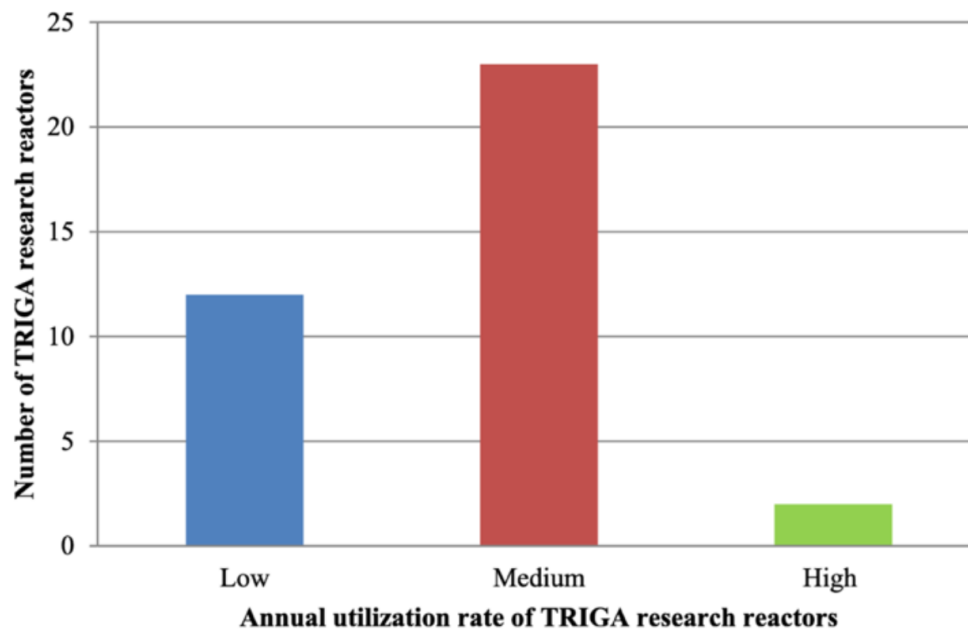


Abbildung 6: Untersuchungsergebnisse der IAEA zur Auslastung der sich noch in Betrieb befindlichen TRIGA – Reaktoren aus 2016. Low steht für weniger als 4 effektive Wochen (EW) Betrieb im Jahr, Medium für 4-20 EWs und High für mehr als 20 EWs. Entnommen aus (IAEA, 2016a, S. 91).

TRIGA – Reaktoren sind weltweit verbreitet. Das ist unter anderem auf die sichere und einfache Handhabung des Reaktors selbst zurückzuführen. So eignen sich TRIGA – Reaktoren besonders gut als Universitätsreaktoren und Forschungseinrichtungen, selbst in Entwicklungsländern, wie Fouquet et al. anmerken (Fouquet u. a., 2003, S. 50). Niedrige Betriebskosten und ein geringer Personalaufwand im Vergleich mit anderen Forschungsreaktoren werden ebenfalls als Vorteile von TRIGA – Reaktoren seitens der IAEA aufgeführt (IAEA, 2016a, S. 42). Dies kann beispielhaft durch Dokumente über die

Anschaffung des TRIGA – Reaktors der Johannes Gutenberg - Universität Mainz belegt werden. Der für das Projekt verantwortliche Professor Fritz Straßmann legt darin die notwendigen Personal- und Sachkosten den damaligen Geldgebern dar (Krafft & Strassmann, 1981, S. 432).

Weiterhin wurden TRIGA – Reaktoren als politische Mittel verwendet. So merken zwei Interviewpartner*innen an, dass TRIGA – Reaktoren in der Vergangenheit an andere Länder verschenkt worden sind. Dies betrifft den Reaktoren selbst, sowie die benötigten Brennelemente. Die beschenkten Länder mussten nur die Gebäude und die sonstigen Infrastrukturen stellen. Ziel war es die beschenkten Nationen politisch an die USA zu binden oder beim Kauf von größeren Leistungsreaktoren zur ersten Wahl zu werden (I-1, Pos. 53 + 55; I-6, Pos. 15). Diese Form der Beschaffung gilt jedoch nicht für alle TRIGA – Reaktoren. Mindestens für die deutschen TRIGA – Reaktoren Heidelberg und Mainz können Quellen angeführt werden, die explizit von einem Kauf des Reaktors sprechen (dkfz & Rautenstrauch, 2001; Krafft & Strassmann, 1981, S. 437).

Insgesamt listet die IAEA in ihrer Forschungsreaktordatenbank 66 Einträge unter dem Stichpunkt „TRIGA“ auf, wovon 37 noch als „operational“, d. h. im Betrieb befindlich, sind (IAEA, 2024a). Eine vollständige Liste der TRIGA – Reaktoren ist im Anhang IV zu finden. Bei diesen Einträgen sind sowohl die als originale TRIGA – Reaktoren gebauten Anlagen aufgelistet, als auch jene, bei denen der ursprüngliche Brennstoff durch TRIGA – Brennelemente ausgetauscht worden ist. Die TRIGA – Forschungsreaktoren verteilen sich auf insgesamt 21 Länder, wobei die meisten Reaktoren in den USA gebaut wurden. Eine Übersicht ist in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Übersicht über die Anzahl TRIGA – Reaktoren weltweit, sowie der Reaktoren, die noch als „operational“ bei der IAEA gemeldet sind, sortiert nach Ländern. Die zugrundeliegenden Daten wurden aus der RRDB der IAEA entnommen (IAEA, 2024a).

Land	Ursprüngliche Anzahl der TRIGA-Reaktoren	Noch in Betrieb befindliche TRIGA Reaktoren
Bangladesch	1	1
Brasilien	1	1
Demokratische Republik Kongo	2	-
Deutschland	6	1
Finnland	1	-
Indonesien	2	2
Italien	2	2
Japan	3	1
Kolumbien	1	1
Malaysia	1	1
Marokko	1	1
Mexiko	1	1
Österreich	1	1
Republik Korea	2	-
Rumänien*	2	2
Slowenien	1	1
Taiwan	1	1
Thailand	1	1
Türkei	1	1
Vereinigtes Königreich	1	-
Vereinigte Staaten von Amerika	34	18

* Bei den Reaktoren in Rumänien handelt es sich um einen Dual-Core Reaktor. Die beiden Kerne werden einzeln gelistet, teilen sich jedoch das Kühlbecken und weitere Infrastruktur.

2.3 Grundlagen für die technische Innovationssystemanalyse zu Small Modular Reactors

2.3.1 Definition von Small Modular Reactor

Der Begriff „Small Modular Reactor“ (SMR) ist aktuell in der Fachwelt nicht eindeutig definiert. Auf diese Problematik wurde bereits in der Vertiefungsarbeit „Brückentechnologie oder alter Hut - Untersuchung zum Stand von F&E für Small Modular Reactors (SMR)“ eingegangen und soll an dieser Stelle nicht erneut erörtert werden. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Recherche jedoch werden noch einmal kurz angeführt. Einschlägige Definitionen verwenden vor allem vier Merkmale für SMRs:

1. Größe bzw. Leistung des Reaktors
2. Modularität
3. Zugrundeliegendes Reaktorkonzept und -design
4. Anwendungsfelder für SMRs

Im Folgenden sollen die einzelnen Merkmale genauer beleuchtet werden.

Merkmal der Größe bzw. Leistung:

SMRs sind bezogen auf die Baugröße und maximale Leistung kleiner als bisher genutzte Reaktortypen zur Stromerzeugung. Was genau eine „kleine“ Baugröße definiert, ist jedoch nicht weiter festgelegt. Die britische Regierung¹⁶ bezeichnet SMRs als vergleichbar mit existierenden Leistungsreaktoren, aber mit kleinerem Maßstab (GOV.UK, 2024b) und der kanadische SMR – Roadmap Lenkungsausschuss hält fest, dass SMR kleiner gebaut werden, sowohl bezogen auf die räumliche Größe als auch auf die Leistung (Canadian Small Modular Reactor (SMR) Roadmap Steering Committee, 2018).

Bezüglich der maximalen Leistung von SMRs können sich die meisten Institutionen und Staaten in ihren Definitionen auf eine Obergrenze der elektrischen Leistung von 300 MW_e einigen. Beispielhaft sollen dafür die IAEA (IAEA, 2021,

¹⁶ Die Förderung der Entwicklung von SMR-Konzepten unterlag in der Vergangenheit dem Department for Business, Energy & Industrial Strategy, welches im Februar 2023 in die drei Ministerien Department for Business and Trade, Department for Energy Security and Net Zero und Department for Science, Innovation and Technology aufgeteilt wurde (GOV.UK, 2024a)

S. 2) und die US-amerikanische Genehmigungsbehörde U.S. NRC (U.S. NRC, 2023) genannt werden. Ergänzend dazu führt das Regulator's Forum der IAEA, eine maximale thermische Leistung von 1000 MW_{th} als Leistungsobergrenze auf (SMR RF, 2023, S. 2). Ergänzend dazu gibt die OECD, mit dem Verweis auf ältere Arbeiten ihrer Unterabteilung NEA, auch eine untere Leistungsgrenze von 10 MW_e für SMRs vor. Dadurch sollen SMRs von den noch kleineren Micro-Modular-Reactors (MMR) abgegrenzt werden (OECD & NEA, 2021, S. 15)¹⁷.

Abweichend von den oben genannten Leistungsbereichen hat das französische CEA, für SMRs eine Leistung von 50 – 500 MW_e festgelegt (CEA, 2021).

Merkmal der Modularität:

Obwohl das Wort „Modular“ einen namensgebenden Teil der Bezeichnung von SMRs bildet, wird dieser Begriff nicht immer in den gängigen Definitionen aufgeführt oder näher erklärt. Findet er doch Eingang in die jeweilige Definition, so wird er auf zwei unterschiedliche Weisen verstanden. So ist eine Lesart, dass Reaktoranlagen modular mit einer unterschiedlichen Anzahl Reaktoren derselben Bauweise bestückt sein können, die sich dann eine gemeinsame Infrastruktur teilen (NEA, 2023, S. 11; SMR RF, 2023, S. 2). Ein anderes Verständnis bezüglich der Modularität, welches von den meisten Institutionen vertreten wird, ist die Fertigung von Modulen in Fabriken, die dann zu dem Reaktorstandort gebracht und vor Ort zusammengefügt werden (GOV.UK, 2024b, S. u. a.; IAEA, 2022, S. 1; NEA, 2023, S. 11; OECD & NEA, 2021, S. 19). Dabei wird dieses Merkmal direkt mit der Wirtschaftlichkeit von SMRs verlinkt.

Merkmal des Reaktordesigns

Für Reaktoren zur Stromproduktion haben sich weltweit vor allem diejenigen Konzepte durchgesetzt, die auf Leichtwasser oder Schwerwasser als

¹⁷ Diese Untergrenze wird allerdings nicht konsequent von der OECD verwendet. So werden im Small Modular Reactor Dashboard' der NEA von 2023 Reaktoren mit einer Leistung von 1 - 10 MW_e ebenfalls als SMR aufgeführt (NEA, 2023, S. 11).

Kühlmittel¹⁸ setzen. In ihrem Bericht über die weltweit betriebenen Kernkraftwerke für das Jahr 2022 weist die IAEA 411 betriebsbereite Reaktoren aus. Davon sind 354 Reaktoren leichtwassergekühlt und 46 schwerwassergekühlt (IAEA, 2023, S. 85).

Je nach Definition für SMRs, sind unterschiedliche Ansätze bezüglich des Reaktordesigns inbegriffen. So sprechen sowohl die U.S. NRC, als auch die britische Regierung, auf ihren Internetseiten vor allem von Leichtwasserreaktoren (GOV.UK, 2024b; U.S. NRC, 2023). Andere Akteure sehen bei SMRs jedoch auch die Möglichkeit neuere, und zum Teil bisher nicht genehmigte, Designs umzusetzen, sog. „Advanced – Reactor – Designs“. Besonders die IAEA und die OECD schließen in ihren Betrachtungen alle Reaktordesigns mit ein (IAEA, 2022, S. 1; OECD & NEA, 2021, S. 15 f.).

Merkmal der Anwendungsfelder

Das letzte Merkmal von SMRs betrifft die potenziellen Anwendungsmöglichkeiten. Alle Definitionen sehen als Hauptanwendungsziel die Produktion von Strom vor. Ergänzend dazu sieht die IAEA das Potential einer Stromproduktion durch SMRs eher in Nischenbereichen. Als Beispiel dafür wird eine netzunabhängige Stromproduktion angeführt (IAEA, 2022, S. 1). Daneben sehen die IAEA und die OECD auch neue Verwendungsmöglichkeiten von SMRs, für die Leistungsreaktoren bisher als nicht geeignet eingestuft wurden. Die OECD spricht zum Beispiel von der Möglichkeit SMRs für die Produktion von Fernwärme oder Prozesswärme zu nutzen. Von Seiten Saudi – Arabiens gibt es das Interesse SMRs zur Meerwasserentsalzung zu nutzen (OECD & NEA, 2021, S. 26). Aber auch die Nutzung zur H₂-Produktion wird als Anwendungsmöglichkeit diskutiert, ebenso wie eine mögliche Kopplung von SMRs mit erneuerbaren Energien für bessere Ausbeuten (IAEA, 2022, S. 1).

¹⁸ Als schweres Wasser (D₂O) wird Wasser bezeichnet, welches mit Wassermolekülen angereichert ist, die Deuterium im Molekül haben und keinen Wasserstoff. Deuterium ist ein Wasserstoffisotop mit zwei Neutronen statt einem Neutron im Kern. Schweres Wasser hat eine niedrigere Wahrscheinlichkeit Neutronen zu absorbieren als leichtes Wasser (H₂O), was sich auf das Reaktordesign und den verwendeten Brennstoff auswirkt (Koelzer, 2019, S. 180 f.).

Abschließend sind in *Abbildung 7* die vier genannten Merkmale, sowie die in den gängigsten Definitionen verwendeten Charakteristika für SMRs zusammengefasst.

Für diese Arbeit werden bei dem Verständnis der Modularität, der Reaktorkonzepte bzw. -designs und der Anwendungsfelder keine Eingrenzungen vorgenommen, um möglichst viele Konzepte in die Untersuchung mit einzuschließen. Es werden jedoch nur solche Konzepte betrachtet, deren Reaktorleistung zwischen 10 MW_e und 300 MW_e liegt. MMR-Konzepte werden damit in den Untersuchungen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

SMR (Small Modular Reactor)			
Leistung	Modularität	Reaktorkonzepte / Reaktordesign	Anwendungsfelder
< 300 MWe Seltener: 10 – 300 MWe Oder < 1000 MWth Frankreich: 50 – 500 MWe	Fertigung von Modulen in Fabriken, die vor Ort zusammengefügt werden Oder Variable Anzahl von Reaktoren gleicher Bauart, die sich die Infrastruktur teilen	Konzepte mit Leichtwasser- oder Schwerwasserkühlung Advanced Reactor Designs, inkl. neuer Brennstoffdesigns	Stromproduktion (netzabhängig oder netzunabhängig) Fernwärme Prozesswärme Meerwasserentsalzung H ₂ -Produktion Kopplung mit erneuerbaren Energien

Abbildung 7: Übersicht über die wichtigsten Merkmale für SMRs

2.3.2 Design- und Schlüsselfaktoren als Grundlage für kommerzielle Erfolge von Small Modular Reactors

Die OECD und NEA haben sich in ihrer Veröffentlichung „Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities“ eingehend mit den Faktoren beschäftigt, die aus ihrer Perspektive über den Erfolg oder Misserfolg von SMRs in einem marktgetriebenen Umfeld entscheiden (OECD & NEA, 2021, S. 19). Die wichtigsten Designmerkmale sind:

1. Integrales Design:

Einige SMR – Designs setzen darauf alle Komponenten, die zum sogenannten „Nuclear steam supply system“ gehören, in den Reaktorbehälter zu integrieren. Dies führt zwar im Vergleich zu Systemen mit einem externen Primärkühlkreis zu einem deutlich größeren Behälter, dafür wird das System jedoch als sicherer angesehen. Dadurch sollen die Reaktorsicherheitssysteme, der Betrieb des Reaktors, sowie dessen Instandhaltung, von Vereinfachungen profitieren können (OECD & NEA, 2021, S. 19). Mögliche Veränderungen in den Mengen an radioaktivem Abfall, die sich daraus ergeben, werden an dieser Stelle von der OECD jedoch nicht berücksichtigt.

2. Verbesserungen in der Sicherheit:

Die angestrebte kleinere Leistung der Reaktoren führt zu kleineren Kernen und das wiederum zu einem höheren Oberflächen-Volumen-Verhältnis. Durch die verbesserte Effizienz bei der Kühlleistung können so öfter passive Sicherheitssysteme eingesetzt werden, was die Sicherheit der Reaktoren in Störfallszenarien deutlich verbessern soll (OECD & NEA, 2021, S. 19).

Erfahrung mit passiven Sicherheitssystemen konnten bereits bei Forschungsreaktoren gesammelt werden. So benötigen zum Beispiel TRIGA – Reaktoren mit kleiner Leistung üblicherweise keine aktive Kühlung, um sicher betrieben werden zu können, auch wenn diese dennoch installiert ist.

3. Geringeres Kerninventar:

Eine kleinere Leistung bedeutet auch ein geringeres Kerninventar. Das hat zur Folge, dass der Kern selbst mit weniger Abschirmung versehen werden muss. Aber auch indirekt soll das kleinere Inventar zur Sicherheit der Anlage beitragen. So wird angenommen, dass die Evakuierungszonen um den Reaktor, die für den Fall eines Unfalls vorgesehen werden müssen, reduziert werden können. Das würde im Umkehrschluss bedeuten, dass SMRs näher an den Standorten gebaut werden können, an denen sie benötigt werden (OECD & NEA, 2021, S. 19).

4. Modularisierung und Fabrikfertigung:

Der wohl wichtigste Aspekt für den kommerziellen Erfolg von SMRs ist die Möglichkeit der Modularisierung und die Fertigung von dafür notwendigen Komponenten in Fabriken (vgl. Kapitel 2.3.2) (OECD & NEA, 2021, S. 19). Diese Sichtweise wird auch von der IAEA vertreten. Sie hält fest, dass die Fertigung von SMRs, wie bereits andere hoch technologisierte Industriezweige zuvor, von der Serienproduktion profitieren kann. Dabei sind Verbesserungen in der Fertigungsqualität sowie der Fertigungseffizienz zu erwarten, die sich wiederum auf die Kosten für den Bau von SMRs niederschlagen. Die IAEA hält jedoch auch fest, dass aufgrund der hohen Erstinvestitionen für eine solche Serienfertigung und des noch nötigen Erfahrungsgewinns, die ersten SMRs von den Kosteneffekten durch die Modularisierung noch nicht profitieren werden (IAEA, 2021, S. 7).

5. Höhere Flexibilität im Vergleich zu den größeren Leistungsreaktoren:

SMRs sollen sich gegenüber ihren größeren Pendanten auf zwei Arten flexibler zeigen. Zum einen soll der Betrieb optimiert werden können, wenn mehrere Module miteinander gekoppelt sind und zum anderen verspricht man sich von SMRs deutlich mehr Anwendungsfelder, wie im vorherigen Unterkapitel beschrieben.

2.3.3 Wirtschaftliche Aspekte von Small Modular Reactors

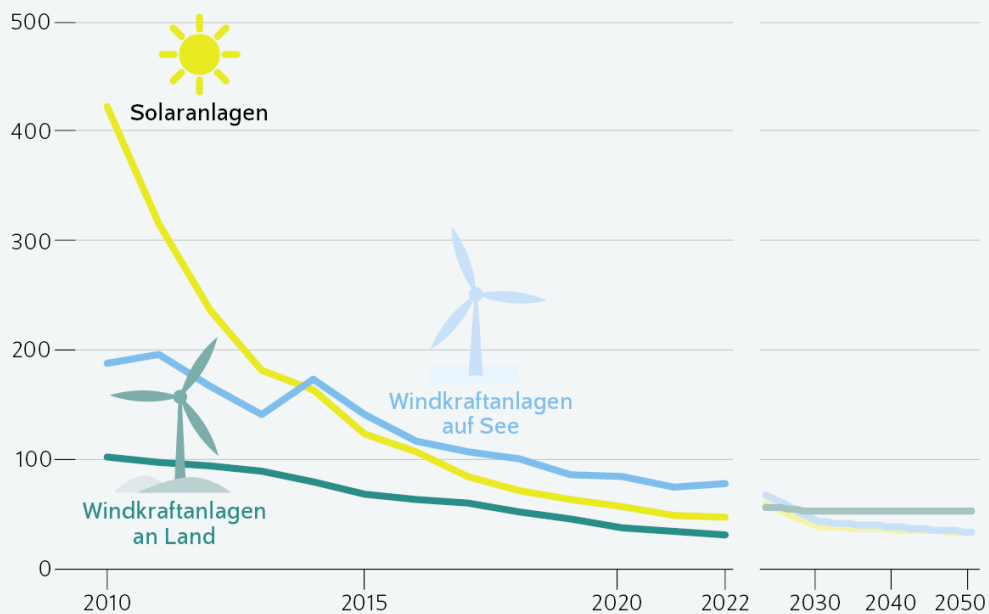
SMRs werden sich in einer marktgetriebenen Umgebung nur am Markt etablieren können, wenn sich das Investment für die Shareholder lohnt. Die Rentabilität ist gerade in der Kernenergie ein häufig diskutiertes Thema. Beispielhaft kann der französische EPR-Reaktor¹⁹ Flamanville 3 angeführt werden, der in 2022 mit einer erneuten Kostensteigerung, sowie der Verzögerung der Inbetriebnahme Schlagzeilen machte (Overstraeten & Mallet, 2022). Wimmers et al. führten 2023 eine Untersuchung über die ökonomischen Aspekte der Kernenergie durch und konstatierten, dass es kostengünstigere Alternativen zur Kernenergie gibt. Dabei seien die Kosten für den Rückbau bei den Investitionsrechnungen oftmals nicht berücksichtigt (Wimmers u. a., 2023, S. 35 und Klöppelt u. a., 2024, S. 2). Zusätzlich müssten die Kosten für die Endlagerung der Brennelemente und radioaktiven Abfälle nicht selten von Staaten für die privaten Betreiber übernommen werden (Wimmers u. a., 2023, S. 20 f.).

¹⁹ EPR = European Pressurized Water Reactor. Es handelt sich hierbei um eine Weiterentwicklung bereits existierender Leichtwasserreaktoren mit verbessertem Design und einer größeren Leistung (GRS, o.J.)

Abbildung 1

Erzeugungskosten erneuerbarer Energien

In Euro pro Megawattstunde



Anmerkungen: Angenommener Wechselkurs entspricht 0,95 Euro pro US-Dollar. Die Daten bis 2022 stellen globale Werte dar. Daten ab 2023 sind linear interpolierte Prognosen für Europa.

Quellen: International Renewable Energy Agency (IRENA): Renewable Power Generation Costs in 2022; IEA World Energy Outlook (2023).

© DIW Berlin 2024

Die durchschnittlichen globalen Erzeugungskosten erneuerbarer Energien sind in den vergangenen Jahren weiter gesunken.

Abbildung 8: Entwicklung der durchschnittlichen globalen Erzeugungskosten für erneuerbare Energien. Entnommen aus (Neuhoff u. a., 2024, S. 229).

Der Druck auf die Kernenergie erhöht sich umso mehr, da sie im Wettbewerb mit anderen CO₂-armen Energieträgern steht. So halten Neuhoff et. al. im DIW-Wochenbericht 15/2024 fest, dass die Stromerzeugungskosten für erneuerbare Energie in den vergangenen Jahrzehnten deutlich gesunken und damit wettbewerbsfähig geworden seien (vgl. Abbildung 8) (Neuhoff u. a., 2024, S. 228). Im Faktencheck des Fraunhofer Instituts zum Thema Kernenergie aus 2024 wird darüber hinaus die Kostensteigerung für Bau- und Betriebskosten für

Kernkraftwerke im Allgemeinen (ohne Entsorgungskosten) für die letzten Jahre auf etwa + 47% beziffert (Klöppelt u. a., 2024, S. 2).

Klassische Kernkraftwerke setzen bei den Kosten und Rentabilitätsüberlegungen auf den Effekt der Skalierung (economies of scale). Je größer das Kraftwerk und der Leistungsoutput ist, umso günstiger kann der Strom erzeugt werden. SMRs müssen sich im Gegensatz dazu über die Ökonomie der Serienproduktion tragen (OECD & NEA, 2021, S. 22) und auf weitere kostensenkende Maßnahmen setzen, siehe Abbildung 9.

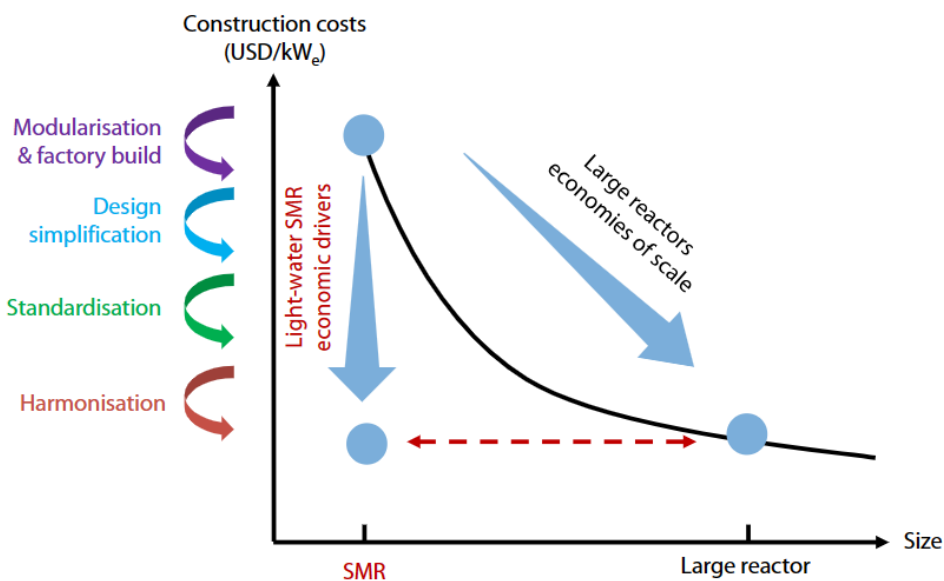


Abbildung 9: Wichtige Maßnahmen, mit denen SMRs ihre Größennachteile ökonomisch ausgleichen können. Entnommen aus: (OECD & NEA, 2020b, S. 102)

Ein wichtiger Schlüssel ist die modulare Bauweise von SMRs und die damit verbundene Fabrikfertigung von Modulen. Weitere Effekte, die eine Serienfertigung von SMRs unterstützen sind laut OECD und NEA, Vereinfachungen im Reaktordesign, Standardisierungen sowie die Harmonisierung von Regelwerken und Genehmigungsverfahren (vgl. Abbildung 9). Diese Kostenreduzierungen durch modulare Bauweisen konnten schon auf anderen Gebieten, wie zum Beispiel dem Flugzeugbau, beobachtet werden. Für SMRs steht der Beweis jedoch noch aus (OECD & NEA, 2020b, S. 101).

Ein weiteres Argument für die Verwendung fabrikgefertigter Module für SMRs sind die nötigen Vorabinvestitionen für Betreiber, die bei SMRs niedriger sind als bei bisherigen Reaktorprojekten (OECD & NEA, 2021, S. 9). Ebenso erhofft man sich kürzere Konstruktionszeiten für die Reaktoren, sowie eine Verbesserung der Fertigungsqualitäten und damit verbunden eine Verbesserung in der Betriebssicherheit der Reaktoren (OECD & NEA, 2021, S. 24). Diese Argumente sollen die Nachfrage nach SMRs stärken.

3 Historisch systematische Untersuchung zu Innovationssystemen für TRIGA – Forschungsreaktoren von 1950 bis heute

In diesem Kapitel werden basierend auf der Ausführung in Kapitel 2, die Funktionen im Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktoren analysiert, um dessen Erfolgsfaktoren herauszuarbeiten. Obwohl TRIGA – Reaktoren sich durch die inhärente Sicherheit gegen Leistungsexkursionen deutlich von anderen Reaktoren unterscheiden, standen alle Reaktordesigns, die Mitte der 50er Jahre entwickelt wurden, einem Feld an Konkurrenten gegenüber, die alle auf dem sich neu geöffneten Markt Fuß fassen wollten. Zusätzlich zur Analyse der Funktionen des Innovationssystems in Abschnitt 3.1 werden im Abschnitt 3.2 ausgewählte Beispiele herausgegriffen, die den Erfolg von TRIGA – Reaktoren besonders unterstützt haben.

3.1 Analyse der Funktionen im Innovationsfeld TRIGA-Forschungsreaktoren

Unternehmerische Aktivitäten

Das unternehmerischen Handeln von General Atomics ist insbesondere in den ersten Jahren von schnellem Agieren, Nutzen von Chancen, Investitionen in Forschung und Entwicklung geprägt. Eine konsequente Vermarktung und Verkauf der TRIGA – Reaktoren und der Brennelemente, sowie die Nutzung der politischen Umstände, waren weitere wichtige Komponenten.

Frederic de Hoffmann erkannte 1955 die Chancen, die sich durch die „Atoms for Peace“ – Rede ergaben (vgl. Abschnitt 3.2.1), und überzeugte seinen damaligen Arbeitgeber General Dynamics Corporation zur Gründung von General Atomics für die Entwicklung von kommerziellen Reaktoren. Als Leiter von General Atomics gab er das Ziel aus, Reaktoren zu entwickeln, die auf dem neu geöffneten, freien Markt verkauft werden können (Dyson, 1979, S. 95). Die Anfangszeit der unternehmerischen Tätigkeit ist von einem Arbeiten geprägt, welches an die „Garagenmentalität“ in den Anfängen des Silicon Valleys erinnert. Mangels anderer Infrastruktur begannen die ersten Treffen rund um die

Entwicklung bei General Atomics von Reaktoren 1956 in einem leerstehenden Schulhaus wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben (Dyson, 1979, S. 96). Ein wichtiger Meilenstein war die Errichtung des Prototyps TRIGA Mark I in San Diego, dem Sitz von General Atomics. Er wurde im Mai 1958 das erste Mal kritisch, zwei Jahre nach Beginn der Entwicklungsarbeiten (Dyson, 1979, S. 101). Dies dient als Beispiel zur Veranschaulichung des Tempos, welches von General Atomics an den Tag gelegt wurde. Im Mai 1958 wurden die Patente für den TRIGA – Reaktor und der dazugehörigen Brennelemente eingereicht. Die Erteilung des Patents folgte im Jahr 1964 (Taylor u. a., 1964). Die 2. Genfer Konferenz wurde für die Ausstellung, den Betrieb und den Verkauf des zweiten funktionstüchtigen TRIGA – Reaktors genutzt (General Atomics, o.J.).

In den nächsten fünf Jahren wurden insgesamt 17 TRIGA – Reaktoren das erste Mal kritisch (siehe Abbildung 10), die Umrüstung anderer Forschungsreaktoren auf TRIGA – Brennelemente nicht mitgezählt²⁰. Das entspricht 30% der originalen TRIGA – Reaktoren.

²⁰ In der Forschungsreaktor-Datenbank der IAEA sind nicht für alle umgerüsteten Reaktoren das Datum der finalen Umrüstung auf TRIGA-Brennelemente angegeben. Die in der Datenbank hinterlegten Daten, wann der Reaktor das erste Mal kritisch wurde, gelten der ursprünglichen Konfiguration.

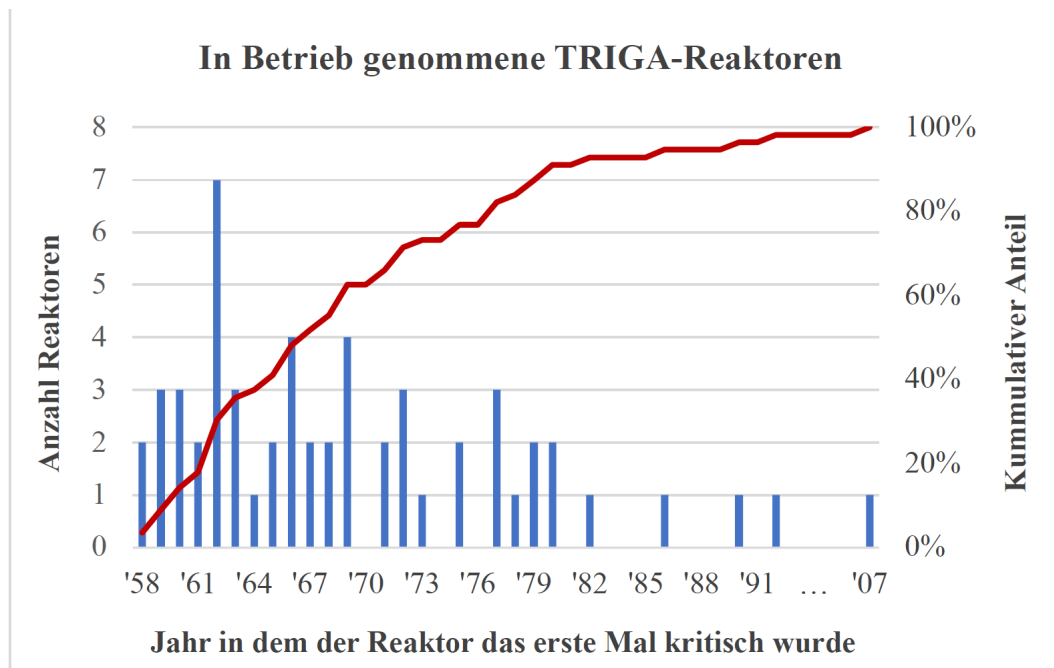


Abbildung 10: Reaktoren, die als TRIGA – Reaktoren gebaut wurden, sortiert nach den Jahren ihrer ersten Kritikalität. Nicht betrachtet werden Reaktoren, die nachträglich mit TRIGA-Brennelementen ausgestattet wurden und bei der IAEA als TRIGA modified bzw. converted gelistet sind (IAEA, 2024a).

93% der originalen TRIGA – Reaktoren wurden in den ersten 30 Jahren des Unternehmens gebaut, lediglich vier Reaktoren wurden nach 1985 gebaut, der letzte im Jahr 2007.

Nach der Entwicklung des TRIGA Mark I wurden Weiterentwicklungen des TRIGA und der TRIGA – Brennelemente auf den Markt gebracht (vgl. 1.1.1). Es folgten weitere Patente, sowie der Bau der Prototypen des TRIGA Mark F in San Diego 1960²¹ und des TRIGA Mark III in 1966 (Fouquet u. a., 2003, S. 49 f.; IAEA, 2024a).

Wissensentstehung

Auf das Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktoren wirken sich vor allem die amerikanischen F&E – Bemühungen aus. Das ist primär auf die Einstufung als militärische Projekte und der damit verbundenen Geheimhaltung zurückzuführen, die für Projekte in der Kerntechnik vor 1955 galten.

²¹ Der Reaktor „GA-TRIGA F“ ist in der RRDB als „Mark I“ gelistet, der Name des Reaktors zeigt jedoch, dass es sich um den Prototypen für den TRIGA - Reaktor Mark F handelt.

Die Funktion „Wissensentstehung“ profitierte dabei von der Entdeckung der Kernspaltung und der anfänglichen Beschränkungen auf eine militärische Nutzung. Das F&E – Projekte, welches zur Entstehung der TRIGA – Reaktoren am meisten beigetragen hat, ist das Manhattan Projekt. Das primäre Ergebnis des Forschungsvorhabens war die Entwicklung der amerikanischen Atombomben. Sekundär führte es jedoch auch zu dem ersten Reaktor der Welt, in dem eine Kettenreaktion aufrechterhalten werden konnte (Reed, 2015, S. 3–36 bis 3–38). Ziel der Reaktorentwicklungen war zu dem Zeitpunkt jedoch nicht die Stromproduktion, sondern die Produktion von Pu-239 als Spaltmaterial für eine Plutonium-Bombe (Reed, 2015, S. 1–13). Auf die TRIGA – Reaktor-Entwicklung wirkte sich das Manhattan Projekt insofern direkt aus, als dass viele wichtige Personen hinter der Entwicklung des TRIGAs ebenfalls für das Manhattan Projekt gearbeitet hatten. Beispiele hierfür sind Frederic de Hoffman, Edward Teller, Ted Taylor (Dyson, 1979, S. 96). Die Entwicklung des TRIGA – Reaktors profitierte von dem Wissen der darin eingebundenen Personen, welches diese wiederum an staatlichen Projekten sammeln konnten.

Bereits nach dem Krieg verfolgten die USA erste Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Reaktoren zur Stromerzeugung. Dafür wurden weitreichende F&E – Vorhaben durch den amerikanischen Staat ins Leben gerufen. Als Beispiel können hierfür zwei der großen Nationallaboratorien der USA angeführt werden: das Argonne

Nationallaboratorium, welches von der U.S. Atomic Energy Commission (später in das U.S. Department of Energy) als Entwicklungslabor für Reaktoren gegründet wurde (Argonne National Laboratory, o.J.) und das Idaho Nationallaboratorium, welches mit insgesamt 52 Reaktoren, die auf dem Gelände seit 1949 gebaut wurden, zur Teststation für Reaktoren geworden ist (Idaho National Laboratory, o.J.).

Neben „Learning by Searching“, ist „Learning by doing“ ebenfalls ein wichtiger Aspekt der Funktion Wissensentstehung. So trug der schnelle Bau des ersten Prototyps und die dadurch gewonnene Erfahrung zur Funktion Wissensgeneration bei. Dieses Wissen mündete in die Weiterentwicklungen der TRIGA – Konzepte. Als Beispiel ist vor allem der TRIGA Mark II zu nennen, der eine für

wissenschaftliche Experimente optimierte Version des TRIGA Mark I ist (IAEA, 2016a, S. 23).

Wissensverbreitung

Mit der „Atoms for Peace“ – Rede von Eisenhower (vgl. Abschnitt 3.2.1) wurden die F&E – Bemühungen weltweit erweitert, intensiviert und finanziert. Zudem war es den Wissenschaftlern nun auch möglich, sich zu vernetzen. Wie sehr die wissenschaftliche Gemeinschaft davon profitiert hat, wird klar, wenn man das Zitat des Zeitzeugen Dyson, welches er über die 1. Genfer Konferenz schreibt, liest:

„American and French and Canadian and Russian scientists, who had been building nuclear reactors in isolation and secrecy, were able for the first time to meet one another and discuss their work with considerable freedom.” (Dyson, 1979, S. 94 f.)

Zusätzlich profitiert das Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktor neben den erwähnten wissenschaftlichen Netzwerken rund um die Kerntechnik von einer eigenen Gemeinschaft der TRIGA – Nutzer, die untereinander vernetzt sind. So spricht die IAEA zum Beispiel von TRIGA – spezifischen Konferenzen, die in der Vergangenheit abgehalten wurden (IAEA, 2016a, S. V), aber auch davon, dass sich diese Netzwerke rund um TRIGA – Reaktoren auch noch in jüngerer Vergangenheit formieren. Als Beispiel kann das Global TRIGA Research Reactor Network (GTRRN) aufgeführt werden, welches von 17 TRIGA-Einrichtungen in 2013 unter Mitwirken der IAEA gegründet worden ist (IAEA, 2016a, S. 94 f.).

Suchrichtung

Gesellschaftlich betrachtet war die Suchrichtung zu Beginn der Kerntechnik noch sehr offen, wie in Kapitel 3.2.1. beleuchtet wird. Bei General Atomics selbst wurden im ersten Sommerworkshop zunächst drei Richtungen betrachtet, denen kurzfristig die Entwicklung eines Marktes für zivilgenutzte Reaktoren zugetraut wurde. Darunter waren ein Schiffsreaktor für Frachtschiffe, ein Testreaktor, um Komponenten für größere Leistungsreaktoren zu testen und ein sicherer Reaktor (Dyson, 1979, S. 97). Entscheidend für die weitere Entwicklung war die Weitsicht Frederic de Hoffmanns, der zwar einerseits den Bau

von Leistungsreaktoren als Langzeitziel für General Atomics betrachtete, es jedoch für nötig hielt schnell Fuß auf dem Markt zu fassen. Zudem sollte General Atomics seiner Meinung nach zunächst mit kleinen Projekten Erfahrungen gewinnen. Er entschied auch, dass die im Sommer entwickelten Konzepte um den Schiffsreaktor und den Testreaktor nicht weiterverfolgt wurden und stattdessen die Kapazitäten auf den sicheren Reaktortyp konzentriert wurden, dem er das größte Potential zurechnete (Dyson, 1979, S. 97).

Beim Lesen des Zeitzeugenberichts von Dyson fällt auf, dass zwar das Ziel, die Entwicklung eines sicheren Reaktors, vorgegeben war, die Frage nach der technischen Umsetzung jedoch offengehalten wurde. Dadurch konnten die mit dem Auftrag betrauten Wissenschaftler und Ingenieure frei eine Lösung entwickeln.

Ressourcenmobilisierung

Mit der Gründung des Manhattan Projekts begann eine Zeit, in der sowohl finanzielle als auch personelle Ressourcen in einem großen Ausmaß für das Innovationssystem zur Verfügung standen. So betrug die Kosten für das Projekt bis August 1945 1,9 Milliarden US-\$ und auf dem Höhepunkt des Projekts waren bis zu 150.000 Festangestellte beteiligt (Reed, 2015, S. 1–1). Die in dem Abschnitt „Wissensentstehung“ (vgl. Seite 36) genannten Forschungsprojekte um die Nationallaboratorien Argonne und Idaho sind weitere Belege für die Bereitschaft in die Innovationen rund um die Kerntechnik zu investieren.

Spezifisch auf TRIGA – Reaktoren bezogen, lassen sich jedoch nur wenige Quellen finden. Aus dem Bericht von Dyson lässt sich die Information herauslesen, dass die Treffen von Juni bis September 1956 zunächst in San Diego in einem provisorisch gemieteten Schulhaus stattfanden, mangels anderer Infrastruktur bei General Atomics. Auch waren die Wissenschaftler und Ingenieure, die im Sommer an den ersten Konzepten arbeiteten, nur zu Beginn des Projekts eingebunden. Die tatsächliche Umsetzung und finale Entwicklung eines Prototyps erfolgte danach bei General Atomics mit einer deutlich kleineren Mannschaft (Dyson, 1979, S. 96–101).

Marktentstehung und Legitimität

Die beiden Funktionen Marktentstehung und Legitimität sind maßgeblich von Eisenhowers „Atoms for Peace“ – Rede und dem dadurch gestarteten „Atoms for Peace“ – Programm beeinflusst, wie im nachfolgenden Abschnitt 3.2.1 ausführlich aufgezeigt wird. An dieser Stelle soll nur zusammenfassend festgehalten werden, dass erst durch die „Atoms for Peace“ – Rede ein Markt für die zivile Nutzung der Kernenergie geschaffen wurde. Auch wurde die Funktion der Legitimität so verändert, dass eine zuvor geheime Technologie des Militärs für alle zivilen Anwendungen freigegeben wurde.

Des Weiteren haben die TRIGA – Reaktoren aufgrund ihrer technischen Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten selbst zur Marktentstehung beigetragen, in dem sie sich klar an einer Zielgruppe orientierten. So bieten sich TRIGA – Reaktoren durch die inhärente Sicherheit des Reaktortyps, verbunden mit dem für einen Reaktor geringen Aufwand an Wartung und Instandhaltung, für Betreiber an, die nur mit wenigen personellen und finanziellen Ressourcen ausgestattet sind (IAEA, 2016a, S. 42 f.). Viele TRIGA – Reaktoren sind daher an Universitäten angeschlossen. Gleichzeitig sind Universitäten auch die Einrichtungen, die von der Funktion des Reaktors als Ausbildungsgerät für Studenten und den Anwendungen als Forschungsreaktor profitieren. Bedürfnisse, Wünsche sowie die zur Verfügung stehenden Ressourcen der Zielgruppe und die Eigenschaften des Reaktors selbst passen daher perfekt zueinander.

3.2 Die Erfolgsfaktoren von TRIGA Forschungsreaktoren anhand ausgewählter Beispiele

3.2.1 Das “Atoms for Peace” – Programm

Unter dem Eindruck der verheerenden Auswirkungen, die durch die Atombomben angerichtet wurden (vgl. Kapitel 2.2.1), folgten zwei Entwicklungen. Zum einen das Wettrüsten von Atom- und Wasserstoffbomben zwischen den USA und der Sowjetunion in den folgenden Jahrzehnten. Zum anderen wuchs der Wunsch danach, die bei der Kernspaltung freiwerdende Energie und das damit verbunden Potential für zivile, friedensstiftende Zwecke zu nutzen (Craig & Jungerman, 1986, S. 18–28). Unter dem sogenannten „Atoms for Peace“ – Programm schlug der damalige US-Präsident Dwight D. Eisenhower vor, spaltbares Material aus den militärischen Beständen einer internationalen Organisation zu übergeben und damit anderen Nationen zur Verfügung zu stellen, sofern diese sich der Kontrolle durch die IAEA unterwarfen (Craig & Jungerman, 1986, S. 28).

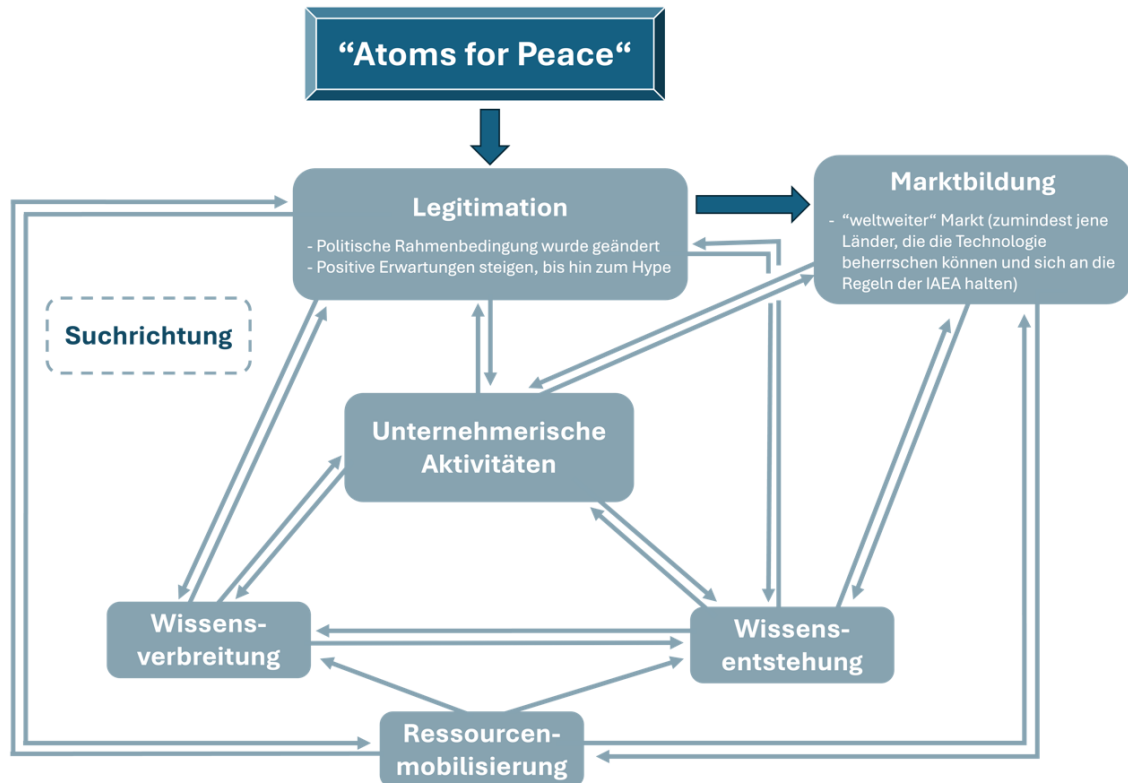


Abbildung 11: Auswirkungen des „Atoms for Peace“ – Programm auf die unterschiedlichen Funktionen des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktoren. Die Hauptauswirkungen (dicke Pfeile) sind bei den Funktionen Legitimation und Marktbildung zu finden. Davon ausgehend wurden die übrigen Funktionen mit Ausnahme der Suchrichtung angestoßen, wobei nicht sämtliche Funktionen einander beeinflussen (dünne Pfeile).

Eisenhower setzte in seiner „Atoms for Peace“ – Rede am 08.12.1953 den Ton für die folgenden Jahrzehnte, was die friedliche Nutzung der Kernenergie betrifft. Dyson beschreibt diesen Moment wie folgt:

„This was a decisive moment in the development of nuclear energy.“ (Dyson, 1979, S. 94).

Eisenhowers Rede wirkte sich direkt und indirekt auf sechs der sieben Funktionen eines Innovationssystems aus, wie in

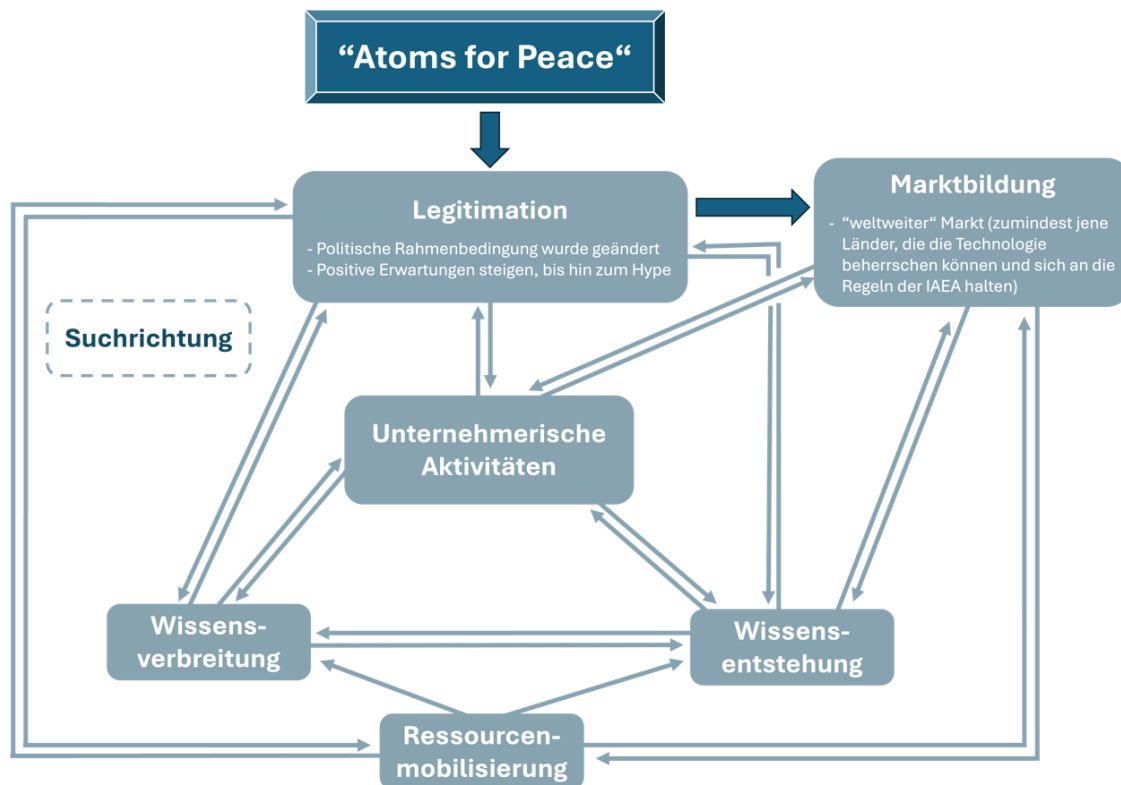


Abbildung 11 dargestellt.

Die zunächst stärkste Auswirkung auf das Innovationssystem lässt sich bei der Funktion Legitimität finden. Vor der Öffnung der Technologie für friedvolle Nutzung war der institutionelle Rahmen für eine Nutzung der Kerntechnik auf staatliche und militärische Anwendungen begrenzt.

Neben der Möglichkeit die Technologie ab diesem Zeitpunkt breiter und kommerzieller zu denken, erreichte Eisenhower mit seiner Rede zusätzliche Auswirkungen. So wurde das Wertesystem rund um die Nutzung der Kerntechnik neu ausgerichtet. Die freiwerdende Energie bei der Kernspaltung sollte nicht mehr nur für den Krieg eingesetzt werden, sondern vielmehr ein Treiber und Hoffnungsträger einer friedvollen Weltgemeinschaft werden, wie Eisenhower betonte:

“[...] this fissionable material would be allocated to serve the peaceful pursuits of mankind. Experts would be mobilized to apply atomic energy to the needs of agriculture, medicine and other

peaceful activities. A special purpose would be to provide abundant electrical energy in the power-starved areas of the world.

Thus the contributing Powers would be dedicating some of their strength to serve the needs rather than the fears of mankind.

[...]

Against the dark background of the atomic bomb, the United States does not wish merely to present strength, but also the desire and the hope for peace." („Atoms for Peace Speech“, 2014)

Die Worte Eisenhowers lassen die Interpretation zu, dass jeder Nutzer der neuen Technologie zu einem Botschafter des Friedens wird.

Die zweite starke Auswirkung ist bei der Funktion Marktentstehung zu beobachten. Vor dem „Atoms for Peace“ – Programm gab es keinen offenen Markt, an dem Marktteilnehmer hätten agieren können. Erst durch Eisenhowers Rede wurde der Markt eröffnet.

Ausgelöst durch die Änderungen bei den Funktionen Legitimität und Marktentstehung nahmen die Aktivitäten bei den anderen Funktionen des Innovationssystems zu. Dies gilt grundsätzlich für alle Akteure, die sich im Bereich der Kernenergie entwickelt haben. Bezogen auf die Entwicklung des TRIGA – Reaktors kann das an unterschiedlichen Beispielen beobachtet werden. So wurde durch die Entstehung des Marktes erstmals unternehmerische Aktivitäten möglich. Ganz allgemein nahm nach der Rede Eisenhowers die Ressourcenmobilisierung für kerntechnische Anwendungen zu, wovon auch TRIGA – Reaktoren profitieren. Das zeigt sich auch in den Interviews mit den Expert*innen, die für die Zeit der 50 – 70er Jahre von einer „goldenen Zeit“ für Kernreaktoren sprechen (I-3, Pos. 17; I-7, Pos. 10, I-1, Pos. 21).

Obwohl die positiven Auswirkungen auf das Innovationssystem anhand vieler Beispiele belegt werden kann, darf Eisenhowers Rede nicht ohne kritische Betrachtungen als treibende Kraft für die Kerntechnik angesehen werden. Die Beispiele von TRIGA – Reaktoren als Geschenke an Staaten, um diese an die USA zu binden, zeigen, dass die Technologien der Kerntechnik als politische Mittel im Kalten Krieg genutzt worden sind (vgl. Abschnitt 1.1.1). Dieses

Handeln ist auch immer wieder Untersuchungs-gegenstand politischer Forschungsfelder (Josephson, 2023, S. 8 f.).

Die von Eisenhowers Rede nicht positiv aktivierte Funktion ist die Suchrichtung. Aufgrund des entstandenen Hypes um die Kernenergie sind die ersten Jahre nach der Rede vor allem durch eine Art Wildwuchs an Ideen geprägt. Dabei wurden Konzepte und Ideen entwickelt, die neben Ingenieuren und Visionären auch durch Personen mit nichtwissenschaftlichem Hintergrund, wie Künstler und der Science-Fiction-Szene geprägt waren. Nach heutigen Maßstäben wirken diese Ideen mitunter kurios. Als Beispiel hierfür soll das 1958 vorgestellte Konzept des „Ford Nucleon“ genannt werden, ein mit einem kleinen Reaktor betriebenes Auto, welches nie gebaut wurde (ANS Nuclear Cafe & Nuclear Newswire, 2021).

3.2.2 Das Rücknahmeprogramm für bestrahlte Brennelemente

Beim Betrieb von Kernreaktoren fallen bestrahlte Brennelemente an, die sicher entsorgt werden müssen. Abhängig von Art und Leistung der einzelnen Reaktoren fallen diese Brennelemente überwiegend schon im Betrieb an. Zusätzlich fallen weitere radioaktive Abfälle im Betrieb und beim Rückbau des Reaktors an. Diese Abfälle und das Kerninventar unterscheiden sich in Nuklidzusammensetzung, Aktivität und Anforderungen an die sichere Entsorgung deutlich (OECD & NEA, 2020a, S. 13). Die Kosten einer sachgerechten Endlagerung für radioaktive Abfälle richtet sich nach eben jenen Anforderungen. Insbesondere für Länder, die über nur wenige oder keine weiteren kerntechnischen Einrichtungen außerhalb eines TRIGA – Reaktors verfügen, ließen sich die Kosten der Entsorgung deutlich senken, wenn die Entsorgung der Brennelemente ausgelagert werden könnten. Dadurch müsste lediglich eine Lösung für die weniger aktiven Betriebsabfälle gefunden werden.

Inwiefern Überlegungen zur Entsorgung radioaktiver Abfälle die Entscheidung zur Beschaffung eines TRIGA – Reaktors beeinflusst haben, ist heute nicht mehr nachzuvollziehen. Es lassen sich jedoch Belege dafür finden, dass bereits mit dem Kauf des Reaktors ein Entsorgungsweg durch die USA für die Brennelemente aufgemacht wurde. So wird in der Pressemitteilung zum Rückbau des TRIGA HD II, und der Verbringung dessen Brennelemente in die USA, geschrieben, dass bereits beim Kauf des Reaktors eine Rücknahme der Brennelemente mit den USA vereinbart worden war (dkfz & Rautenstrauch, 2001). Es liegt nahe, dass auch für andere Reaktoren solche Absprachen getroffen worden sind. Ergänzend dazu können Belege aus dem U.S. DOE aus 2004 gefunden werden, in denen die Rücknahme von bestrahlten Brennelementen als Teil der „Atoms for Peace“ – Vision anzusehen ist (Messick, 2004, S. 2). Neben den dokumentierten Einzelregelungen mit den Betreiber der TRIGA – Forschungsreaktoren legten die USA durch das U.S. DOE ganz allgemein 1996 ein „Foreign Research Reactor Spent Nuclear Fuel Acceptance“ – Programm auf. Darin wurde die Rücknahme von bestrahlten Brennelementen, deren Uran ursprünglich aus US – amerikanischen Beständen stammte, für Forschungsreaktoren weltweit ermöglicht. Das ursprünglich für 10 Jahre

gedachte Programm wurde vorzeitig 2004 um weitere 10 Jahre verlängert. Zusätzlich wurde mit der Verlängerung des Programms auch die Möglichkeit zur Abgabe von Kernbrennstoffen aus nicht US – amerikanischen Beständen ermöglicht. Das Programm endete offiziell am 12.05.2016, wobei die letzten Brennelemente unter Berücksichtigung einer notwendigen Abklingzeit bis 12.05.2019 entgegengenommen wurden (DOE, 2019, S. 1).

Das Rücknahmeprogramm der USA wurde jedoch nicht aus Altruismus heraus betrieben, sondern diente dazu eigene politische Interessen durchzusetzen. Das U.S. DOE nennt als Rechtfertigung für das Rücknahmeprogramm die Reduzierung der Bedrohung durch Proliferation von nuklearen Waffen und nuklearen Materialien als ein vorrangiges Ziel. Dabei soll die Menge an hochangereichertem Uran (HEU²²) aus ziviler Nutzung so weit wie möglich reduziert oder gar eliminiert werden (DOE, 2019, S. 4). Insgesamt wurden über das Programm laut U.S. DOE rund fünf Tonnen HEU und LEU²³ aus 35 Ländern durch die USA entgegengenommen. Darunter auch Brennstoffe von TRIGA – Reaktoren.

Die Relevanz dieser Brennelementrücknahmen für das Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktor ergibt sich, wenn man das Produkt TRIGA – Reaktor von der Inbetriebnahme bis zum Rückbau betrachtet. Die Gründe für das Rücknahmeprogramm der USA mögen eigennützig gewesen sein, für die Betreiber eines TRIGA – Reaktors, oder dessen Länder, bot sie eine sichere und kostengünstige Entsorgung eines problematischen Abfalls.

Die Umweltgesetze und auch völkerrechtliche Vereinbarungen haben sich in den letzten gut sieben Jahrzehnten seit es TRIGA – Reaktoren gibt weiterentwickelt verändert. Heute herrscht in der Frage der Entsorgung radioaktiver Abfälle in den meisten Ländern der Grundsatz, dass jenes Land für die Entsorgung verantwortlich ist, welches den radioaktiven Müll verursacht hat. Ein Export radioaktiver Abfälle ist daher oftmals rechtlich ausgeschlossen, wie zum Beispiel in Deutschland (BASE, 2024). Gleichwohl gibt es auch Länder, die die gemeinsame Entsorgung ihrer radioaktiven Abfälle diskutieren. Als Beispiel

²² High enriched-Uranium = Hochangereichertes Uran

²³ Low enriched-Uranium = Leichtangereichertes Uran

können Lettland, Slowenien und die Slowakei angeführt werden (BASE, o.J.). Die Betrachtungen zu dem Rücknahmeprogramm der USA lassen den Schluss zu, dass diese Option auch weiterhin diskutiert werden muss. Insbesondere Ländern mit wenigen sonstigen Infrastrukturen in der Kerntechnik wird so der Zugang zu dieser Technologie ermöglicht.

3.2.3 Die Gemeinschaft der TRIGA – Reaktoren

In der Analyse des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktor hat sich die Gesamtheit der TRIGA – Reaktoren als ein weiterer Erfolgsfaktor herausgestellt. Die IAEA betont in ihrem Bericht die Netzwerke, die sich um die TRIGA – Reaktoren gebildet haben (IAEA, 2016a, S. 93-95 u. S. V). Diese Form der Gemeinschaft hat unterschiedliche Vorteile. Zum einen vernetzten sich die Forschungsgruppen, die TRIGA – Reaktoren für ihre Forschung verwenden und zum anderen vernetzte es die Betreiber der Reaktoren untereinander. Weiterhin verknüpfte die Netzwerke auch Aufsichtsbehörden. Diese Gemeinschaft generiert Wissen rund um die TRIGA – Reaktoren. Sowohl im engeren Sinn, was den Betrieb der Reaktoren selbst betrifft (IAEA, 2016a, S. 84), aber auch im erweiterten Sinn, was die Wissensgenerierung der forschenden Gemeinschaft betrifft. Für diese Arbeit wird sich auf den engeren Sinn der Gemeinschaft beschränkt, da diese für das Innovationssystem mehr Relevanz hat.

Das Netzwerk der TRIGA – Reaktoren wirkt sich direkt auf die Funktionen Wissensgeneration und Wissensverbreitung aus und stärkt diese, wie in Abbildung 12 dargestellt.

Für die Betreiber der Reaktoren ergeben sich daraus folgende Vorteile:

1. Wissen aus dem Betrieb, der Wartung und der Instandhaltung, welches an anderen Einrichtungen gewonnen wird, kann auf gemeinsamen Konferenzen oder über andere Netzwerke untereinander geteilt werden.
2. Die Erfahrungen aus Rückbauprojekten anderer TRIGA – Einrichtungen können ebenfalls in die Rückbauplanung und -durchführung bei noch im Betrieb befindlichen TRIGA – Reaktoren einfließen.
3. Die über den letzten Jahrzehnten schwindende unternehmerische Tätigkeit von General Atomics auf dem Gebiet der TRIGAs und die damit einhergehende schwierige Versorgung von Ersatzteilen konnte besser kompensiert werden. So wurden originale Einbauten von Reaktoren, die zurück gebaut wurden als Ersatzteile an Einrichtungen weitergegeben, deren TRIGA noch im Betrieb sind (IAEA, 2016a, S. 92).

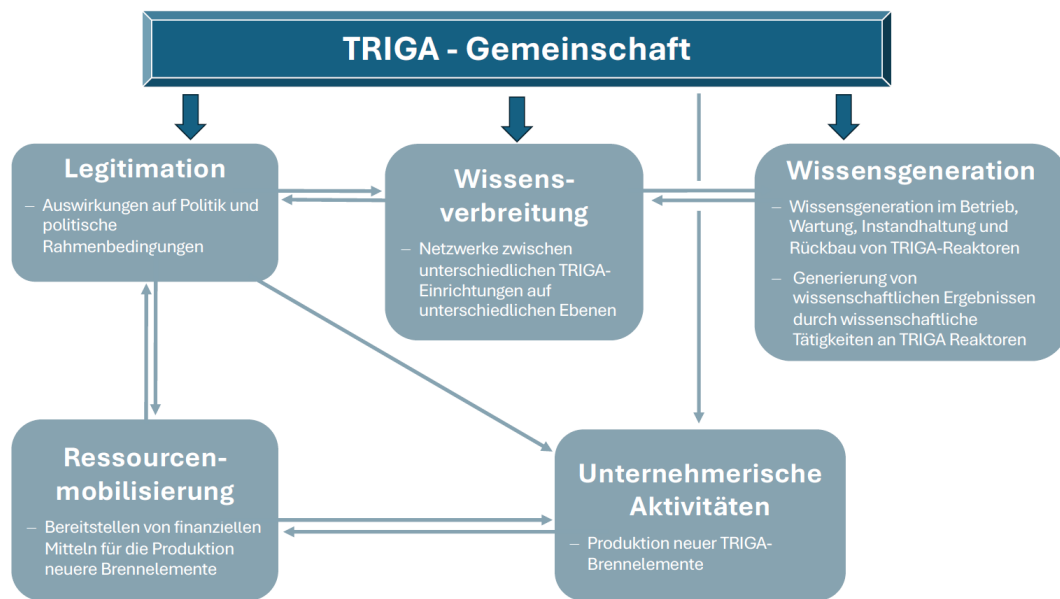


Abbildung 12: Auswirkungen des Netzwerks von TRIGA – Reaktoren auf die unterschiedlichen Funktionen des Innovationssystems mit Beispielen

Weitere Auswirkungen der starken Gemeinschaft von TRIGA – Reaktoren sind auf die Funktionen Legitimität und Unternehmerische Tätigkeit zu beobachten, wie ebenfalls in Abbildung 12 zu sehen ist. Die IAEA bemängelt 2016 in ihrem TRIGA – Bericht noch das Problem der schlechten Lieferkette für TRIGA-Brennstoffe. Die Produktion der Brennelemente wurde 2012 eingestellt, da die Nachfrage die Kosten nicht rechtfertigen würden (IAEA, 2016a, S. 87). Der Abbrand in TRIGA – Reaktoren ist verglichen mit anderen Reaktortypen gering. Die langen Betriebszeiten von mehreren Jahrzehnten führten dennoch bei einigen Reaktoren zu einem Bedarf an frischen Brennelementen. Die IAEA hielt fest, dass eine ausreichende Anzahl verbindlicher Zusagen, die Herstellung neuer Brennelemente ermöglichen könnte (IAEA, 2016a, S. 87, 89). Tatsächlich gab FRAMATOME im Februar 2022 bekannt die Produktion von TRIGA-Brennelementen für General Atomics, gefördert durch das U.S. DOE, wieder aufzunehmen, um die Versorgung mit TRIGA – Brennelementen sicher zu stellen (FRAMATOME, 2022). Das U.S. DOE vermeldete daraufhin im März 2023 die Herstellung des ersten TRIGA – Brennelements seit 2012. Zusätzlich plant das U.S. DOE 660 Brennelemente für die Versorgung der US – amerikanischen TRIGA – Reaktoren zu kaufen und darüber hinaus TRIGA-Brennelemente für den MARVEL – Microreaktor (DOE, 2023a).

4 Systematische Untersuchung zum Innovationssystem Small Modular Reactors

Aufbauend auf den theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2 wird in diesem Kapitel das Innovationssystem SMRs betrachtet. Die Analyse der Funktionen erfolgt in Abschnitt 4.1. Anschließend werden im Abschnitt 4.2 mögliche Schlüsselfaktoren für die Diffusion von SMRs näher betrachtet.

4.1 Analyse der Funktionen im Innovationssystem Small Modular Reactors

Unternehmerische Aktivitäten

Die ersten Bestrebungen kleinere Reaktoren zu bauen, begannen bereits in den 1990ern durch die amerikanische Regierung. Das Interesse an SMRs nimmt jedoch erst seit Ende 2010, mit der Neuentwicklung von Reaktoren, zu (Ingersoll & Carelli, 2021, S. XVII). In den letzten Jahren haben sich die unternehmerischen Aktivitäten im Bereich der SMRs weiter intensiviert. Dies gilt sowohl für staatliche als auch für private Unternehmen.

Im Jahr 2022 sind SMR – Konzepte in unterschiedlichen Reifegraden von insgesamt 38 privaten Unternehmen bei der IAEA gelistet. Dabei fallen in den USA, Kanada, aber auch in Europa Unternehmen mit eigenen SMR – Konzepten auf, die für die Nuklearindustrie als besonders jung angesehen werden können. Gut 50 % der privaten Unternehmen mit einem SMR – Konzept sind jünger als 20 Jahre (Riemer, 2024, S. 17–19). Die Intensität der Geschäftstätigkeiten lassen sich jedoch nicht bei allen jungen Unternehmen nachvollziehen, wie das Beispiel Elysium Industries zeigt. Die letzten Aktivitäten auf dem Linked-In Profil des amerikanischen Unternehmens sind mindestens 2 Jahre alt (Elysium Industries, 2024) und der dort bereitgestellte Link zur Internetseite der Firma endet zum Zeitpunkt der Masterarbeit²⁴ auf einer Fehler-Seite.

In den USA können fünf von insgesamt zwölf auf dem Feld der SMRs tätigen Unternehmen als etablierte Marktteilnehmer identifiziert werden. Etablierte

²⁴ Abgerufen wurde der Link am 04.08.24 um 13:00 h

Privatunternehmen mit Erfahrung in der Kerntechnik sind außerdem gehäuft in asiatischen Ländern, mit der Ausnahme von China, zu finden. Eine nach Ländern sortierte Aufstellung privater Firmen mit SMR – Konzepten, ergänzt um eine Übersicht über das jeweilige Unternehmensalter, ist in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Übersicht über die weltweiten Industrieakteure mit mindestens einem bei der IAEA gelisteten SMR-Konzept. Die Daten stammen aus der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1).

Land	Private Unternehmen mit SMR - Konzept	Davon Unternehmen mit einem Unternehmensalter		
		< 10 Jahre	10 - 20 Jahre	> 20 Jahre
USA	12	2	5	5
USA + Indonesien	1	1		
USA + Japan	2			2
Kanada	5	1	4	
China	2			2
Japan	2			2
Südkorea	2			2
Südafrika	2		1	
Dänemark	2		2	
Schweiz	1	1		
Frankreich	1		1	
Italien	1	1		
Schweden	1		1	
Niederlande	1	1		
Tschechische Republik	1			1
Vereinigtes Königreich	2			2

Neben privaten Unternehmen beteiligen sich auch Staaten und Staatsunternehmen an den Aktivitäten der SMR – Entwicklung. Die USA und Kanada setzen eher auf den Markt und private Unternehmen, die sich in der Kernenergie engagieren, in China, Russland und Frankreich sind vor allem Staatsunternehmen und andere staatliche Akteure aktiv. So wurden in China bereits ein SMR – Konzept, sowie das dazugehörige Vorläuferkonzept an der

Tsinghua Universität verwirklicht und in Betrieb genommen. Bei beiden Konzepten handelt es sich um HTGR – Designs (IAEA, 2022, S. 147–150 und 209–212). Insgesamt weist China die größte Anzahl an staatlichen Akteuren auf dem Gebiet der SMRs auf. Abweichend von der chinesischen Herangehensweise konzentrieren sich die SMR – Konzepte in Russland vorrangig auf wenige Staatskonzerne, wie Rosatom. Dieser gilt als einer der großen Akteure in der Nuklearindustrie mit langer Historie und Erfahrung im Kraftwerksbau. In den USA sind das Idaho Nationallaboratorium und die Universität von Kalifornien in Berkeley mit eigenen Konzepten zu nennen, die im Forschungsbereich ebenfalls zu den etablierten Akteuren gehören. Eine Länderübersicht über die SMR – Akteure ist in Abbildung 13 zusammengestellt. Details zu den einzelnen Akteuren und den dazugehörigen Konzepten können im Anhang V nachgelesen werden.

Akteure mit eigenen SMR - Konzept, nach Ländern sortiert

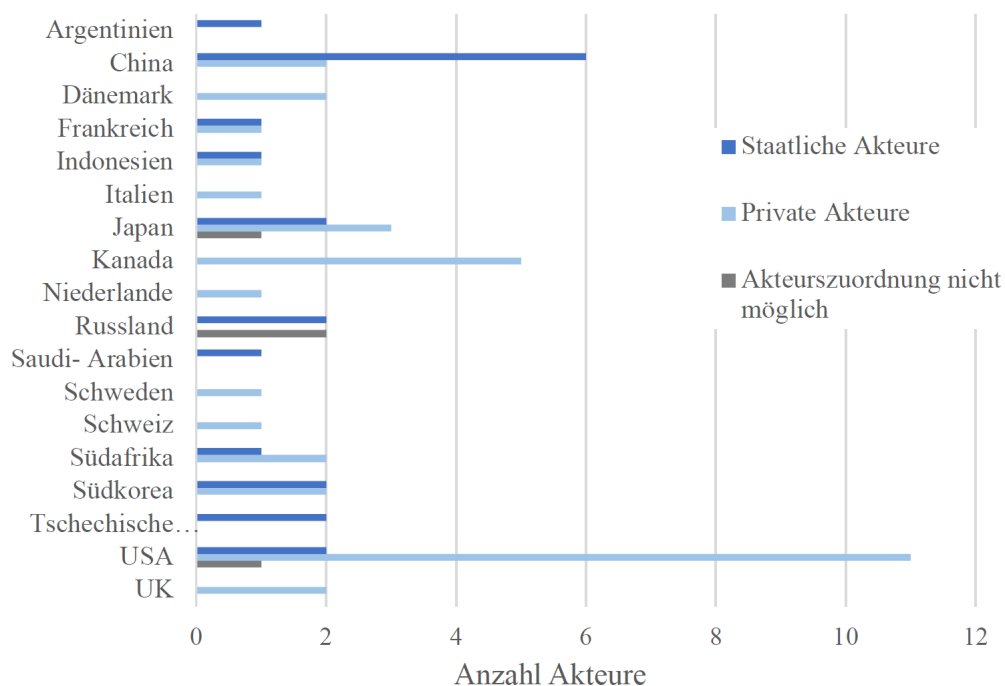


Abbildung 13: Akteure auf dem Gebiet der SMRs, sortiert nach Kategorie und Länder. Daten wurden entnommen von (Riemer, 2024, S. 48–54)

Die Motive der einzelnen Staaten für ihre Bemühungen im Bereich der SMRs sind vielfältig und reichen von wirtschaftlichen, über sicherheitspolitische, bis

hin zu geopolitischen Interessen. So halten Pistner et al. fest, dass vor allem jene Staaten an der Kerntechnik festhalten, die auch zu den Atommächten zählen (Pistner u. a., 2021, S. 50). Dabei ist der Verbundcharakter aus kommerzieller und militärischer Nutzung zu betonen und den daraus folgenden Synergieeffekten. So hat der Erhalt der Kernenergie auch positive Kosteneffekte auf die militärische Nutzung der Kernkraft (Pistner u. a., 2021, S. 50). Zusätzlich weisen sie auf die geopolitische Bedeutung hin, die eine Diplomatie, die mit dem Export der Kernkraft verknüpft ist, für eben jene Staaten darstellt. Diese sei analog zu den Exporten anderer Technologiekomplexe zu werten. Diese Motivlage gilt es insbesondere für die Aktivitäten der Staaten China, Russland und USA zu beachten.

Wissensentstehung

Die Funktion Wissensentstehung ist durch eine stetig wachsende Anzahl an Forschungsbemühungen auf dem Gebiet der SMRs geprägt, wie die Graphen in Abbildung 14 zeigen. Es wurden vier für das Themengebiet naheliegende Schlagworte „SMR“, „SMR nuclear“, „SMR reactor“ und „Small Modular Reactors“ in der Suchmaschine Google Scholar eingegeben und die Anzahl der Treffer für die letzten 20 Jahre dokumentiert. Dabei wurden keine weiteren Filter verwendet. Es gilt zu beachten, dass der Begriff „SMR“ auch Suchergebnisse registriert, die in anderen Fachgebieten als Abkürzung verwendet werden. Dennoch lässt sich aus den vier Graphen ablesen, dass die Wissensgewinnung über „Learning by searching“ in den vergangenen Jahren stetig zugenommen hat.

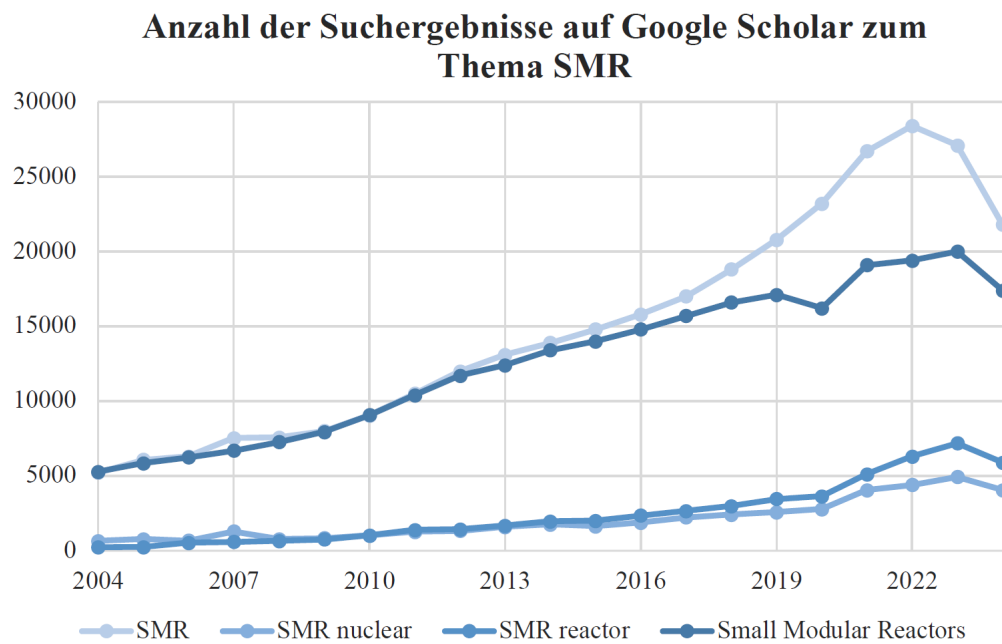


Abbildung 14: Anzahl der Suchergebnisse über die Suchmaschine Google Scholar für die Stichworte "SMR", "SMR nuclear", "SMR reactor" und "Small Modular Reactors" für die Jahre 2004 bis 2024. Stichtag: 16.10.2024

Zwar haben auch die Bemühungen für den Bau und Betrieb von Prototypen in den letzten Jahren zugenommen und tragen durch „Learning by Doing“ zur Wissensentstehung im Innovationssystem bei. Allerdings halten sich die Projekte, gemessen an der Dynamik um SMRs, sowie der Anzahl an Konzepten in der Entwicklung noch in Grenzen. Aktuell befinden sich vier Konzepte im Bau, wie aus

Tabelle 6 entnommen werden kann.

Tabelle 6: SMR-Konzepte, die sich im Bau befinden. Die Daten wurden von der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten entnommen, ergänzt aus den Informationen aus den Expert*inneninterviews (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1; OPG, 2024).

Bezeichnung	Output [MW _e]	Typ	Land	Weitere Infos
CAREM	30	Integral PWR	Argentinien	Wassergekühlt
ACP100	125	Integral PWR	China	Wassergekühlt
BREST-OD-300	300	LMFR	Russische Föderation	Flüssigmetallgekühlt, Schnelle Neutronen,
DNNP BWRX-300	270 - 290	BWR	Kanada	Wassergekühlt

Das kanadische Projekt DNNP BWRX-300 wurde von einem der Interviewpartner*innen als Beispiel für ein „gutes und seriöses Projekt“ angeführt (I-2, Pos. 15). Hierbei handelt es sich um einen Reaktor der Allianz GE-Hitachi, bzw. Hitachi-GE Nuclear Energy²⁵. Die Entscheidung für den Reaktortyp wurde 2022 getroffen. Zurzeit werden die Vorbereitungsmaßnahmen auf dem Baugelände durchgeführt, der offizieller Baubeginn ist für 2025 geplant (OPG, 2024). Gleichzeitig handelt es sich um das einzige im Bau befindliche Projekt eines kommerziellen SMR's zur Stromerzeugung, welches einem Energieversorger errichtet wird. Die anderen drei Reaktorprojekte sind als Prototypen mit einem wissenschaftlichen Hintergrund geplant und dienen damit zunächst der Wissensgewinnung. Neben den im Bau befindlichen Projekten listet die IAEA drei SMR-Reaktoren mit dem Status „In Betrieb“ in ihrer Veröffentlichung aus 2022 auf. Die Reaktoren sind in Tabelle 7 aufgeführt. Von den drei Reaktoren

²⁵ GE-Hitachi bzw. Hitachi-GE ist eine Allianz der amerikanischen General Electric und der japanischen Hitachi. In den USA heißt die Allianz GE-Hitachi Nuclear Energy, in Japan Hitachi Nuclear Energy (GE Hitachi, 2024; Hitachi-GE, 2024).

ist der russische KLT-40 Reaktor aus zweierlei Gründen eine Besonderheit. Zum einen ist er als Kernreaktor zur Stromproduktion entwickelt und wird auch als solcher genutzt und zum anderen handelt es sich um einen schwimmenden Reaktor. Die Idee dahinter ist ein mobiler Reaktor, der in Regionen gebracht werden kann, die sonst auf fossile Energieträger angewiesen sind. Als weitere Verwendungsmöglichkeiten werden die Versorgung von Ölplattformen und die Entsalzung von Meerwasser genannt (IAEA, 2022, S. 113 f.) Der Reaktor ist seit Dezember 2019 an das Stromnetz angeschlossen (IAEA, 2022, S. 116).

Tabelle 7: SMR-Konzepte die bereits im Einsatz sind. Die Daten stammen aus der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1).

Bezeichnung	Output [MW _e]	Typ	Land	Weitere Infos
KLT-40S	2 x 35	PWR	Russische Föderation	Wassergekühlt, schwimmendes Kraftwerk
HTTR	30 MW _{th}	HTGR	Japan	Gasgekühlt, an Land,
HTR-PM	210	HTGR	China	Gasgekühlt, an Land

Der japanische HTTR und der chinesische HTR-PM hingegen setzen auf die HTGR-Technologie. Beide Konzepte werden mit TRISO-Partikel²⁶ als Brennstoff betrieben (IAEA, 2022, S. 148 und 214). Beide Reaktoren dienen der Weiterentwicklung der HTGR – Technologie und der Erforschung einer möglichen kommerziellen Nutzung (IAEA, 2022, S. 147 und 213), womit sie zur Wissensentstehung im Innovationssystem beitragen.

Wissensverbreiterung

Die Akteure des Innovationssystems zeigen eine hohe Bereitschaft, sich untereinander zu vernetzen, wobei ein breiter Durchschnitt an Akteuren in den

²⁶ Anstelle klassischer Brennelemente bei dem der Uranbrennstoff mit einer metallischen Hülle umgeben ist, bestehen TRISO Brennstoffe aus einem Uran-Kohlenstoff-Sauerstoff-Gemisch in Form von Partikel. Diese sind mit 3 Keramiksichten überzogen und werden anschließend in die für den Reaktortyp benötigt Form gepresst (IAEA, 2022; Office of Nuclear Energy, Juni, S. 214).

Netzwerken vertreten ist. Insbesondere in dem letzten Jahre können verstärkt Aktivitäten beobachtet werden, wie die nachfolgenden Beispiele zeigen:

- Die IAEA gründete im September 2021 eine neue Plattform für SMRs und deren Anwendung. Das erklärte Ziel ist es, mit der Plattform interessierten Ländern zu helfen, möglichen Herausforderungen zu begegnen und nach und nach das Wissen und die Expertise aus unterschiedlichen Bereichen zusammenzutragen (IAEA u. a., 2021).
- Das Small Modular Reactors Regulators Forum wurde ebenfalls durch die IAEA ins Leben gerufen und befindet sich seit 2024 in der 4. Projektphase (IAEA, 2018).
- Im Februar 2024 wurde durch die Europäische Kommission die Gründung einer neuen Industrieallianz angekündigt, um die Entwicklung, Demonstration der Machbarkeit und Bereitstellung von SMRs zu fördern. (European Commission, 2024b). Das erste allgemeine Gründungstreffen fand im Mai 2024 statt (European Commission, 2024a).
- In Kanada haben sich diverse kanadische Provinz- und Territorialregierungen, sowie an SMRs interessierte Energieversorgungsunternehmen, zum Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee zusammengeschlossen, um das Potential für SMRs in Kanada zu untersuchen (Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018).
- Im weiteren Sinn kann auch das Netzwerk der World Nuclear Association angeführt werden. Der Verband betreibt Lobbyarbeit und verknüpft mit regelmäßigen Veranstaltungen zudem verschiedene Akteure untereinander. Zusätzlich werden Pressemeldungen aus der Kerntechnik auf der Internetseite „World Nuclear News“ für eine breite Öffentlichkeit zusammengestellt (WNA). Zu den Mitgliedern gehören u. a. Unternehmen wie Westinghouse, Rolls Royce, Hitachi – GE, aber auch Gutachter wie der TÜV Süd (WNA, o.J.).

Ergänzend zu den genannten Netzwerken wird die Wissensverbreitung durch Organisationen wie die IAEA und die OECD gestützt. Diese geben regelmäßig Veröffentlichungen zu dem Themengebiet SMRs aus.

Suchrichtung

Der voranschreitenden Klimawandel und die daraus resultierende Notwendigkeit Energie aus CO₂-armen Quellen bereitzustellen, bewirkt eine steigende Nachfrage nach der Kerntechnik. Davon profitieren auch SMRs, wie die große Anzahl von 71 bei der IAEA gelisteten SMR-Konzepten zeigt (IAEA, 2022, S. 2; OECD & NEA, 2021a, S. 13). Gleichzeitig kann jedoch eine mangelnde Klarheit darüber, was genau SMRs abdecken sollen, beobachtet werden. Die Problematik spiegelt sich auch in der Frage nach der Definition von SMRs (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Eine Auswertung der Daten der IAEA nach der zugrundeliegenden Technologie der SMR – Konzepte zeigt, dass wassergekühlte Reaktoren, zu Land oder zu Wasser, zusammen 46 % der entwickelten Konzepte ausmachen (vgl. Abbildung 15). Neuartige Reaktordesigns stellen in Summe die Mehrheit mit 54 %. Einzelnen betrachtet ist jedoch keine der genannten Kategorien so häufig vertreten wie wassergekühlte SMRs.

Summe aller SMR - Konzepte, aufgelöst nach der zugrundeliegenden Technologie

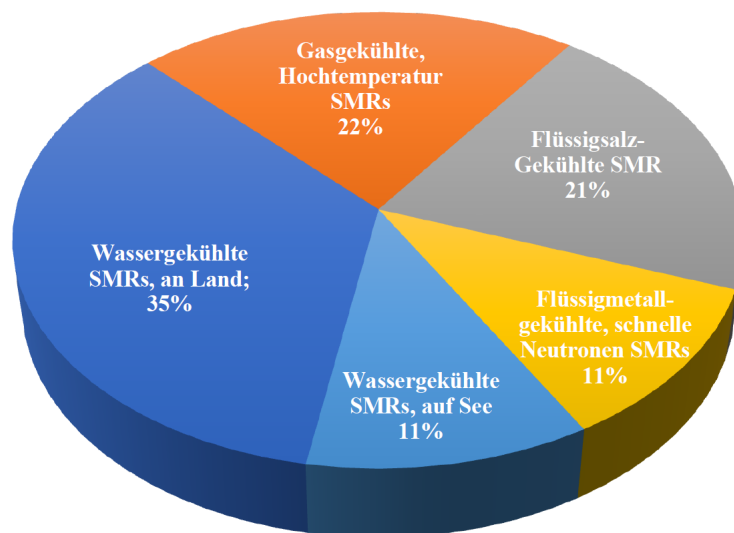


Abbildung 15: SMR-Konzepte in der Entwicklung, aufgelöst nach ihrer zugrundeliegenden Technologie. Die Daten wurden von der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten entnommen (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1).

Diese Zahlen decken sich mit der Erwartung der OECD, die davon ausgeht, dass auf Leichtwasserreaktoren basierende Designs einfacher zu entwickeln sind, da von der bisherigen Betriebs- und Genehmigungserfahrung großer Reaktoren profitiert werden kann (OECD & NEA, 2021, S. 29 f.).

Untersucht man SMR – Designs nach ihrem Reifegrad und betrachtet die am weitesten vorangeschrittene Konzepte, so zeigt sich, dass wassergekühlte Designs der Marktreife am nächsten sind (vgl. Abbildung 16). Es handelt sich hierbei um Reaktoren, die für den Einsatz als schwimmende Reaktoren gedacht sind und von den Ländern China und Russland entwickelt worden sind (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1). Es ist offen, inwiefern diese Konzepte an einem freien Markt verfügbar sein werden. Die Zahlen zeigen auch, dass Advanced – Reaktordesigns konsequent verfolgt werden, woraus sich eine Konkurrenzsituation zwischen wassergekühlten und anderen Reaktordesigns ergibt.

SMR - Konzepte in fortgeschritteneren Designphasen, aufgeschlüsselt nach Reaktortechnologien

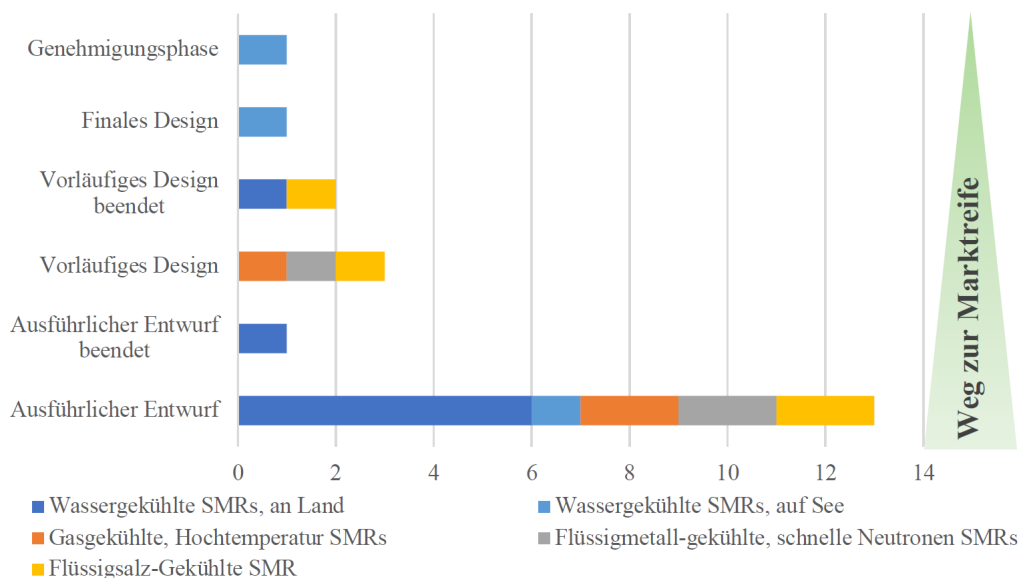


Abbildung 16: SMR-Konzepte in fortgeschrittenen Designphasen, aufgeschlüsselt nach der zugrunde liegenden Reaktortechnologie. Die Daten wurden von der IAEA-Publikation zum Entwicklungsstand von SMR-Konzepten entnommen (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1).

Betrachtet man das Thema Suchrichtung aus der Perspektive der Nachfrage, zeigt sich ebenfalls kein eindeutiges Bild. Das kommerzielle Projekt in Darlington, Ontario in Kanada, baut einen BWRX-300 Reaktor, der mit Leichtwasser gekühlt wird. Für den Einsatz von SMRs für andere Anwendungszwecke, wie beispielsweise der Bereitstellung von Prozesswärme, eignen sich jedoch gasgekühlte SMRs sehr viel besser (IAEA, 2022, S. 5). Die Suchrichtung für SMRs ist daher zurzeit noch offen und es muss sich noch zeigen, welche Reaktortypen sich letztlich durchsetzen werden. Es ist denkbar, dass auch mehrere Designs dauerhaft nebeneinander bestehen können, jeweils optimal auf den entsprechenden Verwendungszweck abgestimmt. Aufgrund der ökonomischen Überlegungen aus Abschnitt 1.1.1 ist jedoch nicht zu erwarten, dass viele Designs mit dem gleichen Verwendungszweck nebeneinander bestehen.

Marktentstehung

Es engagieren sich viele Länder finanziell in der SMR-Entwicklung und stellen hierfür Ressourcen bereit (vgl. Abschnitt Ressourcenmobilisierung, S. 58), da SMRs einen Teil ihrer nuklearen Strategie darstellen. Das suggeriert eine Nachfrage für das Produkt SMR. Ein weiteres Beispiel hierfür ist die jüngste Meldung über Google und dessen Vertrag mit Kairos Power. Die beiden Unternehmen haben sich über den Kauf mehrerer SMRs geeinigt, wobei der erste 2030 in Betrieb gehen soll. Treiber für diese Entwicklung ist ein wachsender Strombedarf aufgrund von KI-Technologien (Terrell, 2024). Auch andere Technologieunternehmen setzen vermehrt auf SMRs, wie das Beispiel Microsoft zeigt (Microsoft News Center Canada, 2022).

Eine Analyse der NEA aus 2016 prognostiziert für SMRs bis 2035 im schlechtesten Fall eine Kapazität von bis zu 850 MW_e und im besten Fall eine Kapazität von bis zu 21 GW_e, vgl. Abbildung 17. Aufgrund des Alters der Daten sind die beschriebenen gestiegene Bedarfe der Technologieunternehmen durch KI

noch nicht inbegriffen, jüngere Zahlen wurden jedoch noch nicht von der NEA veröffentlicht.

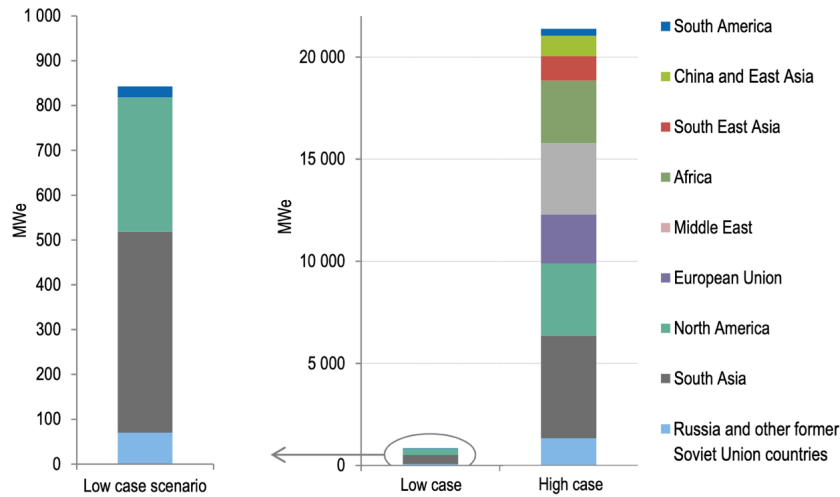


Abbildung 17: Geschätzte SMR – Kapazitäten für 2023, nach Regionen aufgeteilt. Entnommen aus (NEA & OECD, 2016, S. 11).

Das Marktpotential für SMRs wird grundsätzlich in folgenden Bereichen gesehen:

- Dekarbonisierung von Energiesystemen
- Ergänzung zu erneuerbaren Energien
- Zugang zur Kernenergie für neue Sektoren und/oder Regionen (OECD & NEA, 2021a, S. 25)

Besonders attraktive Nischenmärkte sind die Bereitstellung von Prozesswärme für Industrieanwendungen, Strom für Rechenzentren, deren Strombedarf durch KI-Anwendungen steigt, sowie die Versorgung von abgelegenen oder isolierten Regionen.

Dem positiven Bild steht entgegen, dass sich bislang lediglich vier Projekte im Bau befinden (vgl. Abschnitt Wissensentstehung, S. 50). Zwei der vier Projekte wurden in den letzten fünf Jahren begonnen. Das kanadische Projekt plant den offiziellen Baubeginn für 2025, vorbereitende Maßnahmen für den Bau werden bereits durchgeführt. Im Gegensatz dazu stehen die 36 Projekte von großen Leistungsreaktoren mit ca. 1 GW_e, deren Baubeginn ebenfalls in den letzten fünf Jahren lag. Eine Übersicht der Projekte ist in Anhang VI zu finden. Neben anderen Technologien zur Energieerzeugung sind große Leistungsreaktoren

daher als direkte Konkurrenten von SMRs anzusehen. Dadurch wird die Bildung eines eigenen Nischenmarktes erschwert.

Insbesondere die Kostenfrage ist ein wichtiger Aspekt bei der Etablierung eines Marktes für SMRs. Erkenntnisse hierzu bietet die von Mignacca und Locatelli durchgeführte systematische Literaturrecherche aus dem Jahr 2020. Sie konstatieren den Mangel eines standardisierten Ansatzes zur Bewertung der wirtschaftlichen und finanziellen Leistungsfähigkeit von SMRs, wodurch ein angemessener Vergleich zwischen SMRs und großen Leistungsreaktoren nicht möglich ist (Mignacca & Locatelli, 2020, S. 12). Dies erschwert potenziellen Investoren und Kunden die Entscheidung für oder gegen SMRs und behindert die Marktbildung. Das Fraunhofer Institut zitiert in seinem Faktencheck zur Kernenergie Zahlen aus einer DIW-Studie, die die Stromgestehungskosten für SMRs zwischen 213 \$ und 581 \$ beziffert und stellt diesen die Stromgestehungskosten für Erneuerbare Energien aus Wind und Photovoltaik von 31 -121 € gegenüber (Klöppelt, u. a., 2024, S. 3).

In ihrer Untersuchung von 2021 kommt die OECD darüber hinaus zu dem Schluss, dass weltweit noch erhebliche Unsicherheiten bezüglich der Genehmigungsreife von SMRs bestehen. Dies kann auch auf die aktuellen Entwicklungsreife der Konzepte zurückgeführt werden. Es benötigt jedoch einen weltweiten Markt, mit entsprechender regulatorischer und politischer Unterstützung, damit SMRs gegen Alternativen auf dem Energiemarkt bestehen können (OECD & NEA, 2021a, S. 25 ff.).

Ein wichtiges Prototypprojekt war der VOYGRTM – Reaktor von NuScale. Hierbei handelt es sich um den ersten SMR, der eine Bauartzulassung der U.S. NRC erhalten hat (IAEA, 2022, S. 90). Er sollte zusammen mit dem Utah Associated Municipal Power Systems gebaut werden. Das Projekt wurde jedoch kurz vor Baubeginn im November 2023 beendet (NUSCALE, 2023). Das Scheitern des Projektes kann für die kommerzielle Nutzung von SMRs als Rückschlag bewertet werden.

Aufgrund der aufgeführten widersprüchlichen Informationen lässt sich die Ausprägung der Funktion Marktentstehung nicht abschließend beurteilen.

Ressourcenmobilisierung

Für die Entwicklung von SMRs gibt es diverse Förderprogramme, die finanzielle Ressourcen für das Innovationssystem bereitstellen. Eine Übersicht beispielhaft ausgewählter Programme ist in Tabelle 8 aufgeführt.

Die Europäische Kommission unterstützt unter dem groß angelegten ‚*The Euratom Research and Training Programme*‘ (European Commission) F&E – Programme für SMRs. In diesem Programm wurde insbesondere das Projekt McSafer gefördert und beworben, welches zum Ziel hat, die Sicherheitsforschung auf dem Gebiet der SMRs weiterzuentwickeln (McSafer Projekt, 2024). Darüber hinaus hat sich in Europa im Februar 2023 eine Nuklearallianz aus 14 Ländern (sowie Italien als Beobachter) gegründet, mit dem Ziel eine unabhängige europäische Lieferkette zu schaffen und die Nuklearindustrie wieder zu beleben (Mire, 2024). Zahlen zu einem geplanten Fördervolumen konnten nicht gefunden werden.

Das Vereinigte Königreich beteiligt sich als einzelnes Land mit europäischen Kontext an der Förderung von SMRs, ebenso wie Frankreich, welches Teil der EU ist.

Kanada setzt in seinen Förderprogrammen zum einen auf die direkte Förderung von SMRs, aber auch auf die Förderung der Forschung an den nuklearen Nationallaboratorien. Die USA haben diese Jahr ein neues großes Förderprogramm für SMRs aufgelegt, genauso wie die Republik Südkorea.

Trotz der starken finanziellen Förderung der Entwicklung von SMRs, ist die Funktion Ressourcenmobilisierung auch von Herausforderungen geprägt. Davon sind insbesondere die unterstützenden Dienstleistungen, wie Lieferketten im Allgemeinen und die Bereitstellung von geeignetem Brennstoff im Speziellen, geprägt. Bezüglich der Lieferketten hält die OECD fest, dass die Unterbrechung des Baus von Kernkraftwerken in den 1980 – 1990er Jahren in den Mitgliedsländern der NEA zur Erosion von Kapazitäten geführt hat. Auch

Projekte in der jüngsten Zeit haben den Aufbau von Lieferketten nicht in dem notwendigen Maß ermöglicht. Die OECD glaubt, dass strategische Partnerschaften notwendig sind, um diese Herausforderung zu meistern (OECD & NEA, 2021a, S. 45).

Tabelle 8: Ausgewählte Förderprogramme für SMRs weltweit. Aufgeführt ist das Fördervolumen, der Förderer und ergänzende Informationen.

Fördervolumen	Förderer	Kurzbeschreibung
1,38 Mrd. EUR zunächst von 2021 – 2025, eine Ver- längerung um 2 Jahre ist geplant	Europäische Kommission	<i>The Euratom Research and Training Programme</i> Unterstützt u. a. F&E – Programme für SMRs. Die genaue Summe für SMRs ist nicht bekannt. (European Commission, 2021, S. 1 f.)
1 Mrd. EUR bis 2030	Frankreich	Investition in SMRs (Permanent Mission of France, 2021)
215 Mio. GBP Seit 2020	Vereinigtes Königreich	<i>Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution</i> und <i>Energy White Paper</i> Förderung von SMRs (GOV.UK, 2024b)
26 Mrd. CAD 1,2 Mrd. CAD	Provinz Onta- rio, Kanada	Überholung des nuklearen Sektors und Stärkung der Lieferketten Investitionen in das kanadische Nuklearlaboratorien
k. A	New Brunsw- wick, Kanada	Investitionen in ein SMR – Kernfor- schungs-cluster (Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018, S. 1 f.)
900 Mio. USD	USA	Unterstützung der Einführung von Generation III+ SMRs in Amerika, initiiert durch die Biden-Harris-Ad- ministration

(DOE, 2024)

216 Mio. USD	Republik Südkorea	Investment in ein SMR – Zentrum in Gyeongju, sowie einem nationalen SMR – Industriekomplex (WNA, 2024b)
---------------------	----------------------	--

Für den Kernbrennstoff werden in bisherigen Leistungsreaktoren Brennelemente mit einem Uran-Anreicherungsgrad von ca. 5 % U-235 verwendet. Darauf sind die kommerziellen Anreicherungsanlagen ausgelegt (OECD & NEA, 2021a, S. 20). Einige SMR-Konzepte benötigen jedoch LEU-Brennstoffe, d. h. Brennstoffe mit einem Anreicherungsgrad bis 20 % (OECD & NEA, 2021a, S. 45). Bisher wurden LEU-Brennstoffe aus HEU – Material aus den militärischen Vorräten der USA und Russland hergestellt. Dabei wird das HEU – Material mit abgereichertem Uran auf den gewünschten Anreicherungsgrad herunter gemischt. Die OECD verweist jedoch auf die Aussagen des U.S. DOE, wonach die amerikanischen Vorräte nur noch bis ca. 2030 – 2040 reichen würden. Sie hält weiter fest, dass die bestehende Infrastruktur für die neuen Anforderungen des für SMRs benötigten Brennstoffs erweitert, oder sogar neu aufgebaut werden muss (OECD & NEA, 2021a, S. 20).

Schaffung von Legitimität

Das Innovationssystem SMRs ist vor allem durch internationale Akteure, Projekte und Netzwerke geprägt. Ob sich ein Land für die Nutzung der Kerntechnik entscheidet, ist jedoch auch durch die jeweilige Meinung der Bürger zu dem Thema stark geprägt. Daher kann die Funktion Legitimität nicht global analysiert werden. Vielmehr müssten für eine umfassende Analyse einzelne Länder betrachtet werden. Allein in der EU beispielsweise zeigen sich schon Unterschiede zwischen Deutschland, welches aus der Kerntechnik ausgestiegen ist und Frankreich, welches für die Begrenzung des Klimawandels unter anderem auf eine nukleare Strategie setzt (bpb, 2023; WNA, 2024a).

Ein wichtiger Treiber für die Funktion Legitimität in einem jeweiligen Land kann der Klimawandel und dessen Bekämpfung bzw. Begrenzung sein. Die Wahrnehmung der Kernenergie hat sich in den letzten Jahren in vielen Ländern

deutlich gewandelt, wie folgendes Zitat des IAEA-Generaldirektors Rafael Mariano aus 2020 zeigt:

„The climate crisis and the energy crisis have prompted more countries to look to nuclear power as part of the solution, with public opinion polls all over the world showing an increasing acceptance rate for it,” (IAEA & Joanne Liou, 2024)

Die Kerntechnik sieht sich jedoch auch immer einer Diskussion bezüglich des sicheren Betriebs ausgesetzt. Besonders nach den Unfällen in Three Mile Island, Tschernobyl und zuletzt Fukushima. Es muss sich noch zeigen, ob SMRs durch ihre Eigenschaften diese Diskussion dauerhaft positiv beeinflussen können und sich mehr Länder für eine nukleare Strategie entscheiden. Ein weiterer Hinderungsgrund für die Legitimität von SMRs ist die Entsorgungsfrage für radioaktive Abfälle. Diese stellt sich auch für SMRs. Bei der Verwendung von SMRs mögen zwar kleinere Mengen von bestrahlten Brennelementen und hochradioaktiven Abfällen anfallen, die Notwendigkeit der Endlagerung ergibt sich trotzdem.

4.2 Identifizierung möglicher Schlüsselfaktoren für die Diffusion von Small Modular Reactors am Markt

4.2.1 Sicherheitsaspekte im Design

Die OECD hält in ihren Betrachtungen zu SMRs fest, dass einige Eigenschaften von SMRs allgemein die Sicherheitsbetrachtungen positiv beeinflussen. Zu diesen Eigenschaften gehören:

1. Effizienz passiver Sicherheitsmechanismen:

Verwendung passiver Sicherheitsmechanismen, wodurch die Abhängigkeit von aktiven Systemen und den damit verbundenen Fehlermöglichkeiten reduziert werden. Ein höheres Oberflächen – zu – Volumen – Verhältnis der kleineren Reaktorkerne begünstigt eine verbesserte Nachwärmeabfuhr und verlängert die Reaktionszeiten beim Ausfall von Systemen.

2. Weniger und weniger schwere Ausfallarten:

Passive Sicherheitsmechanismen und die damit verbundene Reduktion der Abhängigkeiten von aktiven Systemen, reduzieren insgesamt Fehlermöglichkeiten. Zum Beispiel verringern vereinfachte und dadurch widerstandsfähigere Reaktorkonstruktionen die Möglichkeiten für Undichtigkeiten und senken so die Wahrscheinlichkeit für Kühlmittelverluste. Höhere thermische Trägheit, sowie geringere Leistungsdichten der integralen Konstruktionen führen zu einer langsameren Reaktion bei Temperaturtransienten, wodurch Sicherheitsmargen erhöht werden.

3. Kleinere Kerninventare führen auch bei einem schweren Unfall zu einer geringeren Gefährdung. Dadurch können Notfallplanungszonen um den Standort der Reaktoren verringert werden.

4. Unterirdische Aufstellmöglichkeiten führen zu einem verbesserten

Schutz gegen Natur bedingte oder Menschen bedingte Ereignisse, wie zum Beispiel Erdbeben oder Flugzeugabstürze.

Diese Sicherheitsmerkmale gelten für die OECD sowohl für leichtwassergekühlte Reaktoren als auch für Advanced – Designs der Generation IV. Zusätzlich können je nach Reaktordesign weitere Sicherheitsverbesserungen zum Tragen kommen (OECD & NEA, 2021a, S. 29).

Eine verbesserte Sicherheit von Kernreaktoren könnte sich direkt auf die Funktion Legitimität auswirken, sofern sich die Bevölkerung eines Staates davon überzeugen lässt. Die Literatur zeigt, dass unterschiedliche Akteure diesen Aspekt aufgreifen und u. a. mit dem Thema Sicherheit Lobbyarbeit für SMRs betreiben. Ein Beispiel dafür ist das kanadische SMR – Roadmap Steering Committee, welches in seiner Technologie-Roadmap bereits am Anfang mit verbesserten Sicherheitsmerkmalen von SMRs wirbt (Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018, S. i)

Wie nachhaltig sich das Thema verbesserte Sicherheit von SMRs auf die Meinung von Bevölkerungen und die Politikakteure auswirkt, muss sich in der Zukunft erst noch zeigen. Die Funktion Legitimität könnte von einer verbesserten Sicherheitswahrnehmung gestärkt werden. Bisher wird sie vor allem durch den positiven Effekt der immer stärkeren Allianzen im Kampf gegen den Klimawandel gestützt.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass sich die verbesserte Sicherheit der SMRs gegenüber anderer Reaktortypen auch positiv auf die Funktion Marktstehung auswirkt. Dies würde vor allem dann zutreffen, wenn eine positivere Sicherheitswahrnehmung der Reaktoren länderübergreifend zu harmonisierten und vereinfachten Genehmigungsprozessen für SMRs führen und somit deren Attraktivität für Investoren erhöht.

4.2.2 Modularität als Schlüsselfaktor

Von der Modularisierung bei SMRs werden folgende positiven Effekte erwartet:

1. Serienfertigung von Komponenten in Fabriken und Zusammenbau der Module auf dem Reaktorgelände. Dabei sind Verbesserungen in der Fertigungsqualität sowie der Fertigungseffizienz zu erwarten, die sich im besten Fall dadurch auch in den Kosten für den Bau von SMRs niederschlagen (IAEA, 2021, S. 7).
2. Flexibilität durch Betriebsoptimierungen, die durch die Kopplung mehrerer Module miteinander möglich werden (IAEA, 2021, S. 7).
3. Senkung notwendiger Vorabinvestitionen durch die Verwendung fabrikgefertigter Module (OECD & NEA, 2021, S. 9) und Reduktion der Konstruktionszeiten (OECD & NEA, 2021, S. 24)

Im Innovationssystem wirkt sich die Modularität der SMRs auf die meisten Funktionen aus, wie in Abbildung 18 dargestellt. So führen Senkungen der Vorabinvestitionen voraussichtlich zu mehr Akteuren, die im Bereich der SMRs langfristig unternehmerisch tätig werden wollen. Dadurch wird die Funktion Unternehmerische Aktivität positiv beeinflusst. Auch eine verstärkte Nachfrage durch eine wirtschaftlichere Kostenstruktur stärkt diese Funktion, sowie die Funktion der Marktentstehung. Beide Funktionen wiederum beeinflussen sich gegenseitig positiv.

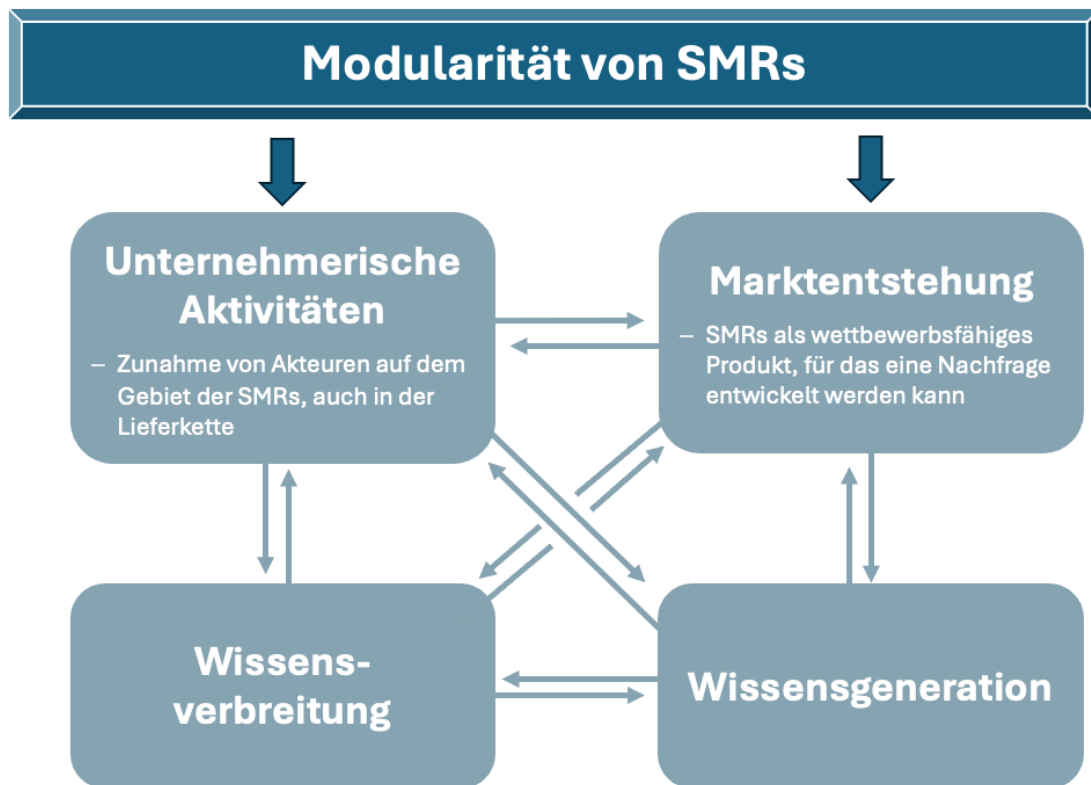


Abbildung 18: Auswirkungen des Schlüsselfaktors Modularität von SMRS auf die Funktionen des Innovationssystems.

Das Merkmal der Modularität ist besonders geeignet, um den Bau von mehreren Reaktormodulen auf dem gleichen Betriebsgelände oder den Bau von Flotten, also viele Reaktoren des gleichen Typs, zu ermöglichen. Diese Konstruktionsweise beeinflusst die Funktionen Wissensverbreitung und Wissensentstehung. Je häufiger der gleiche Reaktortyp gebaut wird, umso mehr kann für dessen Konstruktion gelernt werden, bis alle Beteiligten den Prozess durchoptimiert haben. Zusätzlich ist ein positiver Einfluss auf weitere Infrastrukturen, die sich um die Fertigung, den Transport und Zusammenbau der fabrikgefertigten Module bilden, zu erwarten.

Wie bereits im Abschnitt 1.1.1 angemerkt, sind die beschriebenen positiven Effekte bisher theoretisch und müssen in der Zukunft noch verifiziert werden. Mignacca und Locatelli führen in ihrer systematischen Literaturrecherche wissenschaftliche Untersuchungen an, die an der Wirtschaftlichkeit von SMRs zweifeln (Mignacca & Locatelli, 2020, S. 12). Diese werden auch durch die vom

Fraunhofer Institut angeführten Zahlen einer DIW-Studie nochmal bestärkt (Klöppelt, u. a., 2024, S.3). Sollten die Erwartungen, die an eine modulare Fertigung geknüpft sind, nicht erfüllt werden, ist von negativen Auswirkungen auf das Innovationssystem auszugehen. Insbesondere die Funktionen Unternehmerische Aktivität und Marktentstehung wären davon direkt negativ betroffen und infolgedessen die beiden Funktionen Wissensentstehung und Wissensverbreitung.

5 Vertiefende Experteninterviews zu den technischen Innovationssystemanalysen für TRIGA-Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors

Im folgenden Kapitel wird die Datenerhebung beschrieben, mit dem Ziel vertiefende Einblicke in die Innovationssysteme von SMRs und TRIGA zu gewinnen. In einem ersten Schritt wird die Entwicklung des Interviewleitfadens erläutert (Abschnitt 5.1), gefolgt von den aus den Interviews extrahierten Erkenntnissen (Abschnitt 5.2). Anschließend werden in Abschnitt 5.3. die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der Expert*inneninterviews behandelt. Die Identifizierung von Akteuren, welche die Diffusion von SMRs positiv beeinflussen können (Abschnitt 5.4) und eine Betrachtung der Limitationen der Untersuchung (Abschnitt 5.5.) bilden den Abschluss des Kapitels.

5.1 Entwicklung des Interviewleitfadens anhand der in den Innovationssystemanalysen herausgearbeiteten Aspekten

Für die Expert*inneninterviews wurde ein Interviewleitfaden als Erhebungsinstrument zur strukturieren Befragung verwendet. Der Zeitrahmen für die Interviews wurde mit ca. 60 Minuten je Interview angesetzt. Für den Fragenumfang wurde die Faustformel von Gläser und Laudel genutzt, die von ca. 8 – 15 Fragen pro Interviewstunde ausgeht (Gläser & Laudel, 2010, S. 144). Die Kapitel 3 und Kapitel 4 bildeten die Basis für die Festlegung der Themenschwerpunkte, welche aus den Analysen und dem Vergleich der beiden Innovationssysteme abgeleitet wurden. Die Analyse des Innovationssystems SMRs ergaben Schwächen bei der Funktion Marktentstehung, so dass diese als Untersuchungsgegenstand bestimmt wurde. Die jungen Unternehmen, die sich auf dem Gebiet der SMRs engagieren stehen in Konkurrenz zu den etablierten Akteuren, woraus ein weiterer Untersuchungsgegenstand abgeleitet wurde. Weiterhin sollten durch die Expert*inneninterviews die Schwächen im Innovationssystem identifiziert werden. Dafür wurden allgemein die Herausforderungen für SMRs aus Sicht der Expert*innen als Untersuchungsgegenstand

festgelegt, um diese anschließend den Funktionen des Innovationssystems zuzuordnen. Eine Übersicht der gewählten Themenschwerpunkte mit den abgeleiteten Untersuchungsgegenständen ist in Abbildung 19 aufgeführt.

1. Herausforderungen für SMRs

Hintergrund:

Das Innovationssystem SMRs weist Schwächen in einigen Funktionen auf.

Fragestellung:

Welchen Herausforderungen nehmen die Expert*innen für SMRs wahr?

2. Vergleich der Innovationssysteme SMR und TRIGA:

a. Geschwindigkeit der Reaktorentwicklung:

Hintergrund:

Beide Innovationssysteme weisen deutliche Unterschiede bei der Geschwindigkeit der Reaktorentwicklung auf.

Fragestellung:

Welche Faktoren beeinflussen die Geschwindigkeit des Entwicklungsprozesses von Reaktoren?

b. Bau von Prototypen:

Hintergrund:

Im Innovationssystem SMRs mangelt es an Projekten für den Bau von Prototypen. Hinzu kommt der Abbruch des NuScale Prototypen in den USA.

Fragestellung:

Wie wichtig schätzen die Expert*innen den Bau von Prototypen ein, um das Innovationssystem voranzutreiben?

c. Nachwuchs:

Hintergrund:

Zu Beginn der Kerntechnik zogen großen Namen auf dem Forschungsgebiet (inkl. Nobelpreisträger) Nachwuchs an. Auf diese Effekte kann die Kerntechnik heute nicht mehr setzen.

Untersuchungsansatz:

Mangelt es der Kerntechnik an Attraktivität um junge Talente zu gewinnen?

3. Marktentstehung für SMRs

Hintergrund:

Die Funktion Marktentstehung weist in der Analyse des Innovationssystems SMRs Widersprüche auf.

Untersuchungsgegenstand:

Wie ist der globale Markt für SMRs zu bewerten und welche Chancen und Hindernisse gibt es?

4. Junge Unternehmen im Bereich der SMRs

Hintergrund:

Es gibt viele junge private Unternehmen im Innovationssystem SMRs. Etablierte Unternehmen genießen Vorteile aufgrund ihrer jahrzehntelangen Erfahrung.

Untersuchungsgegenstand:

Wo liegen die Vorteile für junge Unternehmen und wie groß sind die Chancen, am Markt bestehen zu können? Inwiefern lassen sich die Voraussetzungen für junge Unternehmen heute mit den Voraussetzungen des Unternehmens General Atomics in den 50ern vergleichen?

Abbildung 19: Themenblöcke für die Expert*inneninterviews, inklusive der jeweiligen Hintergründe, sowie die daraus abgeleiteten Fragestellungen, die im weiteren Verlauf in Fragen für den Interviewleitfaden umgesetzt werden.

Die Fragenreihenfolge des Interviewleitfadens wurde nach den Regeln von Gläser und Laudel für die Erstellung eines Leitfadens festgelegt. Die ersten Fragen sollen für den Interviewpartner*innen ein angenehmes Thema enthalten und leicht zu beantworten sein. Das Gleiche gilt für die letzte Frage, die das Interview abschließt (Gläser & Laudel, 2010, S. 147 ff.). Aus diesem Grund wurden als Rahmen für das Interview zwei Eingangsfragen gewählt, die dem Interviewpartner*innen die Möglichkeit gaben, die eigene Expertise darzustellen und die Schlussfrage gab dem Interviewpartner*innen die Möglichkeit Denkanstöße und ihm/ihr wichtige Aspekte anzubringen. Weiterhin wurde beachtet, dass die Fragen mit einem gemeinsamen Themenschwerpunkt auch nacheinander behandelt wurden (Gläser & Laudel, 2010, S. 146).

Um der interviewten Person den notwendigen Kontext für die Fragen bereitzustellen, wurden für die Themenblöcke jeweils einleitende Informationen zusammengestellt. Für die Fragestellung wurden die Gütekriterien nach Gläser und Laudel verwendet (Gläser & Laudel, 2010, S. 131–142).

Auf Grundlage dieser Überlegungen wurde in einem ersten Schritt ein deutschsprachiger Interviewleitfaden erstellt (siehe Anhang VII). Die Mehrheit der Interviewpartner*innen stammt aus einem internationalen Kontext, weshalb als Interviewsprache Englisch festgelegt wurde. Dies gilt auch für die deutschen Teilnehmer der Interviews. Infolgedessen war es erforderlich, den ursprünglich in deutscher Sprache entwickelten Fragebogen ins Englische zu übersetzen. Dafür wurde „ChatGPT.com“ mit dem Befehl „Übersetze mir das folgende Dokument“ verwendet. Anschließend erfolgte eine Prüfung der Übersetzung, sowie Anpassungen, um die ursprüngliche Intention der Fragen zu bewahren. Der auf diesem Vorgehen basierende Interviewleitfaden in Englischer Sprache ist ebenfalls im Anhang VII beigefügt.

Eine Evaluierung des Leitfadens erfolgte nach dem zweiten Interview. Dieses Vorgehen wird von Gläser und Laudel empfohlen, wenn vorab keine Probeinterviews durchgeführt werden können (Gläser & Laudel, 2010, S. 150). Es wurden folgende Anpassungen auf Basis der gewonnenen Erfahrungen vorgenommen:

1. Die ursprüngliche Reihenfolge der Themenblöcke wurde modifiziert. In den ersten beiden Interviews ergab sich die Notwendigkeit den Themenblock zu jungen Unternehmen im Interview vorzeitig zu behandeln, um im Kontext zu bleiben.
2. An Stellen, an denen es zu Missverständnissen gekommen war, wurden geringfügige Anpassungen bei der Fragestellung bzw. den Hintergrundinformationen vorgenommen, um die Verständlichkeit zu erhöhen.
3. Die Frage nach der Unterstützung junger Unternehmen bei der Umsetzung ihrer Konzepte wurde entfernt, da diese in beiden Interviews bereits implizit beantwortet wurde.

Der angepasste Fragebogen befindet sich im Anhang VII und wurde in den nachfolgenden Interviews verwendet.

5.2 Zusammenfassender Überblick über die Interviews und die extrahierten Erkenntnisse

Ausgehend von den Themenblöcken wurden Kategorien zur Codierung und Auswertung der Interviews entwickelt. Die verwendeten Kategorien und Sub-Kategorien für die Codierung zu den jeweiligen Themenblöcken sind in einer Übersicht in Anhang II aufgeführt.

Die Aussagen der Interviewpartner*innen spiegeln ihre persönlichen Meinungen und Ansichten wider. Obwohl die Auswahl der Interviewpartner*innen auf Grundlage ihres beruflichen Hintergrunds erfolgte, um eine möglichst breite Auswahl an Akteuren abzubilden, äußern die Expert*innen sich nicht im Namen ihres Arbeitgebers oder einer Organisation. Die Transkripte der Interviews, inkl. der codierten Stellen, sind als digitaler Anhang VIII dieser Arbeit beigefügt.

1. Herausforderungen für SMRs

Für die Auswertung wurden die von den Expert*innen genannten Herausforderungen den sieben Funktionen eines Innovationssystems zugeordnet (vgl. Abschnitt 2.1). Dafür wurden in der Auswertung mit MAXQDA entsprechende Kategorien, die nach der jeweiligen Funktion benannt sind, benutzt. Mit der Information, welche der Funktionen die meisten Textstellen zugeordnet wurden, soll identifiziert werden, in welchen Funktionen die meisten Schwächen zu finden sind. Textstellen, die keiner Funktion zugeordnet werden konnten, wurden unter „Sonstiges“ kategorisiert.

Die Anzahl der codierten Segmente für die jeweilige Funktion wurden mit dem Programm MAXQDA ausgewertet und in Abbildung 20 grafisch dargestellt.

Herausforderungen für SMRs

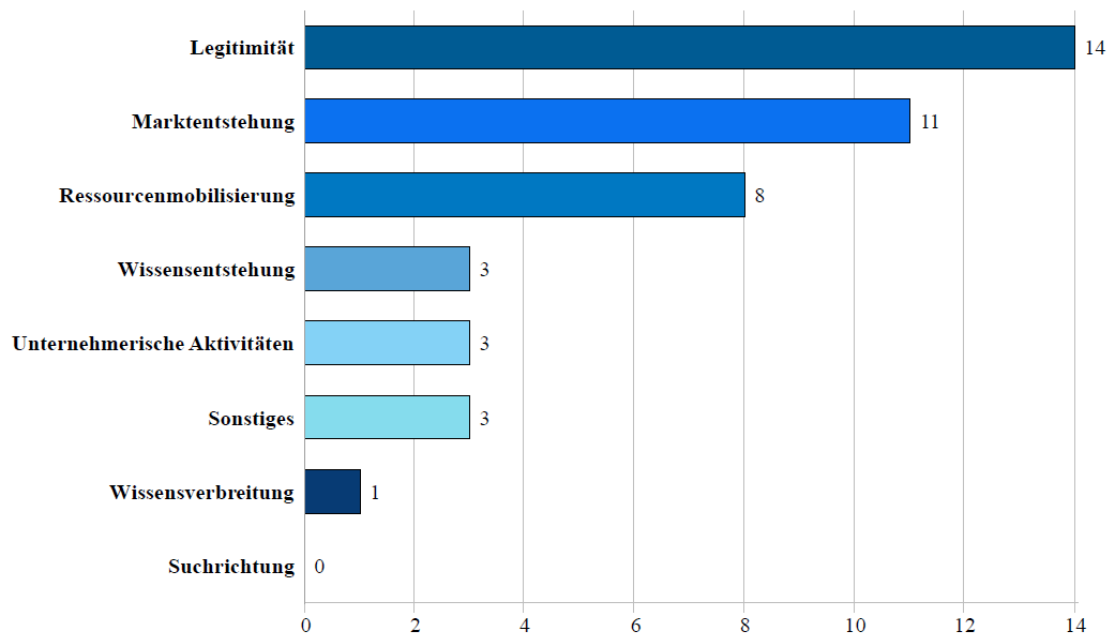


Abbildung 20: Übersicht über die Anzahl der codierten Segmente für den Themenblock "Herausforderungen für SMRs", kategorisiert nach den Funktionen eines Innovationssystems.

Die in der Abbildung 20 nach Funktionen zusammengefassten Herausforderungen sind in Tabelle 9 detailliert aufgeschlüsselt. Die von den Interviewpartner*innen genannten Aussagen sind zusammen mit den Textbelegen aufgeführt. Vergleichbare Aussagen wurden zusammengefasst.

Tabelle 9: Ergebnisse aus der Expert*inneninterviews des Themenblocks "Herausforderungen für SMRs", kategorisiert nach den Funktionen eines Innovationssystems. Dargestellt sind die in den Interviews genannten Herausforderungen und die dazugehörigen Textstellen.

Unternehmerische Aktivität

In den Interviews genannte Herausforderung	Textstellen
Es fehlt an einem ausgereiften Produkt, welches ein Momentum am Markt nutzen kann.	I-7, Pos. 17 + 39
Es benötigt Firmen mit genügend Ressourcen, die bereit sind das Risiko einzugehen ein FOAK-Projekt durchzuführen.	I-1, Pos. 66 f.

Wissensentstehung

Staaten müssen die F&E – Bemühungen in Bereichen der Kerntechnik erhöhen, die die Kapazitäten von Firmen übersteigen, wie zum Beispiel die Entwicklung neuer Kernbrennstoffe.	I-3, Pos. 25; I-2, Pos. 38 f.
In der nuklearen Industrie ist in der Vergangenheit Wissen verloren gegangen, nachdem die Bautätigkeiten für Reaktoren in den 80er Jahren abgenommen haben. Fachpersonal benötigt jedoch Möglichkeiten zu lernen.	I-7, Pos. 25

Wissensverbreitung

Aufsichtsbehörden müssen sich stärker auf die Anforderungen einstellen, die SMRs mit Advanced – Reaktor – Designs nach sich ziehen.	I-2, Pos. 39
---	--------------

Suchrichtung

–	–
---	---

Marktentstehung

In der Konkurrenz zu großen Kernkraftwerken mangelt es SMRs an der Wettbewerbsfähigkeit, wenn es um eine reine Stromproduktion geht. Sie müssen eine andere Nische für sich finden.	I-2, Pos. 11
Für Länder wie China, die USA und auch für Europa sind in Hinblick auf die Stromnetze große Kernkraftwerke sinnvoller als SMRs.	I-6, Pos. 51
SMRs befinden untereinander in einer Konkurrenzsituation. So wurde für jene Firmen, die sich zuerst am Markt durchsetzen, die höchsten Chancen für ein Bestehen eingeräumt, wodurch der Markt für andere Teilnehmer schwerer zugänglich wird.	I-5, Pos. 43
Es gibt die Sorge, dass westliche Firmen am Markt durch chinesische Akteure abgehängt würden, wenn dieser für westliche Firmen nicht relevant genug gestaltet wird.	I-3, Pos.77
SMRs sind eine sehr teure Technologie.	I-6, Pos. 52 I-1, Pos. 66 f.

	Dem Markt mangelt es an Aktivitäten hinsichtlich des Baus von SMRs, stattdessen werden große Kernkraftwerke gebaut.	I-1, Pos. 74 + 77; I-2, Pos. 43
--	---	---------------------------------------

Ressourcenmobilisierung

Die Investitionskosten für SMRs sind hoch und wenn die Finanzierung nicht gesichert ist, werden andere Energieträger bevorzugt. I-5, Pos. 47

Die staatlichen Infrastrukturen wie Nationallaboratorien müssen auch für junge Unternehmen zugänglich gemacht werden, damit diese ihre Brennstoffe und Materialien testen können. I-2, Pos. 38

Universitäten müssen ausreichend und gut ausgebildete Fachkräfte für die Nuklearindustrie bereitstellen. I-2, Pos. 41

Für die Kerntechnik allgemein gilt: Die Beschaffung von Systemen und Komponenten in der benötigten Qualität für Kraftwerksprojekte ist schwer geworden, da es an kompetenten Lieferanten und Herstellern mangelt. I-4, Pos. 14

Diese Kapazitäten sind in der Vergangenheit mangels Projekten abgebaut worden und sind dadurch verloren gegangen. Diese Kapazitäten müssen jetzt erst wieder aufgebaut werden. I-4, Pos. 14;
I-1, Pos. 23;
I-7, Pos. 25
I-2, Pos. 43

Bezogen auf SMRs benötigt es für den Aufbau der Lieferketten verbindliche Zusagen zum Bau einer größeren Anzahl an Reaktoren (es wurden 5 – 20 genannt), damit die notwendigen Investitionen in die Lieferketten erfolgen. f.

Legitimität

Die Haltung der Menschen gegenüber der Kerntechnik setzt die Rahmenbedingungen für die Regierungen von Ländern. Wenn eine Mehrheit der Bevölkerung, gegen Kerntechnik ist, bedeutet dies, dass es für diese Technologie keinen Markt gibt, wie das Beispiel Deutschland zeigt. I-3, Pos. 17
+ 71;

Es werden jedoch auch eine leichte Verbesserung wahrgenommen. I-7, Pos. 19,

Bereits in Schulen sollte ausgewogen über die Chancen und Risiken der Kernenergie informiert werden, damit die Bevölkerung eine fundierte Entscheidung für oder gegen diese Technologie treffen kann.	I-4, Pos. 46
Politische Überlegungen spielen in der Kernindustrie eine starke Rolle und können schwerer als ökonomische oder technologische Überlegungen wiegen.	I-7, Pos. 37, I-8, Pos. 80, I-4, Pos. 14
Unterschiedliche regulatorische Anforderungen in verschiedenen Ländern erschweren neuen Marktteilnehmern den Zugang zur Technologie.	I-5, Pos. 47, I-1, Pos. 81, I-6, Pos. 17
Ein stufenweiser Ansatz („graded approach“) wird als wichtiges Instrument angeführt, um die Anforderungen an nukleare Anlagen auf die entsprechenden Merkmale der Anlage anzupassen.	I-6, Pos. 58 + 60
Die Frage der Entsorgung von radioaktiven Abfällen wird auch durch SMRs nicht gelöst und wird damit die gesellschaftlichen Debatten nicht verändern.	I-2, Pos. 48

Andere Herausforderungen, die keiner der Funktionen zugeordnet werden können

Eine Zukunftsvision für die Kernenergie könnte die notwendigen Investitionen in die Infrastruktur und Lieferketten attraktiv zu gestalten.	I-1, Pos. 28, I-4, Pos. 14
Oftmals sind die Länder mit den finanziellen Ressourcen und der Technologie (Bsp.: China und Indien) nicht diejenigen Länder mit dem notwendigen Rohstoff Uran (Bsp.: Namibia, Niger). Oder es gibt Länder, die sowohl die Rohstoffe als auch die Finanzkraft haben eine Nuklearindustrie aufzubauen, aber diese Länder setzen auf eine nicht-nukleare Strategie (Bsp.: Australien). Dadurch sind die Akteure in der Kerntechnik strukturell limitiert.	I-6, Pos. 10

2. Vergleich der Innovationssysteme SMRs und TRIGA – Forschungsreaktor

a) Geschwindigkeit bei der Reaktorentwicklung:

Die schnelle Reaktion von Frederic de Hoffmann und General Atomics auf den sich öffnenden Markt (vgl. Abschnitt 2.2.1) hat zu einem großen Teil zur erfolgreichen Verbreitung von TRIGA – Reaktoren beigetragen. Im Vergleich dazu brauchen heutige Konzepte, SMRs wie auch andere Reaktoren, sehr viel länger in der Entwicklung.

Für die Auswertung wurden die Aussagen der Expert*innen nach Bedingungen, die die Entwicklung verlangsamen oder beschleunigen können, kategorisiert. Ergänzend wurde ausgewertet, welche Haltung die Interviewpartner*innen gegenüber der Geschwindigkeit eingenommen haben.

Die Bewertungen bezüglich der Entwicklungsgeschwindigkeit lag bei den Expert*innen über das ganze Spektrum verteilt, mit dem einen Pol, dass die Entwicklungszeiten angemessen sind und dem anderen Pol, dass die Entwicklungszeiten zu lang sind, insbesondere da SMRs „dringend jetzt benötigt“ werden.

“I think the time it needs it's appropriate, because if the design or let's say the project is not well prepared then you have to do the modifications to it before you build it before you start to operate.” (I-6, Pos. 8)

“Yes, it's taking too long, because honestly, these technologies are urgently needed now. And if we wanna have, you know, if we want nuclear to have an impact using more modular reactors on things like energy security or energy decarbonization, then you can't wait 6-7 years for development and then another five or six years for construction. You know, it becomes very, very long. So, it's got to shrink down somehow.” (I-2, Pos. 11)

Die Faktoren die von den Expert*innen für eine Verzögerung der Reaktorentwicklung benannt wurden, sind in Abbildung 21 angeführt. Die Häufigkeit der Nennung spiegelt die Größe der in der Grafik verwendeten Blasen wider, um die Wichtigkeit des Themas zu unterstreichen.

Die meisten Expert*innen haben das Thema Regularien als einen Faktor benannt, der Auswirkungen auf die Konstruktions- und die Entwicklungszeiten

von Reaktoren hat. Es waren sich jedoch alle Expert*innen einig, bei der Bedeutung der Aufgaben der Aufsichtsbehörden. Keiner der Befragten wünschte sich einen Rückschritt in dieser Frage.

„I mean when it comes to safety, of course you don't wanna compromise. You wanna make sure that you're that you're doing things safely.“ (I-2, Pos. 36)

Umstände, die die Reaktorentwicklung verlangsamen

im Vergleich zu den 1950er – 1980er Jahre

Nach Angaben der Interviewteilnehmenden

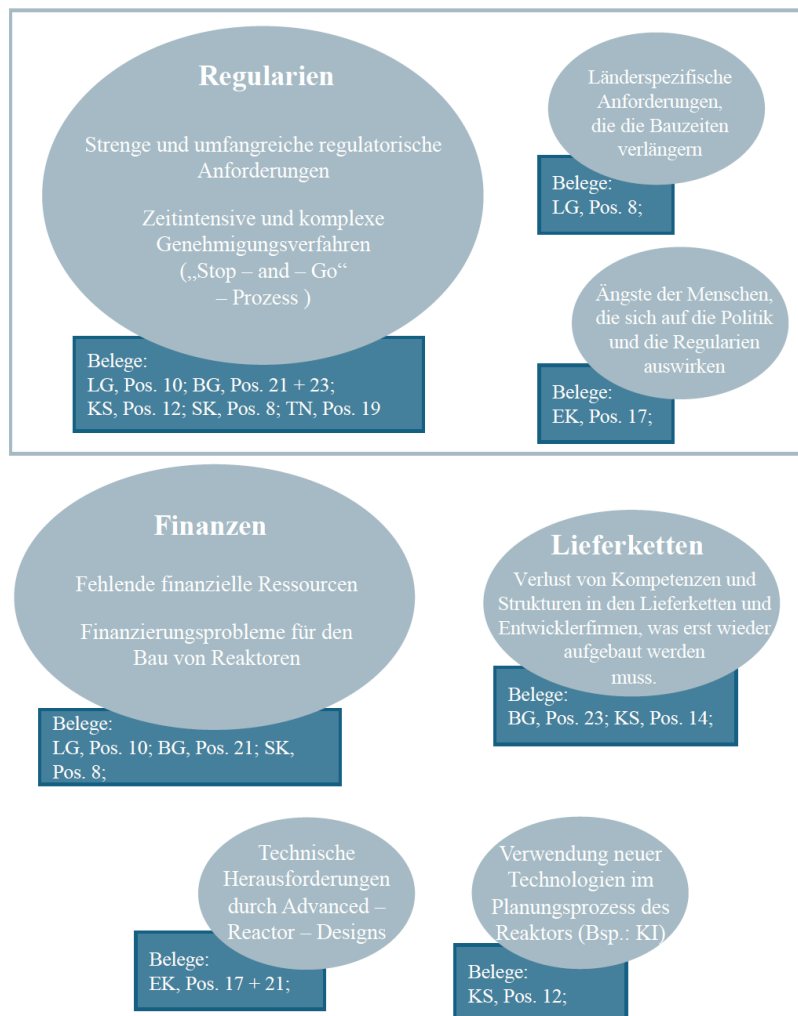


Abbildung 21: Auswertung der Expert*inneninterviews zu dem Thema „Entwicklungsgeschwindigkeiten von Reaktoren“. Es sind die Umstände dargestellt, die heute zu längeren Entwicklungszeiten führen, im Vergleich zu den 1950er -1980er. Die Größe der Blasen repräsentiert die Häufigkeit der Antworten.

Die von den Expert*innen genannten Maßnahmen, um die Entwicklungszeiten für Kernreaktoren zu beschleunigen, wurden in der nachfolgenden Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Auswertung der von den befragten Expert*innen genannten Maßnahmen, um die Entwicklungszeit von Kernreaktoren zu verkürzen.

<u>Maßnahmen für die Verkürzung von Entwicklungszeiten bei Kernreaktoren</u>	
Bereitstellung von ausreichend Ressourcen, insbesondere was die Finanzierung der Projekte betrifft.	I-5, Pos. 10; I-1, Pos. 11; I-7, Pos. 8
Harmonisierung internationaler Regelwerke, so dass der Reaktor in verschiedenen Ländern unter gleichen Bedingungen gebaut werden kann.	I-5, Pos. 10; I-7, Pos. 8; I-4, Pos. 14;
Kurze Antwortzeiten bei Aufsichts- und Regulierungsbehörden.	I-5, Pos. 10
Begrenzte Anzahl an Innovationen in einem Design verwenden. Neuere Designs mit erprobten und lizenzierten Materialien umsetzen.	I-2, Pos. 13
Vereinfachung des Konstruktionsprozesses.	I-7, Pos. 8
Wiederholt Reaktoren gleichen Typs bauen und die Konstruktionszeiten durch den Übungseffekt senken	I-2, Pos. 13; I-7, Pos. 10; I-1, Pos. 27 f.;; I-4, Pos. 42
Eine starke Nachfrage für die Reaktoren gekoppelt mit einer starken Motivation (Bsp.: Energiekrise), damit ein Interesse an schnelleren Konstruktionszeiten entwickelt wird.	I-6, Pos. 12
Starke Lieferketten.	I-4, Pos. 14

b) Bau von Prototypen:

In den Interviews waren sich alle Expert*innen einig, dass der Bau von Prototypen für das Vorankommen von SMRs unerlässlich ist. Sie sind notwendig, um zu beweisen, dass das jeweilige Design gebaut und betrieben werden kann und welche Kosten entstehen. Zusätzlich dienen sie dem Erfahrungsgewinn. Gleichzeitig wird der Schritt einen Prototyp zu bauen als sehr herausfordernder Schritt beschrieben (I-7, Pos. 13).

Eine interviewte Person hält fest, dass das abgebrochene NuScale Projekt (vgl. Abschnitt 4.1) nicht daran gescheitert sei, dass es sich um einen Prototyp handelt, sondern an den Rahmenbedingungen. So sei die Struktur des Designs zu teuer und der Kunde, mit dem das Projekt durchgeführt werden sollte, zu kleinteilig organisiert, zu wenig erfahren und finanziell zu schwach gewesen (I-2, Pos. 15).

Eine interviewte Person äußerte den Eindruck, dass sich bezüglich des Baus von Prototypen bisher „nichts bewegt“ und bekräftigte, dass Frankreich am Bau eines Prototyps festhalte (I-1, Pos. 34 + 35). Von einer anderen interviewten Person wurde das BWRX-300 Projekt in Darlington, Ontario in Kanada als solide eingestuft (I-2, Pos. 15 + 17).

Zu den aufgeführten Gründen für die geringe Anzahl an gebauten Prototypen zählen:

- Weder Unternehmen noch Staaten wollen das Risiko tragen, welches damit einher geht, „der Erste“ zu sein. Damit sind sowohl finanzielle Risiken gemeint als auch das Risiko, dass der Reaktor nicht in Betrieb gehen kann, falls im Design fundamentale Fehler vorhanden sind (I-6, Pos. 19).
- Die benötigten finanziellen Ressourcen für einen solchen Prototyp, sowie die Anstrengungen und Zeit, die für ein solches Projekt notwendig sind (I-4, Pos. 16; I-8, Pos. 16).

Es wurde jedoch auch festgehalten, dass sich der Bau von Prototypen trotz der Herausforderungen und des benötigten Investments auf lange Sicht lohnen könnte.

“It, of course, requires quite an investment in money, in time again and efforts, but I think it can help a lot in proving certain innovative concepts.

I would expect that this type of investment would pay off on the longer term with facilitating the construction of reactors afterwards.” (I-4, Pos. 16)

C) Personeller Nachwuchs:

Im Rahmen der Analyse der Antworten zum Thema Nachwuchs zeigte sich, dass diese in deutlich höherem Maße durch das jeweilige Umfeld der interviewten Personen beeinflusst wurden als Antworten zu anderen Fragestellungen. Dies fiel besonders stark bei den Antworten zweier deutscher Expert*innen auf. Die Frage danach, ob die Kerntechnik für junge Talente noch attraktiv genug sei, wurde von den Expert*innen sehr unterschiedlich bewertet. Oftmals wurden die Aussagen an Regionen oder Ländern festgemacht. Die Länder, die als positive Beispiele für die Attraktivität junger Talente angeführt wurden sind in Abbildung 22 dargestellt. Als positive Beispiele wurden Aussagen gewertet, in denen einem Land genügend Nachwuchs zugesprochen wurde oder für das ein wachsendes Interesse an der Kerntechnik attestiert wurde.

Länder die als positive Beispiele für die Gewinnung junger Talente in der Kerntechnik genannt wurden

– Frankreich (EK, Pos. 28; BG Pos. 30, TN Pos. 35)	– Kanada (LG, Pos. 18)	– Niederlande (BG, Pos. 30)
– USA (LG, Pos. 18; BG Pos. 30, TN Pos. 35)	– Italien (BJ, Pos. 19)	– Polen (NT, Pos. 47)
– Kanada (LG, Pos. 18)	– UK (BG, Pos. 30)	– Rumänien (NT, Pos. 47)
– China (LG, Pos. 18; NT, Pos. 47)	– Skandinavien (BG, Pos. 30)	– Bulgarien (NT, Pos. 47)

Abbildung 22: Auswertung der Interviews hinsichtlich der Frage nach der Attraktivität der Kerntechnik für junge Talente. Die aufgeführten Länder wurden als positive Beispiele für die Bewertung der Attraktivität angeführt.

Deutschland wurde von den meisten Interviewten aufgrund der anti-nuklearen Haltung eine schwierige Situation in Nachwuchsfragen zugesprochen (I-3, Pos. 28; I-1, Pos. 30; I-6, Pos. 47; I-8, Pos. 25 + 33 – 35). Das gegenteilige Beispiel dazu ist Italien, dass in der Vergangenheit ebenfalls eher zurückhaltend der Kerntechnik gegenüberstand, in dem jedoch in den letzten Jahren ein wachsendes Interesse an nuklearen Disziplinen beobachtet wurde (I-2, Pos. 19). Für

Frankreich wurde von einer interviewten Person einerseits Interesse bei jungen Menschen für die Kerntechnik beobachtet, jedoch gleichzeitig festgehalten, dass mehr Personen für die kommenden Projekte benötigt werden (I-1, Pos. 23 + 30).

Als Beweggründe, aus denen sich junge Menschen für eine Laufbahn im nuklearen Bereich interessieren, wurden folgende Aspekte genannt:

- Junge Menschen wollen Innovationen auf dem Gebiet voranbringen und die Technologie wird nicht als langweilig wahrgenommen (I-1, Pos. 30 – 32; I-2, Pos. 21)
- Der Klimawandel (I-2, Pos. 19; I-7, Pos. 17)
- Energiesicherheit (I-2, Pos. 19)
- Wachsendes Interesse an nuklearen Anwendungen in der Medizin, Landwirtschaft (I-7, Pos. 17; I-3, Pos. 28)
- Die Entwicklungen in der Fusionstechnologie (I-2, Pos. 19; I-7, Pos. 17)

Die Motivation der Nachwuchskräfte wurde als hoch eingestuft, es wurde jedoch auch angesprochen, dass in der Kerntechnik Innovationen lange brauchen, wodurch junge Menschen frustriert werden können.

“So that is my fear. Nuclear is back in a lot of countries, this is good, the mentality, the opinion of the young is changing, which is good. They may be frustrated by the fact that innovation will be limited.” (I-1, Pos. 32)

“And I can tell you that when I was in Finland, for the commissioning of the Finnish EPR we had a lot of young colleagues from especially France. But there are also some younger, already partially experienced Chinese colleagues who worked on the commissioning of the Chinese EPR before and they were, in my opinion, highly motivated when they arrived. Some kept the motivation, and some learned from this experience that such a complex project is not an easy way to gain success.” (I-5, Pos. 18-19)

2. Markterwartung für SMRs

Für die Auswertung der Markterwartung für SMRs wurden die Textstellen, die der Kategorie Markterwartung zugeordnet wurden, in die Subkategorien positive, negative bzw. uneindeutige Markterwartung differenziert.

Die Ergebnisse, die aus den Interviewantworten der Expert*innen extrahiert werden konnten, wurden in den nachfolgenden beiden Darstellungen Abbildung 23 für die positive, und Abbildung 24 für die eher negative Markterwartung zusammengefasst. Bei der eher negativen Markterwartung wurden Begründungen der Expert*innen, warum sie eine Markterwartung für schwierig abzuschätzen halten, mit aufgenommen. Für die Länder USA und Frankreich haben sich die von verschiedenen Expert*innen geäußerten Markterwartungen unterschieden. Beide Positionen wurden in die jeweilige Abbildung mit aufgenommen.

<u>Eher positive Markterwartungen für SMRs</u>	
<u>Nach Angaben der Interviewteilnehmenden</u>	
Regionen	Länder
<p><u>Allgemein:</u></p> <p>Ländliche oder abgelegenen Regionen mit geringer Infrastruktur (LG, Pos. 41)</p> <p>Regionen mit kleinen Stromnetzen, in den kleine Reaktoren mehr Sinn machen (BJ, Pos. 46)</p> <p>Regionen mit geringer Bevölkerungsdichte und kleinen Industriezentren (LG, Pos. 41)</p> <p><u>Explizit genannt:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Südostasien – Baltische Staaten – Südamerika – Naher Osten – Afrika <p>(EK, Pos. 67; BJ, Pos. 46; BG, Pos. 7 + 34 + 66)</p>	<p><u>Allgemein:</u></p> <p>Kleine Länder (NT, Pos. 52)</p> <p><u>Explizit genannt:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – Frankreich – Vereinigtes Königreich – China – Kanada – Indien – USA – Polen – Mongolei – Tschechische Republik – Franz. – Slowakei Überseegebiete: – Estland Réunion, – Südamerika Guadeloupe – Russland (Sibirien) <p>(EK, Pos. 67; NT Pos. 36 + 51f.; LG, Pos. 41; BG, Pos. 35; TN Pos. 80)</p>
Bedingungen die Erfüllt sein müssen	
<ul style="list-style-type: none"> – SMRs halten das Versprechen der modularen Bauweise, inkl. Fabrikfertigung und dem Zusammenbau der Module am späteren Aufstellungsort (EK, Pos. 67) – Es stehen keine anderen Energiequellen wie beispielsweise Kohle, Sonne, Wind zur Verfügung (LG, Pos. 41; BJ, Pos. 46) – Bestrebungen CO₂ im Energiemix zu reduzieren sind vorhanden bzw. werden ernstzunehmend verfolgt (LG, Pos. 49) – Bau von Flotten, um Synergieeffekte zu nutzen (KS, Pos. 42) 	
Anwendungsfälle, denen die größten Chancen am Markt eingeräumt werden	
<ul style="list-style-type: none"> – Prozesswärme für die Industrie, Bsp.: Chemische Industrie (NT, Pos. 49) – Andere Anwendungen als Strom, Bsp.: Kraft – Wärme – Kopplung; Kombination aus Elektrizität und Wärme (BJ, Pos. 11; NT, Pos. 52) – In Ländern mit Sicherheitsrisiken: Betrieb der SMRs durch einen externen Dienstleister, der auch die Betriebsmannschaft stellt und dem Aufstellungsland des Reaktors den Strom verkauft (NT, Pos. 52 f.) 	

Abbildung 23: Auswertung der Expert*innenninterviews zu dem Themenblock "Markterwartung". Dargestellt sind Länder und Regionen, für die eine positive Markterwartung ausgedrückt wurden, sowie die Bedingungen und Anwendungsfälle, die den Einschätzungen zu Grunde liegen.

Eher negative Markterwartungen für SMR

Nach Angaben der Interviewteilnehmenden

Länder und Regionen für die keine oder nur wenige SMR – Projekte erwartet werden:

- Europa, bzw. “reiche“ Regionen Europas (EK, Pos. 67; BG, Pos. 66)
- Deutschland (EK, Pos. 67)
- USA (mit dem Zusatz: für die Stromproduktion, höchstens für Industrieprojekte) (BJ, Pos. 46)
- Frankreich, ohne die Überseegebiete (BG, Pos. 34 f.)

Hinderungsgründe:

- Konkurrenzsituation zu anderen Energiequellen, inkl. Erneuerbare Energien (LG, Pos. 41; BJ, Pos. 46)
- Zu wenige Aufträge, damit Akteure in der Lieferungskette zuverlässig planen und Infrastruktur und Kapazitäten aufbauen können (BJ, Pos. 43)
- Zu vorsichtige Käufer, die der neuen Technologie aufgrund von Unsicherheiten mit Zurückhaltung begegnen (BG, Pos. 66)
- Politische Rahmenbedingungen (NT, Pos. 51)

*Abbildung 24: Auswertung aus den Expert*inneninterviews zu dem Themenblock "Markterwartung". Dargestellt sind Aussagen über Länder und Regionen mit eher negativer Markterwartung, sowie Hinderungsgründe, die den Annahmen zugrunde liegen.*

Sofern von den Expert*innen eine Unterscheidung zwischen den Reaktorkonzepten vorgenommen wurde, haben sie die Markterwartung für leichtwassergekühlte SMRs überwiegend besser bewertet. Für Advanced – Reaktor – Designs sei es schwer einen Markt abzuschätzen (I-1, Pos. 7).

Für die jeweiligen Länder und Regionen gab es überwiegend Übereinstimmungen in den Aussagen der Expert*innen. Widersprüche gab es, wie bereits oben erwähnt, bei den Markterwartungen für Frankreich und die USA. Im Falle von Frankreich wurde von einer befragten Person ein Markt für SMRs gesehen (I-3, Pos. 67), während ein Experte mit französischem Hintergrund diesen nur für die französischen Überseegebiete sieht (I-1, Pos. 34 f.). Auch im Beispiel USA widersprechen sich die Ansichten der in den USA ansässigen Person (I-2, Pos. 46 f.) von den Markterwartungen der Personen außerhalb der USA.

Bereiche in denen Verbesserungspotential für die Marktentwicklung gesehen werden, sind vor allem die Finanzierung der Projekte, sowie politischen

Rahmenbedingungen. Als kritisch wurde von mehreren Interviewpartner*innen der Mangel an Unternehmen und/oder Staaten erachtet, die bereit sind das Risiko auf sich zu nehmen und SMRs zu bauen, um zu zeigen, ob diese wettbewerbsfähig betrieben werden können.

“As I said, we need the product. That's the only way. So really the large enterprises or like a national owned entity should, without considering cost, prototyping something. Which is the process, I would say, that is not economically viable, but we have to take that price to develop a mature product that could be profitable.” (I-7, Pos. 39)

“Look at UK, UK is a good example. The talk SMRs since 20 years. What is going on today? We have the two EPR in Hinkley Point which are under construction and two more that will arrive in Sizewell C and maybe two more, I don't know in which size but that is the reality. Big, big, reactors, 1700 MW electric. And the guy from Rolls-Royce is still waiting.” (I-1, Pos. 77)

Von einem Interviewpartner*innen wurde hervorgehoben, dass eine Markterwartung für SMRs grundsätzlich schwer abzuschätzen ist, da in der Nuklearindustrie politische Überlegungen eine größere Rolle spielen als in anderen Industriezweigen. Die Nuklearindustrie ist weniger technologie- oder ökonomiegetrieben, was zu berücksichtigen sei.

“[...] it's a very complex market and I think if you're talking about the nuclear industry, it's not technology driven. Now we are seeing it's not even economically driven. It may involve a lot of political considerations and things like that. So, it's beyond the technology, it's beyond the economics. So, if you only investigate the market of SMR from economic or technology viewpoint, you are not treated the court factor of this. So, like no matter how good the product is, how profitable there might be a SMR, Germany will not build any SMR. So, I mean then how can you evaluate the market? (I-7, Pos. 37)

3. Junge Unternehmen und ihre Rolle und Herausforderungen im Innovationssystem SMRs

Die Interviewpartner*innen erachten die Rolle junger Unternehmen vor allem als Ideenschmiede für das Innovationssystem. Sie bieten den Rahmen, um „frische Ideen“ zu entwickeln, die in etablierten Unternehmen an der vorherrschenden Einstellung oder der Bürokratie scheitern (EK, Pos. 30). Sie führen mit diesen neuen Ideen zusätzlich dazu, dass auch andere Akteure im Innovationssystem offen für die Ideen bleiben (I-4, Pos. 29). Gleichwohl betonen die Interviewpartner*innen, dass die Kapazitäten der jungen Unternehmen begrenzt sind. Sobald es um den Bau von Prototypen oder kommerziellen Anlagen geht, benötigen Start-ups mehr Geld oder etablierte Partner*innen mit der notwendigen Erfahrung und dem notwendigen Geld.

„They have to boost ideas, they have to develop, and they have to make proof of principles. But then, if it comes to larger scale, you need a large company in this field.” (EK, Pos. 41)

“The Startups and entrepreneurs that you have in the private sector are usually devoted to check some new concepts. New concepts can sometimes also mean that these are actually old concepts that you find in the textbooks from the 1950s, that are now in the position to be reanalyzed, reinvestigated so that you can draw your conclusions. [...] You need them also to keep the SMR development alive and you need them also to build knowledge especially to avoid that all the players are biased by the experience from the traditional concepts” (I-5, Pos. 22)

“ if you are talking only about nuclear power plant or small modular reactor, the only way of generating revenue clear way is to sell electricity. Having an existing that's the only way. [...] But to get there you need to invest significantly. It's not like you are creating application with maybe a week of your effort that you can start to be profitable and you grow. But the the game of reactor power planted is different.” (I-7, Pos. 21)

Bezüglich der Erfolgsaussichten für diese junge Unternehmen sind sich die Interviewpartner*innen einig und halten diese für begrenzt. Entweder werden die Firmen wieder verschwinden oder bei einem vielversprechenden Konzept durch eine große Firma aufgekauft (I-6, Pos. 34). Die Möglichkeit, dass aus einem der jungen Unternehmen ein im SMR – Markt gefestigter Teilnehmer erwächst, wird als eher unwahrscheinlich eingestuft (I-1, Pos. 40 + 47). Als Gründe für diese Einschätzung führen die Interviewpartner*innen die hohen Kosten und personellen Ressourcen an, die der Bau eines Reaktors benötigt. Weitere Gründe sind die mangelnde Erfahrung in Genehmigungsprozessen. Sollte ein junges Unternehmen dennoch bestehen und wachsen wollen, würde ein finanzstarker Investor benötigt. Als Beispiel wird Terrapower unter der Leitung von Bill Gates genannt.

“You come up with good ideas and you do the initial work. [...] If it's a concept that is plausible, it has potential. To take it from there to a prototype is an enormous, enormous undertaking. It requires money and more importantly, it requires a lot of money, but also requires a lot of people. With hundreds of people, engineers, license experts, the whole gamut the cost estimators. Which typically are not compatible with a tiny organization like a startup.” (I-2, Pos. 24)

“I think these innovative startups will not build the final reactor, since for this you need a huge company. [...] and the startup company will not build a factory and will not pay, I don't know, 500 employees or thousand employees and engineers and whatever.” (EK, Pos. 41)

“But at some point, they have to partner with larger companies, with other companies, not necessarily a reactor supplier like the big companies, EDF, Westinghouse, Rosatom. But they need larger partners to go into the market.” (I-5, Pos. 34)

“You could decide that you wanna grow into a company of the right size to actually see yourself, get into a prototype and that's been done. Terra power, you know the company owned by Bill Gates, it was a tiny thing for many years until finally they saw a path towards commercialization. And then they started to hire. They gotten to a point now I think it's like 350 to 400 people. A very capable organization but

it has, you know, required investments of \$100 million and also a project, a real project, right, which they now have in Wyoming. So that's one alternative.“ (I-2, Pos. 24)

Die jungen Unternehmen stehen in Konkurrenz mit etablierten Unternehmen, die selbst Vorteile am Markt genießen. Aus Sicht der Expert*innen haben etablierten Unternehmen jedoch auch ihre Stärken, wie in Tabelle 11 aufgeführt. Der wichtigste Vorteil für etablierte Unternehmen ist ihre Erfahrung am Markt und das Vertrauen, welches ihnen entgegengebracht wird.

“So, I think it's the trust being able to show that they've done this in the past. Developing reactors or building reactors, so that they are capable of doing it again basically. [...] You can even imagine that it's maybe less necessary for established companies to have to prove these things and to gain the trust.” (I-4, Pos. 32)

“The experience. They know the stakeholders, they know the market,” (I-5, Pos. 29)

*Tabelle 11: Auswertung der Interviews zu den Stärken etablierter Unternehmen, nach Aussagen der befragten Expert*innen.*

Stärken etablierter Unternehmen in der Kerntechnik	
Erfahrungen im Bau von Kernkraftwerken, sowie Kenntnisse der Akteure am Markt und deren Vertrauen	I-3, Pos. 49; I-5, Pos. 29; I-2, Pos. 33; I-6, Pos. 30; I-8, Pos. 62; I-4, Pos. 32
Personelle Stärke in den notwendigen Fachabteilungen für den Kraftwerksbau, sowie die Kapazität für eine weltweite Tätigkeit	I-3, Pos. 49
SMR – Konzepte der etablierten Unternehmen sind am üblicherweise am weitesten ausgereift	I-5, Pos. 22
Bereitschaft Projekte kritisch zu hinterfragen	I-5, Pos. 29

Die Frage, ob General Atomics in den 1950ern als junges Unternehmen Vorteile gegenüber den jungen Unternehmen in der Kerntechnik heute hat, wurde von den Expert*innen bejaht. So wird die politische Stimmung der Bevölkerung allgemein gegenüber der Kerntechnik in den 50er – 70er als positiver wahrgenommen im Vergleich zu heute, wie die nachfolgende Tabelle 12 zeigt. Weitere Aspekte die genannt wurden sind u. a. ein weniger strenges Regelwerk und der Wissenstransfer aus dem Manhattan Projekt. Eine interviewte Person benennt Zweifel daran, ob die Entwicklung des TRIGA-Reaktors unter den heutigen Bedingungen noch möglich wäre.

„ And when they developed their research reactors, they knew what they did. They had an idea and especially if you think about the zirconium hydride fuel, this is quite a nice idea, where I would doubt that today someone could have this idea again. So, they had really the intellectual workforce capacity for this.” (I-5, Pos. 36)

*Tabelle 12: Vergleich der Startbedingungen von General Atomics in den 1950er und junger Unternehmen heute, nach Aussagen der befragten Expert*innen.*

Vorteile für General Atomics in den 50er im Vergleich zu jungen Firmen heute

Die Meinung der Bevölkerung der Kerntechnik gegenüber war deutlich positiver eingestellt	I-3, Pos. 17 + 52 + 71; I-8 Pos. 65
Weniger strenges Regelwerk	I-2, Pos. 36; I-4, Pos. 37 f.; I-7 Pos. 8
Bessere Unterstützung durch den Staat, u.a. die finanziellen Ressourcen betreffend	I-3, Pos. 52
Vorteile durch den Wissenserwerb im Manhattan Projekt und dem Wissenstransfer aus dem militärischen Sektor in den zivilen Sektor	I-3, Pos. 52 + 67; I-5, Pos. 36
Große Zahl an Arbeitskräften in der Kerntechnik	I-5 Pos. 36
Innovationen wurden auch durch staatliche Institutionen vorangetrieben, wie das Beispiel der 52 Reaktoren am Idaho Nationallaboratorium zeigt	I-2, Pos. 36

Der Bau von Prototypen könnte leichter gewesen sein I-2, Pos. 36

Es wurde jedoch auch die Auffassung geäußert, dass TRIGA – Reaktoren und SMRs nicht vergleichbar sind. Die Einführung der TRIGA – Reaktoren sei keineswegs marktorientiert, sondern politisch motiviert gewesen. SMRs hingegen werden als marktgetrieben angesehen.

„But today, especially SMRs, are market driven. The TRIGA deployment was not market driven at all. It was mainly political.“ (I-1, Pos. 57)

5.3 Interpretation der Ergebnisse und daraus abgeleitete Schlussfolgerungen

Die gewonnenen Ergebnisse aus Abschnitt 5.2 werden im Kontext, der in den Analysen aus Kapitel 3 und 4 erlangten Erkenntnisse interpretiert. In der Betrachtung der Ergebnisse aus der Analyse des Innovationssystems SMRs auf Basis der Literaturrecherche in Kapitel 4 zeigt sich folgendes Bild: Die Funktionen Unternehmerische Aktivität und Wissensverbreitung können als stark besetzt angesehen werden. Auch die Funktion Wissensentstehung stellt sich einerseits gut da, allerdings mangelt es an Prototypen, was das Vorankommen von SMRs behindert. Die Funktionen Marktentstehung und Ressourcenmobilisierung zeigen ein widersprüchliches Bild. Es gibt Aspekte, die positiv wirken, wie die scheinbare Nachfrage und das Potential für SMRs, sowie die Bereitstellung diverser finanziellen Förderungen durch verschiedene Regierungen. Andererseits stehen fehlende Projekte im Widerspruch zu der geäußerten Nachfrage. Zusätzlich ist die schwache Lieferkette negativ zu beurteilen. Die Legitimität für SMRs ist stark länderabhängig und lässt sich ebenfalls nicht abschließend bewerten. Die Schwäche der Funktionen im Innovationssystem SMRs fallen insbesondere dann auf, wenn man es dem Innovationssystem TRIGA – Forschungsreaktor gegenüberstellt. In diesem Innovationssystem sind alle Funktionen stark besetzt. Auffallend sind die Auswirkungen der „Atoms for Peace“ – Rede und der damit einhergehenden Öffnung eines Marktes für zivile Anwendungen, wodurch sechs von sieben Funktionen des Innovationssystems positiv beeinflusst wurden.

Die Ergebnisse der Expert*inneninterviews, zeigen ein vergleichbares Bild. Die drei Funktionen, denen in der Auswertung der Interviews die meisten Codes mit der Oberkategorie Herausforderungen für SMRs zugeordnet wurden, sind die Funktionen Legitimität, Marktentstehung und Ressourcenmobilisierung (vgl. Abbildung 20 aus S. 70). Den Funktionen Wissensverbreitung und Suchrichtung wurden nur eine codierte bzw. keine codierte Textstelle zugeordnet. Es kann draus geschlossen werden, dass sie aufgrund starker Ausprägungen im Innovationssystem SMRs keine hemmende Wirkung haben. Zusätzlich

wurden funktionsübergreifende Aspekte genannt, wie eine klare Vision für kerntechnische Anwendungen.

Bei der Analyse der Herausforderungen für die Funktion Ressourcenmobilisierung fällt auf, dass besonders die Finanzierungsmöglichkeiten von SMRs von den Interviewten als mangelhaft wahrgenommen werden. Beispiel dafür ist die Problematik der Finanzierung von SMR – Projekten (vgl. Tabelle 9 auf S. 70). Das ist insofern bemerkenswert, da in der Literaturrecherche diverse nationale und internationale Förderprogramme speziell für SMRs herausgearbeitet werden konnten. In einem der Interviews wurde jedoch sehr deutlich die Position eines kleineren Staates kommuniziert:

“If there's no prototype. [...] no normal country in the West, which is oriented to the market and has high standards, will buy that. [...] Why? Because we have experience, that's not a good experience from our first nuclear power plant. You cannot be first of a kind country to do that. [...] So, the policy that we have is to have not first of a kind. [...] The position should be like France is offering a new art design, then France should be the first one to build this new art in their country and this would prove also to other countries that this is a design, and this is a SMR which is feasible, and you would realistically then know what is the cost of building it.” (I-6, Pos. 19-28)

Nimmt man die Informationen zusammen, lässt sich die Annahme ableiten, dass private Firmen und kleinere Staaten die Erwartungshaltung haben, dass finanzstarke Staaten wie die USA, China oder Frankreich den kompletten Bau eines SMR finanzieren sollen und nicht nur die Entwicklungsprogramme fördern. Das passt auch zu dem, was man bisher in der Kerntechnik gewohnt war: Staatlich finanzierte Prototypen an den staatlichen Forschungseinrichtungen der USA, Frankreich oder Russland.

Strukturelle Probleme in der Funktion Ressourcenmobilisierung lassen sich darüber hinaus beim Zugang von Leistungen der staatlichen Forschungseinrichtungen für junge Unternehmen der Kerntechnik herausarbeiten. An dieser Stelle muss den Firmen besserer Zugang ermöglicht werden. Darüber hinaus wurde die Notwendigkeit staatlicher Forschungsprogramme angesprochen, die

Leistungen erbringen müssen, die für einzelne Unternehmen zu aufwändig und zu teuer sind.

The government owns a lot of infrastructure that is helpful for the development and prototyping and testing of these systems. The national labs in particular like Idaho and so on. So, continuing to giving access to the startups. [...] It is impossible for, I would say, even for established company, to go through conceptualization, development, testing qualification of new fuel. It's crazy expensive and crazy lengthy, [...] Once the fuel is demonstrated and qualified, then it becomes a business. [...] But 10-15 years required to qualify a new fuel, that's something that the government's got to do. (I-2, Pos. 38-39)

Aber auch das Thema Lieferketten wurde mehrfach angesprochen. Eine Aussage aus den Interviews ist, dass eine größere Anzahl an Reaktoren gebaut werden muss, um die notwendigen Investments in die Lieferketten vorzunehmen.

And until I see countries or companies signing contracts for 5, 6, 8, 10, 20 SMRs of one type, it's going to be hard to see how the technology developers and the supply chain will invest in facilities to build them efficiently. (I-2, Pos. 43)

Die von der OECD im Jahr 2016 genannten Zahlen für die geschätzte Marktkapazität für SMRs für 2035 gehen in dem besten Szenario von 21 GW_e aus (vgl. Kapitel 4.1). Zu beachten gilt, dass diese Zahlen die aktuellen Entwicklungen um den steigenden Strombedarf für Rechenzentren durch KI-Anwendungen noch nicht enthalten. Für eine Abschätzung sind sie jedoch an dieser Stelle ausreichend. Geht man davon aus, dass diese 21 GW_e durch SMRs mit der maximalen Kapazität (300 MW_e) abgedeckt werden, ergibt das 70 SMRs die gebaut werden könnten. Selbst bei der doppelten Anzahl von 150 SMRs als Gesamtkapazität im besten Fall, ist es jedoch wahrscheinlich, dass es kaum private oder staatliche Energieversorger oder andere Akteure gibt, die 10 oder 20 Reaktoren bestellen.

Andere Interviewteilnehmer*innen sprachen von einer Zukunftsvision für die Kerntechnik als Investitionssicherheit für alle, die auf die Technologie setzen. In einigen Ländern wurde dafür in den letzten Jahren der Grundstein gelegt.

Als Beispiel dient das Bündnis von Staaten, die sich klar zu einer nuklearen Strategie bekennen, welches an der COP28 verkündet wurde (DOE, 2023b). Diese Bündnisse stärken zwar die Kerntechnik im Allgemeinen, davon profitieren aber zur Zeit vor allem die großen Leistungsreaktoren. Dies spiegelt sich in der Literatur und in den Aussagen der interviewten Personen wider, (vgl. Tabelle 9, Abschnitt Marktentstehung). Es bleibt jedoch abzuwarten, ob eine nukleare Strategie auch bedeutet, dass SMRs darin eingeschlossen sind und diese sich wirklich am Markt durchsetzen werden. Darüber hinaus kann aus den Interviewergebnissen abgeleitet werden, dass die Markterwartung für SMRs stark davon abhängt, wofür SMRs verwendet werden sollen. Das größte Potential wird in Anwendungen gesehen, die große Leistungsreaktoren nicht abdecken können. Dazu gehören Prozesswärme für industrielle Prozesse, Systeme in denen SMRs mit anderen Energiequellen gekoppelt werden, sowie ländliche und abgelegene Regionen, wo das Stromnetz nicht so ausgebaut ist wie in stark bewohnten Gegenden. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den von der IAEA und OECD kommunizierten Anwendungsgebiete für SMRs (vgl. Abschnitt 2.3).

Das Thema Legitimität ist für die Kerntechnik im Allgemeinen, aber auch für SMRs im Speziellen, ein entscheidendes Kriterium. Auch in den Interviews mit den Expert*innen wurden in diesem Themenblock die meisten Herausforderungen genannt. Die Meinung der Politik und Bevölkerung sind entscheidend bei der Frage, ob ein Land die Kerntechnik für sich nutzen möchte, wie am Beispiel Deutschland zu sehen ist. Ferner entscheiden auch politische Überlegungen darüber, ob einem Land die Kerntechnik zugänglich gemacht wird oder nicht. Interviewpartner*innen betonten, dass es falsch wäre die Überlegungen, ob es für SMRs einen Markt gibt, rein an ökonomischen oder marktgetriebenen Kriterien festzumachen. Eine interviewte Person gab ihre Perspektive wieder, dass sich die Welt in einer vergleichbaren Situation wie vor 60 Jahren befinde, als diese in Ost und West aufgeteilt war. Dadurch wird die Zugänglichkeit von kerntechnischen Komponenten und Rohstoffen für Länder limitiert, abhängig davon welchen Staaten man politisch nahesteht.

Die Legitimität beeinflusst darüber hinaus direkt die regulatorischen Vorgaben. In diesem Zusammenhang wurde der Wunsch nach mehr internationaler Harmonisierung geäußert, so dass ein im Land A bereits genehmigter Reaktor ohne große Änderungen auch in Land B gebaut werden könnte. Diese Überlegungen decken sich ebenfalls mit den Aussagen von IAEA und OECD. Das Regulators Forum der IAEA versteht sich als Zusammenschluss mit eben jener Zielsetzung: Harmonisierte Regelungen für SMRs herauszuarbeiten. Die Realität ist jedoch, dass es in über 60 Jahren Nutzung nuklearer Technologien nicht gelungen ist, dieses harmonisierte Regelwerk zu erarbeiten, da Staaten bisher nicht auf ihre regulatorischen Kompetenzen verzichten wollen. Es darf als fraglich angesehen werden, ob die gewünschten Harmonisierungen in der Zukunft erreicht werden können.

Ebenfalls angesprochen wurde auch die Praxis des „Graded approach“, also das Erreichen eines Schutzziels durch die stufenweise Anpassung der Anforderungen an die Merkmale der jeweiligen kerntechnischen Anlage. Zum Beispiel werden damit Regelungen für große Leistungsreaktoren auf kleinere Forschungsreaktoren abgestuft, ohne auf Sicherheit zu verzichten. Hiermit könnten etablierte Regelungen auch für SMRs, inklusive der Advanced – Reaktor – Designs angewendet werden. Gleichzeitig könnte damit den Sicherheitsversprechen der SMRs Rechnung getragen werden und so Erleichterungen möglich gemacht werden. Da es hierfür eine gelebte Praxis gibt, ist es wahrscheinlicher, dass dieser Ansatz auch in Zukunft weiterverfolgt wird.

Zwei Faktoren die beim Vergleich des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktor und dem Innovationssystem SMRs herausstechen sind die Geschwindigkeit, in der Reaktoren entwickelt werden und der anschließende Bau eines Prototyps. Für die längeren Entwicklungszeiten wurden vor allem regulatorische Anforderungen angeführt, wobei sich alle Expert*innen einig waren, dass man sich keinen Rückschritt in die 50er Jahre wünscht. Verbesserungspotential wurde erneut bei dem Thema Harmonisierung gesehen. Dazu gelten jedoch die bereits im vorherigen Abschnitt betrachteten Schlussfolgerungen.

Ebenfalls werden wieder die Themen Finanzierung von Projekten und Lieferketten als weitere hemmende Rahmenbedingungen angeführt. Daraus wird abgeleitet, dass diese Themen für das Vorankommen des Innovationssystems als essenziell betrachtet werden können. Ebenfalls unerlässlich bleibt der Bau von Prototypen. Der Mangel an diesen ist als einer der wichtigsten Faktoren zu betrachten, der die Diffusion von SMRs behindert. Dies gilt umso mehr, da jeder der befragten Expert*innen Prototypen als alternativlos betrachtet.

Auch der mehrfach angesprochene Übungseffekt, der sich einstellt, wenn der gleiche Reaktortyp mehrfach gebaut wird, bedarf einer näheren Betrachtung. Dieser Aspekt ist direkt mit den Überlegungen zur Nachfrage verknüpft. Solange es an Kunden fehlt, die mehrere Reaktoren gleichen Typs bestellen, wird dieser Effekt nicht zum Tragen kommen können. Er spielt zusätzlich jedoch auch für die Senkung der Kosten des Reaktorbaus eine wichtige Rolle (vgl. Abschnitt 2.3.3) die sich wiederum auf die Nachfrage auswirken. Dazu passen auch die Überlegungen der zuverlässigen Lieferketten, da dadurch Investments in die Lieferkette sich für die Unternehmen rechnen. In diesem Kontext ergibt sich ein klassisches Henne – und – Ei – Problem.

Die Analyse des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktor hat einen weiteren wichtigen Grund für den seriellen Bau des gleichen Reaktortyps geliefert. Die Bildung eines Netzwerkes, welches sich unter den Betreibern gleicher Reaktortypen etablieren kann. Von diesem Netzwerk profitieren die Betreiber zum einen durch eine Art Lobbyfunktion und zum anderen durch den Wissenstransfer. Zusätzlich sind Rückkopplungen auf das Innovationssystem zu erwarten. Es wäre denkbar, dass dieser Effekt die Verbreitung von SMRs vorantreibt und sich positiv auf die Lieferketten auswirkt, wie schon bei den TRIGA – Reaktoren beobachtet werden konnte. Der Aspekt der Netzwerkbildung bei gleichen SMRs spielt weder in den Überlegungen der OECD, der IAEA oder in anderen Quellen zu SMRs eine Rolle. Auch in den Interviews ist dieser Aspekt nicht angesprochen worden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung verdeutlichen jedoch, dass in diesem Kontext Potentiale ungenutzt bleiben.

Durch den Vergleich der beiden Innovationssysteme wurde für die Erstellung des Interviewleitfadens das Thema Nachwuchs ergänzend herausgegriffen. Im ersten Ansatz wurde die Hypothese formuliert, dass in den 50er Jahren sehr viele Personen mit ausgeprägten Kompetenzen auf dem Gebiet der Kerntechnik tätig waren und es sich um eine der wichtigsten Wissenschafts- und Ingenieursdisziplin der Zeit handelte, wodurch Nachwuchs für den nuklearen Bereich angezogen wurde. Ausgehend von der Wahrnehmung in Deutschland wurde ein Mangel an Nachwuchs angenommen, der in den Interviews näher untersucht wurde. Auch wenn die Thematik, ob es ausreichend Nachwuchs in den nuklearen Disziplinen gibt, sehr unterschiedlich in der Ausprägung wahrgenommen wird, scheint es bei näherem Betrachten noch nicht zu den bremsenden Effekten des Innovationssystems SMRs zu zählen.

Greift man das Bild der Motoren eines Innovationssystems auf (vgl. Abschnitt 2.1), können in drei der vier Motoren im Innovationssystem SMRs Schwächen ausgemacht werden. Lediglich im Unternehmensmotor sind die Schlüsselfunktionen ausreichend ausgeprägt. Die schwachen Funktionen Suchrichtung, Ressourcenmobilisierung (fehlende Lieferketten) und Wissensentwicklung (fehlende Prototypen) werden durch die starke Funktion Unternehmerische Tätigkeiten und durch eine wachsenden Legitimität gestützt.

Am schwächsten besetzt sind die beiden Motoren Systembildungsmotor und Marktmotor. Ersterer benötigt bessere, an die Bedürfnisse von SMRs angepasste Regularien, bei weiterhin hohem Ressourcenbedarf. Letzterem fehlt eine ausreichend hohe Nachfrage, um das Innovationssystem selbstständig aufrecht zu erhalten.

5.4 Identifizierung wichtiger Akteure zur Verbesserung von Rahmenbedingungen für Small Modular Reactors in Hinblick auf die Diffusion am Markt

Ausgehend von den Schlussfolgerungen aus Abschnitt 5.3. werden folgende Akteure und Handlungsoptionen identifiziert, die einen besonders großen Effekt auf das Innovationssystem SMRs ausüben können.

1. Regierungen und politische Entscheidungsträger:
 - Verfolgung einer klaren Vision für die Nutzung ziviler kerntechnischer Anwendungen in Ländern, die Interesse an SMRs angemeldet haben, diese jedoch bisher nicht konsequent verfolgen.
 - Bau eines staatlich finanzierten Prototyps bzw. Absicherung der Risiken beim Bau eines Prototypen für Unternehmen.
 - Finanzielle Ressourcen, die für die Entwicklung von SMRs bereitgestellt werden, gezielt einsetzen:
 - Anreize setzen, welche die Nachfrage nach SMRs erhöhen
 - Lieferketten unterstützen
 - Stärkung der Forschungsinfrastruktur und Förderung eigener F&E – Projekte für Entwicklungen, die die Industrie allein nicht tragen kann.
 - Verbesserung von regulatorischen Bedingungen und Stärkung der Kompetenzen von Aufsichtsbehörden im Bereich Advanced – Reaktor – Designs.
2. Private und staatliche Interessenten für SMRs:
 - Verbindliche Zusagen zur Abnahme mehrerer Reaktoren in einem vertretbaren Zeitrahmen, so dass die Konstruktionsfirmen und Unternehmen in den Lieferketten Investitionen planen können.
 - Bedürfnisse klar formulieren, damit Unternehmen geeignete Reaktor – Designs anbieten können.

3. Private oder staatliche Unternehmen mit SMR – Konzepten:

- Entwicklung eines wettbewerbsfähigen Produktes, welches die Bedürfnisse der Nachfragenden abdeckt.
- Risikobereitschaft für den Bau von Prototypen. Dabei muss dieser Bau nicht durch ein Unternehmen allein erfolgen, sondern kann auch durch einen Zusammenschluss mehrere Unternehmen realisiert werden, wie von einer interviewten Person vorgeschlagen (I-1, Pos. 71 f.). Potenzielle Zusammenschlüsse könnten aus etablierten, großen Akteuren der Kerntechnik bestehen oder aus einem Verbund einer großen Firma und einem jungen Unternehmen. Die letztgenannte Kombination würde im besten Fall die jeweiligen Stärken der Unternehmen (Erfahrung und innovative Ansätze) nutzen.

Insbesondere politischen Entscheidungsträgern ist eine wichtige Rolle in dem Innovationssystem zuzusprechen, da sie maßgeblich die Diffusion von SMRs positiv oder negativ beeinflussen können. Für alle Akteure gilt, dass der Netzwirkbildung von Betreibern und Nutzern gleicher Reaktortypen mehr Bedeutung beigemessen werden sollte. Das Beispiel TRIGA – Reaktoren hat gezeigt, dass damit das Innovationssystem auch dann gestützt werden kann, wenn wichtige Funktionen wie die unternehmerische Aktivität über einen Zeitraum schwächer ausgeprägt sind.

5.5 Reflexion über methodische Herausforderungen und Limitationen der Interviews

Im Folgenden werden die Limitationen und methodischen Herausforderungen der Interviews betrachtet.

Für die durchgeführten Interviews konnten insgesamt 8 Teilnehmer*innen gewonnen werden, was für die vorliegende Untersuchung als ausreichend angesehen wird. Die Qualität der Interviewpartner*innen wird als hoch eingestuft. Es konnten für die Interviews renommierte Expert*innen gewonnen werden, die wichtigen Positionen besetzen und auf langjährige Erfahrungen zurückgreifen können. Die Auswahl deckt dabei internationale Organisationen, den Forschungsbetrieb, aber auch den Kraftwerksbau und Aufsichtsbehörden ab.

Schon bei der Durchführung der Interviews und später auch in deren Auswertung hat sich gezeigt, dass die länderspezifischen Meinungen zur Kerntechnik in den Antworten eine relevante Rolle spielen. Teilnehmer*innen aus den Ländern Slowenien, Frankreich, Niederlande und den USA waren deutlich optimistischer eingestellt als die meisten Teilnehmer*innen mit deutschem Hintergrund. Daher gilt zu beachten, dass sich die in dieser Arbeit gewonnen Erkenntnisse zur Markterwartung für SMRs voraussichtlich nicht auf alle Länder weltweit ohne weiteres übertragen lassen, da einige Regionen in diesem Studiendesign unberücksichtigt blieben. Dies gilt für den asiatischen Raum im Allgemeinen und für China im Besonderen. Ebenfalls unterrepräsentiert sind Russland, sowie die Regionen Afrika und Südamerika. Überrepräsentiert sind hingegen europäische Sichtweisen.

Weitere Schwächen haben sich in Teilen bei der Interviewführung ergeben. Insbesondere in den ersten Interviews musste noch Erfahrung gewonnen werden, wie die Interviewpartner*innen durch das Gespräch zu führen sind. Dadurch haben sich in den ersten beiden Interviews informelle Gesprächssituationen ergeben, die vom Interviewleitfaden wegführten und zudem informelle Inhalte enthielten. Diese mussten später bei der Transkription der Interviews verworfen werden. Für die Qualität der Untersuchungsergebnisse ergeben sich

daraus jedoch keine weiteren Folgen, da die gestrichenen Inhalte zur Beantwortung der Forschungsfrage nicht relevant waren.

Bei der Codierung des Interviewmaterials hat sich darüber hinaus gezeigt, dass in den einzelnen Gesprächen sehr viel mehr Daten gewonnen werden konnten, als für die Beantwortung der Forschungsfrage nötig sind. Dahingehend könnte das Studiendesign in Zukunft optimiert werden.

6 Fazit und Ausblick

Das Kapitel fasst die zentralen Ergebnisse aus dieser Arbeit zusammen (Abschnitt 6.1), gibt eine Handlungsempfehlung für Entscheidungsträger (Abschnitt 6.2) und endet mit einem Ausblick auf zukünftige Forschungsansätze (Abschnitt 6.3).

6.1 Zusammenfassung und Ergebnisse

In der Analyse des Innovationssystems TRIGA – Forschungsreaktoren in Kapitel 3 konnte gezeigt werden, dass es sich um ein Innovationssystem handelt, dessen Funktionen durch leistungsstarke Akteure geprägt sind. Diese beeinflussen sich gegenseitig und wirken positiv aufeinander ein. So ist die Funktion Unternehmerische Aktivität durch kluges, unternehmerisches Handeln des Visionärs Frederic de Hoffmann als Leiter von General Atomics in Kombination mit einem finanzstarken Mutterunternehmen General Dynamics Corporation geprägt. Bei General Atomics wurden Chancen frühzeitig erkannt und konsequent verfolgt. Während den Wissenschaftlern und Ingenieuren in der Produktentwicklung zu Beginn größtmögliche Freiheit bei der Ideenfindung gegeben wurde, wurden im nächsten Schritt die Ressourcen auf das eine erfolgversprechendste Konzept des sicheren Reaktors konzentriert. Damit wurde innerhalb von General Atomics die eigene Suchrichtung sinnvoll eingeschränkt. Wichtige Personen, die zur Entwicklung des TRIGA – Reaktors beigetragen haben, gehörten zu den renommiertesten Wissenschaftlern und Ingenieuren auf dem Gebiet der Kerntechnik und waren zum Teil auch Mitglieder des ressourcenstarken Manhattan Projekts. Davon profitieren die Funktionen Marktentstehung und Legitimität. Die Freigabe des Wissens und der Technologien um die Kernspaltung für eine zivile Nutzung sind untrennbar mit Eisenhowers „Atoms for Peace“ – Programm verbunden. Neben den technischen Aspekten des TRIGA – Reaktors, ist das Programm die politisch tiefgreifendste Entscheidung gewesen, die zur weltweiten Verbreitung von TRIGA – Reaktoren beigetragen hat. TRIGA – Reaktoren wurden von den USA über das Programm auch in einige Länder verschenkt, um sich damit politische

Vorteile zu sichern. Die Funktionen Wissensentstehung und Wissensverbreitung profitierten mit insgesamt 66 TRIGA – Reaktoren in 21 Ländern von einer starken TRIGA – Nutzer – Gemeinschaft und einem starken TRIGA – Betreiber – Netzwerk. Diese Gemeinschaft wirkte sich in den letzten Jahren wiederum auf die Funktion Unternehmerische Aktivität aus, wie das Beispiel der Wiederaufnahme der TRIGA-Brennelementproduktion zeigt.

Kapitel 4 untersuchte das Innovationssystem SMRs. Es zeigt sich, dass die Funktionen im Innovationssystem SMRs unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Die Funktion Unternehmerische Aktivität ist sowohl von Tätigkeiten privater als auch staatlicher Akteure bestimmt. Dabei handelt es sich neben etablierten, seit Jahrzehnten auf dem Gebiet der Kerntechnik aktiven Unternehmen, auch um junge Unternehmen, die sich in den letzten 20 Jahren erst im Zusammenhang mit SMRs gegründet haben. Die wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Themengebiet SMR haben in den letzten 20 Jahren stetig zugenommen, gleichzeitig mangelt es an Prototypen, die die Wissensentstehung weiter voranbringen. Diverse nationale und internationale Netzwerke tragen zur Wissensverbreitung bei, die Suchrichtung ist allerdings noch sehr offen. 71 bei der IAEA gelistete Konzepte in unterschiedlichen Reifegraden zeugen von starkem Interesse, dabei konkurrieren Weiterentwicklungen von Leichtwasserreaktoren mit neuen Advanced – Reaktor – Designs der Gen IV. Die Nachfrage und die Bedürfnisse potenzieller Kunden ist nicht klar umrissen, was die Suchrichtung ebenfalls beeinträchtigt. Die Analyse hat gezeigt, dass es grundsätzlich einen Markt für kommerzielle SMRs gibt, gebaut werden jedoch überwiegend große Leistungsreaktoren. Es mangelt jedoch auch an Prototypen, die den Markt positiv beeinflussen können. Die Funktion Legitimität wird durch die Bemühungen im Kampf gegen den Klimawandel und den möglichen Beitrag der Kerntechnik zu CO₂-armen Energie positiv beeinflusst. In Gesellschaften kann jedoch die vorherrschende Meinung zur Nutzung der Kerntechnik und der Entsorgung der anfallenden radioaktiven Abfälle die Legitimität nachhaltig negativ beeinflussen. Es konnte gezeigt werden, dass die Ressourcenmobilisierung gut funktioniert. So gibt es diverse nationale und multinationale Förderprogramme, die die Entwicklung von SMRs vorantreiben

wollen. Herausforderungen ergeben sich jedoch bei der Organisation von Lieferketten und der Brennstoffversorgung. Einen positiven Einfluss auf das Innovationssystem können verbesserte Sicherheitsmerkmale von SMRs haben, genauso wie die Modularität und die damit verbundene Fabrikfertigung von Komponenten für SMRs. Lassen sich die Versprechungen in der Zukunft jedoch nicht einhalten, würde dies das Innovationssystem nachhaltig blockieren.

Die Ergebnisse der Expert*inneninterviews in Kapitel 5 hat ein vergleichbares Bild zu den literaturbasierten Betrachtungen aus Kapitel 3 und 4 ergeben. Im Innovationssystem SMRs werden für die Funktionen unternehmerische Aktivität, Wissensverbreitung, sowie die Suchrichtung kaum Herausforderungen identifiziert. In der Funktion Wissensentstehung wird vor allem der Mangel an Prototypen als signifikantes Problem identifiziert, wodurch auch die Funktion Marktentstehung erheblich behindert wird. Zusätzlich widersprechen sich der Mangel an Prototypen und SMR – Projekten mit der scheinbaren Nachfrage und Markterwartung für SMRs. In der Funktion Ressourcenmobilisierung wurden Widersprüche zwischen der Literaturlauswertung und den Interviews herausgearbeitet. Trotz diverser hochdotierter Förderprogramme werden finanzielle Risiken als großes Hindernis für den Bau von Prototypen wahrgenommen. Ebenfalls hemmend auf das Innovationssystem wirken sich die Probleme in den Lieferketten aus. Die Abschätzung der Markterwartung für SMRs wird stark durch die jeweilige Legitimität der Kerntechnik in den Ländern erschwert. Dabei ist die Funktion Legitimität entscheidend für die Nutzung von SMRs. Herausforderungen, die der Funktion Legitimität zugeordnet werden können, sind neben der Akzeptanz der Bevölkerung für die Kerntechnik, die Themen Vereinfachung der Regularien, sowie die Harmonisierung von Regelwerken zwischen verschiedenen Ländern. Beide Themen könnten sich darüber hinaus positiv auf die Konstruktionszeiten für SMRs positiv auswirken und Kosten senken.

Der Bau von mehreren Reaktoren desselben Typs wird, sowohl in der Literatur als auch in den Interviews, vor allem aus ökonomischen Aspekten und Aspekten der Optimierung betrachtet. Die Netzwerkbildung untereinander, die bei

TRIGA – Reaktoren beobachtet werden konnte, und die das Innovationssystem in schwächeren Phasen gestützt hat, findet keine Berücksichtigung. Der Vergleich beider Innovationssysteme zeigt jedoch, dass diesem Faktor eine stärkere Bedeutung beigemessen werden sollte.

Für die untersuchte Thematik des personellen Nachwuchses konnte eine unterschiedliche Wahrnehmung bei den Interviewpartner*innen identifiziert werden. Die Auswirkungen daraus scheinen jedoch für das Innovationssystem SMRs, zum Zeitpunkt der Untersuchung, nicht das dringendste Problem zu sein.

6.2 Implikationen für die Praxis und Entscheidungsträger

Um das Innovationssystem SMRs zu stärken und die Diffusion am Markt weiter voranzubringen, müssen die wichtigsten Akteure in Form von Regierungen oder anderen politischen Entscheidungsträgern, Interessenten in SMRs sowie die Anbieter von SMRs in den nächsten Jahren konsequent handeln. Folgende Implikationen lassen sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit ableiten. Zunächst braucht das Innovationssystem mehr Prototypen, um die Machbarkeit und die Kosten für SMRs aufzuzeigen. Projekte wie in Kanada (vgl. Abschnitt 4.2) bilden einen wichtigen Anfang. Dennoch müssen Staaten, Unternehmen oder Unternehmensverbände bereit sein das Risiko eines Fehlschlags auf sich zu nehmen, um einen Markt auch in kleineren, finanzschwächeren Ländern aufzumachen. Regierungen und Politik müssen die Forschungsinfrastruktur auch kleineren Marktteilnehmern zugänglich machen. Darüber hinaus müssen sie darauf achten, dass die bereitgestellten finanziellen Ressourcen für SMRs auch zielgerichtet in deren Etablierung am Markt und die Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur in Form von Lieferketten und Forschungsinfrastruktur eingesetzt werden. Dieser Forderung steht die Forderung des DIW gegenüber, die aus den Ergebnissen einer Studie aus 2023 abgeleitet werden, in der die Forschungsförderung der Kernenergie durch die Politik grundsätzlich in Frage gestellt wird. So solle Forschungsförderung nur in Bereichen erfolgen, von denen „substanzielle Beiträge zur Energiewende zu erwarten sind, wie erneuerbare Energie, Speicher und andere Flexibilitätsoptionen.“ (Wimmers, u. a., 2023b, S. 120).

Aufsichtsbehörden müssen international an der Harmonisierung von Regelwerken arbeiten. Darüber hinaus braucht es auch den Aufbau neuer Kompetenzen im Bereich Advanced – Reaktor – Designs, sofern diese nicht vorhanden sind, da einige SMR – Konzepte auf neuere Technologien setzen. Potenzielle Kunden und SMR – Anbieter müssen sich stärker darüber austauschen, wo der Bedarf für SMRs liegt, damit ein wettbewerbsfähiges Produkt angeboten werden kann und die Firmen nicht an den Kunden vorbei entwickeln. Kunden wiederum müssen den Konstruktionsfirmen durch verbindliche Zusagen und der Abnahme mehrerer Reaktoren Planungs- und Investitionssicherheit bieten.

6.3 Empfehlungen für weitere Forschungsansätze und Entwicklungen

Weitere Forschungsansätze ergeben sich aus den Limitationen dieser Arbeit. Da sowohl China als auch Russland wichtige Akteure in der Kerntechnik sind, sollten ihre Positionen in zukünftigen Untersuchungen beleuchtet werden. Des Weiteren könnten Forschungsansätze in ihren Analysen auch andere asiatische Staaten mit SMR – Programmen, wie die Republik Südkorea oder Regionen wie Afrika und Südamerika betrachten. Weitere Ansatzpunkte für Forschungsarbeiten sind die in der Arbeit aufgedeckten Widersprüche zwischen der Literatur und der Wahrnehmung der Expert*innen. Insbesondere stellt sich die Frage, warum die finanziellen Bedarfe und Risiken für den Bau von Prototypen nicht durch die bereitgestellten finanziellen Mittel der Förderprogramme gedeckt werden.

Literatur

- ANS Nuclear Cafe/Nuclear Newswire: »The 1958 Ford Nucleon: An idea that's still ahead of its time«, URL <https://www.ans.org/news/article-3058/the-1958-ford-nucleon-an-idea-thats-still-ahead-of-its-time/> (Abgerufen: 14. August 2024).
- Argonne National Laboratory: »Our History«, URL <https://www.anl.gov/our-history> (Abgerufen: 12. Oktober 2024). *Argonne National Laboratory*
- »Atoms for Peace Speech«, URL <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech> (Abgerufen: 19. Mai 2024).
- BASE, Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: »Rücknahme und Rücktransport radioaktiver Abfälle aus der Wiederaufarbeitung«, URL <https://www.base.bund.de/DE/themen/ne/abfaelle/rueckfuehrung/rueckfuehrung.html> (Abgerufen: 15. Oktober 2024). *BASE*
- BASE, Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung: »Lösungen anderer Länder«, URL https://www.endlagersuche-infoplattform.de/webs/Endlagersuche/DE/Radioaktiver-Abfall/Loesungen-anderer-Laender/loesungen-anderer-laender_node.html (Abgerufen: 13. Oktober 2024). *BASE - Endlagersuche*
- bfs, Bundesamt für Strahlenschutz: »Atombombenabwürfe auf Hiroshima und Nagasaki: Bedeutung für den Strahlenschutz«, URL <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/einfuehrung/atombomben/atombomben-strahlenschutz.html> (Abgerufen: 10. August 2024). *Bundesamt für Strahlenschutz*
- bpb, Bundeszentrale für politische Bildung: »Atomausstieg – Deutschland verabschiedet sich endgültig von der Kernkraft«, URL <https://www.bpb.de/kurz-knapp/hintergrund-aktuell/520059/atomausstieg-deutschland-verabschiedet-sich-endgueltig-von-der-kernkraft/> (Abgerufen: 16. Februar 2024). *bpb.de*
- Canadian Small Modular Reactor (SMR) Roadmap Steering Committee: »SMR Roadmap«, URL <https://smrroadmap.ca/> (Abgerufen: 25. Februar 2024). *SMR Roadmap*

Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee (Hrsg.): *A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors*. Ottawa, Ontario, Canada, 2018.

Carlsson, Bo/Stankiewicz, Rikard: »On the Nature, Function and Composition of Technological Systems«, in: Carlsson, Bo (Hrsg.) ; ANTONELLI, C. ; CARLSSON, B. (Hrsg.): *Technological Systems and Economic Performance: The Case of Factory Automation, Economics of Science, Technology and Innovation*. Bd. 5. Dordrecht : Springer Netherlands, 1995 — ISBN 978-94-010-4065-5, S. 21–56

CEA, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives: »Les réacteurs du futur«, URL <https://www.cea.fr/Pages/domaines-recherche/energies/energie-nucleaire/reacteurs-nucleaires-futur.aspx> (Abgerufen: 25. Februar 2024). *CEA/De la recherche à l'industrie*

Craig, Paul P./Jungerman, John A.: *Nuclear arms race: technology and society*. New York, 1986.

dkfz, Deutsches Krebsforschungszentrum/Rautenstrauch, Julia: »Brennelemente des Forschungsreaktors TRIGA Heidelberg II abtransportiert«, URL https://www.dkfz.de/de/presse/pressemitteilungen/2001/download/dkfz_pm_01_21.pdf (Abgerufen: 24. September 2024). *dkfz_pm_01_21*

DOE, United States Department of Energy: *Supplement Analysis for the Foreign Resear Reactor Spent Nuclear Fuel Acceptance Program* (Nr. DOE/EIS-0218-SA-8), 2019.

DOE, United States Department of Energy: »Framatome Makes First TRIGA Fuel for U.S. Research Reactors«, URL <https://www.energy.gov/ne/articles/framatome-makes-first-triga-fuel-us-research-reactors> (Abgerufen: 13. Oktober 2024a). *Energy.gov*

DOE, United States Department of Energy: »At COP28, Countries Launch Declaration to Triple Nuclear Energy Capacity by 2050, Recognizing the Key Role of Nuclear Energy in Reaching Net Zero«, URL <https://www.energy.gov/articles/cop28-countries-launch-declaration-triple-nuclear-energy-capacity-2050-recognizing-key> (Abgerufen: 1. März 2024b). *Energy.gov*

- DOE, United States Department of Energy: »Biden-Harris Administration Announces \$900 Million to Build and Deploy Next-generation Nuclear Technologies«, URL <https://www.energy.gov/articles/biden-harris-administration-announces-900-million-build-and-deploy-next-generation-nuclear> (Abgerufen: 18. Oktober 2024). *Energy.gov*
- Dyson, Freeman John: *Disturbing the Universe*, Alfred P. Sloan Foundation Program. New York, 1979.
- Eberhardt, Klaus: »Praktische Übung am TRIGA Mainz Versuch 5 Reaktor im Pulsbetrieb - Praktikumsskript«.
- Elysium Industries: »Elysium Industries: Über uns | LinkedIn«, URL <https://www.linkedin.com/company/elysium-industries-limited/about/> (Abgerufen: 4. August 2024).
- European Commission: »European Industrial Alliance on Small Modular Reactors - European Commission«, URL https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-industrial-alliance-small-modular-reactors_en (Abgerufen: 15. Oktober 2024a).
- European Commission, Directorate-General for Energy: »Commission to ally with industry on Small Modular Reactors - European Commission«, URL https://energy.ec.europa.eu/news/commission-ally-industry-small-modular-reactors-2024-02-09_en (Abgerufen: 16. Februar 2024b).
- European Commission, Directorate-General for Energy: »Small Modular Reactors explained«, URL https://energy.ec.europa.eu/topics/nuclear-energy/small-modular-reactors/small-modular-reactors-explained_en (Abgerufen: 10. März 2024).
- European Commission, Directorate-General for Research and Innovation: *Euratom research and training programme 2021-2025*, 2021.
- Flügge, Siegfried: »Kann der Energiegehalt der Atomkerne technisch nutzbar gemacht werden?«, in: Wohlfarth, Horst (Hrsg.): *40 Jahre Kernspaltung: e. Einf. in d. Orig.-Literatur*. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft, [Abt. Verl.], 1979 — ISBN 978-3-534-08206-3, S. 119–140

Fouquet, Douglas M/Razvi, Junaid/Whittemore, William L: »TRIGA research reactors: A pathway to the peaceful applications of nuclear energy«, in: *Nuclear News* Bd. 46 (November 2003), Nr. 12, S. 46–57

FRAMATOME: »Framatome teams with General Atomics to restart world's unique fuel fabrication facility for TRIGA research reactors«, URL <https://www.framatome.com/medias/framatome-generalatomics-re-starts-worlds-unique-fuel-fabrication-facility-for-triga-research-reactors/> (Abgerufen: 13. Oktober 2024). *Framatome - Espace presse*

Frey, Hartmut: *Kernenergie: Kraftwerkstypen, Entwicklungen und Risiken, Lehrbuch*. Wiesbaden [Heidelberg], 2021.

Gaulkin, Thomas: »Counting the dead at Hiroshima and Nagasaki«, URL <https://thebulletin.org/2020/08/counting-the-dead-at-hiroshima-and-nagasaki/> (Abgerufen: 10. August 2024). *Bulletin of the Atomic Scientists*

GE Hitachi, GE-Hitachi Nuclear Energy: »About GE Hitachi | GE Hitachi Nuclear Energy«, URL <https://www.governova.com/nuclear/about> (Abgerufen: 16. Oktober 2024). *governova-nuclear*

General Atomics: »History«, URL <https://www.ga.com/about/history> (Abgerufen: 16. August 2024a). *General Atomics*

General Atomics: »TRIGA Nuclear Reactors«, URL <https://www.ga.com/triga/> (Abgerufen: 1. September 2024b). *General Atomics*

General Dynamics: »Our History | General Dynamics«, URL <https://www.gd.com/about-gd/our-history> (Abgerufen: 30. September 2024).

Geppert, Christopher: »Willkommen am Forschungsreaktor TRIGA Mainz«.

Gläser, Jochen/Laudel, Grit: *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen*. 4. Auflage. Aufl. Wiesbaden, 2010.

GOV.UK, Department for Business, Energy & Industrial Strategy: »About us«, URL <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-business-energy-and-industrial-strategy/about> (Abgerufen: 25. Februar 2024a). *GOV.UK*

- GOV.UK, Department for Energy Security & Net Zero: »Advanced Nuclear Technologies«, URL <https://www.gov.uk/government/publications/advanced-nuclear-technologies/advanced-nuclear-technologies> (Abgerufen: 18. Oktober 2024b). GOV.UK
- GRS, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH: »Europäischer Druckwasserreaktor (EPR) | GRS gGmbH«, URL <https://www.grs.de/de/glossar/europaeischer-druckwasserreaktor-epr> (Abgerufen: 9. Oktober 2024).
- Hekkert, M. P./Suurs, R. A. A./Negro, S. O./Kuhlmann, S./Smits, R. E. H. M.: »Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change«, in: *Technological Forecasting and Social Change* Bd. 74 (1. Mai 2007), Nr. 4, S. 413–432
- Hitachi-GE, Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.: »About us : Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.«, URL <https://www.hitachi-hgne.co.jp/en/about/index.html> (Abgerufen: 16. Oktober 2024).
- IAEA, International Atomic Energy Agency: »The Statute of the IAEA«, URL <https://www.iaea.org/about/statute> (Abgerufen: 12. Februar 2024).
- IAEA, International Atomic Energy Agency: *History, Development and Future of TRIGA Research Reactors, IAEA technical reports series*. Vienna, 2016a.
- IAEA, International Atomic Energy Agency: »History«, URL <https://www.iaea.org/about/overview/history> (Abgerufen: 12. Februar 2024b).
- IAEA, International Atomic Energy Agency: »Small Modular Reactor (SMR) Regulators' Forum«, URL <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors/smr-regulators-forum> (Abgerufen: 10. März 2024).
- IAEA, International Atomic Energy Agency: *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments - A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)*. 2022 Edition. Aufl. Vienna, 2022.
- IAEA, International Atomic Energy Agency: »RRDB - TRIGA«, URL <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home> (Abgerufen: 17. August 2024a).

- IAEA, International Atomic Energy Agency: »PRIS - Home«, URL <https://pris.iaea.org/pris/> (Abgerufen: 18. Oktober 2024b).
- IAEA, International Atomic Energy Agency/Joanne Liou: »What is Net Zero? What is the Role of Nuclear Power and Innovations?«, URL <https://www.iaea.org/bulletin/what-is-net-zero-what-is-the-role-of-nuclear-power-and-innovations> (Abgerufen: 19. Oktober 2024).
- IAEA, International Atomic Energy Agency/Watson, Nicholas/Peguero, Lara: »IAEA Presents New Platform on Small Modular Reactors and Their Applications«, URL <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-presents-new-platform-on-small-modular-reactors-and-their-applications> (Abgerufen: 26. Januar 2024).
- IAEA, International Atomic Energy Agency (Hrsg.): *Technology Roadmap for Small Modular Reactor Deployment, Nuclear Energy Series*. Vienna, 2021.
- IAEA, International Atomic Energy Agency (Hrsg.): *Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series*. Vienna, 2023.
- Idaho National Laboratory: »52 Reactors«, URL <https://inl.gov/52-reactors/> (Abgerufen: 12. Oktober 2024). *Idaho National Laboratory*
- Ingersoll, Daniel T.; Carelli, Mario D. (Hrsg.): *Handbook of small modular nuclear reactors, Woodhead Publishing series in energy*. Second edition. Aufl. Oxford, United Kingdom ; Cambridge, MA, 2021.
- Johannes Gutenberg-Universität Mainz: »Informationen | Forschungsreaktor TRIGA Mainz«, URL <https://www.triga.uni-mainz.de/informationen/> (Abgerufen: 9. Oktober 2024). *Johannes Gutenberg-Universität Mainz*
- Josephson, Paul R.: »Atoms for Peace in the 1950s: Lessons from the Spread of Nuclear Technology in the Early Cold War«, in: *Journal of Cold War Studies* Bd. 25 (15. September 2023), Nr. 3, S. 6–13
- kernenergie.ch: »Element Uran«, URL <https://www.kernenergie.ch/de/element-uran.html> (Abgerufen: 18. Oktober 2024). *kernenergie.ch*
- Klöppelt, Christian/Wagner, Patrick/Drechsler, Elisa: *Fraunhofer_Faktencheck_Kernenergie*. Halle (Saale), 2024.

- Koelzer, Winfried: *Lexikon zur Kernenergie. Ausgabe Januar 2019*. Ausg. Januar 2019. Aufl., 2019.
- Köhler, Jonathan/Raven, Rob/Walrave, Bob: »Advancing the analysis of technological innovation systems dynamics: Introduction to the special issue«, in: *Technological Forecasting and Social Change* Bd. 158 (September 2020), S. 120040
- Koschatzky, Knut/Daimer, Stephanie/Köhler, Jonathan/Lindner, Ralf/Nabitz, Lisa/Plötz, Patrick/Walz, Rainer: »Innovationssystem - breiter denken: Fünf Thesen an die Innovationspolitik zu einem neuen Innovationssystemverständnis« (Oktober 2016)
- Krafft, Fritz/Strassmann, Fritz: *Im Schatten der Sensation: Leben und Wirken von Fritz Straßmann*. Weinheim, Basel [usw.], 1981.
- Kuckartz, Udo/Rädiker, Stefan: *Fokussierte Interviewanalyse mit MAXQDA: Schritt für Schritt*. Wiesbaden, 2024.
- McSafer Projekt: »ABOUT McSAFER«, URL <https://mcsafer-h2020.eu/about-mcsafer/> (Abgerufen: 29. April 2024). *McSAFER project*
- Messick, Chuck: »Foreign Research Reactor Spent Nuclear Fuel Acceptance Program.«.
- Mignacca, B./Locatelli, G.: »Economics and finance of Small Modular Reactors: A systematic review and research agenda«, in: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Bd. 118 (Februar 2020), S. 109519
- Mire, Maxime Juestz de: »Declaration of the EU Nuclear Alliance, meeting of March 4th, 2024«, URL <https://presse.economie.gouv.fr/declaration-of-the-eu-nuclear-alliance-meeting-of-march-4th-2024/> (Abgerufen: 18. Oktober 2024). *Presse - Ministère des Finances*
- Müller, Rolf-Dieter; Puschner, Uwe (Hrsg.): *Der Zweite Weltkrieg*. 1. Aufl., 2015.
- NEA, Nuclear Energy Agency: *The NEA Small Modular Reactor Dashboard*. Paris, 2023.

- NEA, Nuclear Energy Agency: »About Us«, URL https://oecd-nea.org/jcms/tro_5705/about-us (Abgerufen: 10. März 2024). *Nuclear Energy Agency (NEA)*
- NEA, Nuclear Energy Agency/OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development: *Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment, Nuclear Development*. Paris, 2016.
- Neuhoff, Karsten/Kröger, Mats/Stolle, Leon: »Ein Erneuerbare-Energien-Pool lässt Verbraucher*innen an den Vorteilen der Energiewende teilhaben«, in: *DIW Wochenbericht*, DIW - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (2024), Nr. 15/2024, S. 227–234
- NUSCALE: »Utah Associated Municipal Power Systems (UAMPS) and NuScale Power Agree to Terminate the Carbon Free Power Project (CFPP) | NuScale Power«, URL [https://nuscale-prod-7ri9iy8kt-nuscale-power.vercel.app/news/press-releases/2023/uamps-and-nuscale-power-agree-to-terminate-the-carbon-free-power-project?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=Press+Release+\(11%2F8%2F2023\)+-+Utah+Associated+Municipal+Power+Systems+\(UAMPS\)+and+NuScale+Power+Agree+to+Terminate+the+Carbon+Free+Power+Project+\(CFPP\)](https://nuscale-prod-7ri9iy8kt-nuscale-power.vercel.app/news/press-releases/2023/uamps-and-nuscale-power-agree-to-terminate-the-carbon-free-power-project?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=Press+Release+(11%2F8%2F2023)+-+Utah+Associated+Municipal+Power+Systems+(UAMPS)+and+NuScale+Power+Agree+to+Terminate+the+Carbon+Free+Power+Project+(CFPP)) (Abgerufen: 2. März 2024).
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development: »OECD 60th anniversary«, URL <http://p00f5244272.eu.racontr.com/index.html> (Abgerufen: 12. Februar 2024). *OECD 60th anniversary*
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development/NEA, Nuclear Energy Agency: »Storage of Radioactive Waste and Spent Fuel«, in: *Radioactive Waste Management and Decommissioning* Bd. NEA No. 7406 (2020a)
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development/NEA, Nuclear Energy Agency: *Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders*, 2020b.
- OECD, Organisation for Economic Co-operation and Development/NEA, Nuclear Energy Agency: *Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities*, 2021.

- Office of Nuclear Energy: »TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth«, URL <https://www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth> (Abgerufen: 3. April 2024). *Energy.gov*
- OPG, Ontario Power Generation Inc.: »Small modular reactors - Darlington SMR«, URL <https://www.opg.com/projects-services/projects/nuclear/smr/darlington-smr/> (Abgerufen: 16. Oktober 2024). *OPG*
- Overstraeten, Benoit Van/Mallet, Benjamin: »EDF announces new delay and higher costs for Flamanville 3 reactor«, in: *Reuters* (12. Januar 2022)
- Permanent Mission of France, Permanent Mission of France to the United Nations and the International Organisations in Vienna: »Nuclear power and SMR are central to the«, URL <https://onu-vienne.delegfrance.org/Nuclear-power-and-SMR-are-central-to-the-France-2030-investment-plan> (Abgerufen: 18. Oktober 2024). *Représentation permanente de la France auprès des Organisations Internationales et des Nations unies à Vienne*
- Pistner, Christoph/Englert, Matthias/Küppers, Christian/von Hirschhausen, Christian/Wealer, Ben/Steigerwald, Björn/Donderer, Richard: »Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors)« (2021)
- Purkus, Alexandra/Lüdtke, Jan/Jochem, Dominik: *Entwicklung der Rahmenbedingungen für das Bauen mit Holz in Deutschland: Eine Innovationssystemanalyse im Kontext der Evaluation der Charta für Holz 2.0*. DE, 2020.
- Reed, Bruce Cameron: *Atomic Bomb: The Story of the Manhattan Project: How nuclear physics became a global geopolitical game-changer*, 2015.
- Riemer, Jessica: »Brückentechnologie oder alter Hut - Untersuchung zum Stand von Forschung und Entwicklung für Small Modular Reactors (SMR)«. Darmstadt, Wilhelm-Büchner-Hochschule, Vertiefungsarbeit, 2024
- Taylor, Theodore Brewster/McReynolds, Andrew Wetherbee/Dyson, Freeman John: »Reactor with prompt negative temperature coefficient and fuel element therefor«.

»Terms of Reference Small Modular Reactor (SMR) Regulators' Forum (SMR RF)«, SMR RF, Small Modular Reactor Regulators' Forum (Hrsg.).

Terrell, Michael: »New nuclear clean energy agreement with Kairos Power«, URL <https://blog.google/outreach-initiatives/sustainability/google-kairos-power-nuclear-energy-agreement/> (Abgerufen: 18. Oktober 2024). *Google - The Keyword*

U.S. NRC, United States Nuclear Regulatory Commission: »Small Modular Reactors (LWR designs)«, URL <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr.html> (Abgerufen: 25. Februar 2024). *NRC Web*

Walrave, Bob/Raven, Rob: »Modelling the dynamics of technological innovation systems«, in: *Research Policy* Bd. 45 (November 2016), Nr. 9, S. 1833–1844

Wimmers, Alexander/Göke, Leonard/von Hirschhausen, Christian/Kempf, Claudia: *Ökonomische Aspekte der Atomkraft*. Berlin, 2023.

Wimmers, Alexander/Böse, Fanny/Kempf, Claudia/Steigerwald, Björn/von Hirschhausen, Christian/Weibezahn, Jens: *Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen*, *DIW Wochenbericht* (Nr. 10/2023), 2023b.

WNA, World Nuclear Association: »Uranium Enrichment - World Nuclear Association«, URL <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/uranium-enrichment> (Abgerufen: 18. Oktober 2024).

WNA, World Nuclear Association: »Nuclear Power in France«, URL <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france> (Abgerufen: 19. Oktober 2024a). *Country Profiles, Nuclear Power in France*

WNA, World Nuclear Association: »South Korea plans SMR industrial complex«, URL <https://world-nuclear-news.org/articles/south-korea-plans-smr-industrial-complex> (Abgerufen: 18. Oktober 2024b). *World Nuclear News*

WNA, World Nuclear Association: »Homepage - World Nuclear News«, URL <https://www.world-nuclear-news.org/> (Abgerufen: 15. Oktober 2024).

WNA, World Nuclear Association: »Who We Are - World Nuclear Association«, URL <https://world-nuclear.org/our-association/who-we-are> (Abgerufen: 15. Oktober 2024).

Wohlfarth, Horst (Hrsg.): *40 Jahre Kernspaltung: e. Einf. in d. Orig.-Literatur*. Darmstadt, 1979.

Anhang I – Glossar

Anreicherungsgrad von Kernbrennstoffen:

Natürliches Uran besteht aus den Isotopen U-238, U-234 und U-235. Der Spaltstoff U-235 kommt dabei im natürlichen Anteil mit 0,72% vor, U-238 stellt mit 99% das überwiegende Isotop im natürlichen Uran dar, U-234 kommt nur in geringen Spuren im natürlichen Uran vor.

Unter Urananreicherung versteht man die Abtrennung der Isotopen U-235 und U-238 mittels (Gas-)Zentrifugen voneinander, um so den Anteil an U-235 zu erhöhen (kernenergie.ch, 2024; WNA, 2022). Abhängig vom Anreicherungsgrad wird Uran unterschiedliche kategorisiert, wie in der nachfolgenden Tabelle 13 dargestellt ist.

Tabelle 13: Uran-Bezeichnungen abhängig vom Anreicherungsgrad. Grundlage für die Tabelle sind (kernenergie.ch, 2024; WNA, 2022).

Anteil U-235	Uran-Kategorie	Verwendung
< 0,72 %	Abgereichertes Uran	Ausgleichsgewichte, Munition
0,72 %	Natürliches Uran	
> 0,72 % < 5 %	Leichtangereichertes Uran (Low-enriched-Uranium) LEU	Brennelemente in klassischen Leichtwasserreaktoren
> 5 % < 20 %	Leichtangereichertes Uran (High assay low enriched Uranium) HALEU	TRIGA Brennstoff für die meisten TRIGA – Reaktoren, andere Forschungsreaktoren, SMRs (abhängig vom Design)
> 20 %	Hochangereichertes Uran (High enriched Uranium) HEU	Forschungsreaktoren

IAEA (International Atomic Energy Agency)

Die IAEA ist ein Organ der Vereinten Nationen. Das Inkrafttreten der ersten Satzung am 29.07.1957 begründet die IAEA (IAEA, 2016b). Ihr Doppel-Ziel ist im Artikel II der eigenen Satzung festgehalten:

“The Agency shall seek to accelerate and enlarge the contribution of atomic energy to peace, health and prosperity throughout the world. It shall ensure, so far as it is able, that assistance provided by it or at its request or under its supervision or control is not used in such a way as to further any military purpose.” (IAEA, 2014, art. II)

Die IAEA hat zur Aufgabe eine friedliche und sichere Nutzung der Kernenergie voranzutreiben und gleichzeitig soll eine militärische Nutzung der Technologie unterbunden werden. Dafür wurde sie durch Artikel III Teil A der Satzung mit diversen Befugnissen ausgestattet. So darf die IAEA zum Beispiel die Erforschung und Entwicklung der Kernenergie, sowie deren Anwendung weltweit fördern und unterstützen (IAEA, 2014, art. III A). Insbesondere in Satz 2.2 wird darauf hingewiesen, dass die Bedürfnisse weniger entwickelter Länder gebührend zu berücksichtigen sind (IAEA, 2014, art. II A, Satz 2.2). Eine weitere wichtige Kompetenz ist in Satz 6.6 genannt: Die IAEA ist verantwortlich für das Aufstellen von Sicherheitsnormen auf dem Gebiet der Kerntechnik (IAEA, 2014, art. III A). Diese fließen dann direkt oder indirekt wieder in die Genehmigungsaufgaben für Kerntechnische Anlagen in den jeweiligen Mitgliedsländern der IAEA ein.

Leichtwasser

Als leichtes Wasser (H_2O) wird Wasser bezeichnet, welches die natürliche Verteilung von Wasserstoff und Deuterium aufweist. Dabei liegt der Anteil des Wasserstoffatoms am Isotopengemisch bei 99,9%. Leichtes Wasser hat eine höhere Wahrscheinlichkeit Neutronen zu absorbieren als schweres Wasser (D_2O), was sich auf das Reaktordesign und den verwendeten Brennstoff auswirkt (Koelzer, 2019, S. 180 f.).

OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development)

Die OECD besteht seit 1960 und ist aus der Vorgängerorganisation „Organisation for European Economic Co-Operation, kurz OEEC, hervorgegangen. Aufgabe der Organisation ist es Wohlstand in der Welt herzustellen, in dem sie Regierungen bei der Entwicklung von Strategien für nachhaltiges und dauerhaftes Wachstum berät. Werkzeuge dafür sind Analysen und Empfehlungen, die auf Fakten und Wissenschaft basieren (OECD). Auf dem Gebiet der Kernenergie ist vor allem der Teilbereich „Nuclear Energy Agency“ tätig, der die Aufgabe hat Mitgliedsstaaten bei der Nutzung und Weiterentwicklung von Kernenergie zu unterstützen (NEA).

Radioaktivität:

Radioaktivität beschreibt die spontane Änderung eines Atomkerns. Die Änderung im Kern selbst ist abhängig von dem jeweiligen Typ der Radioaktivität. Eine Übersicht der wichtigsten Arten der Radioaktivität ist in Tabelle 14 dargestellt. Radioaktivität kann sowohl bei Isotopen vorkommen, die natürlich vorhanden sind oder auch künstlich durch Kernreaktionen ausgelöst werden. Radioaktive Zerfälle werden oftmals durch elektromagnetische Strahlung, sog. γ -Strahlung, begleitet. Diese ist für das jeweilige Isotop charakteristisch (Frey, 2021, S. 32 f.).

Tabelle 14: Beschreibung der wichtigsten Grundarten der Radioaktivität nach (Frey, 2021, S. S. 33 Tabelle 2.4)

Typ der Radioaktivität	Änderung der Kernladungszahl	Änderung der Massenzahl	Art des Vorgangs
a-Zerfall	$Z - 2$	$A - 4$	Emission von a-Teilchen; a-Teilchen bestehen aus zwei Protonen (p) und zwei Neutronen (n), die miteinander zu einem Ganzen verbunden sind. Mangels Elektronen ist der Kern positiv geladen (2+).
b ⁻ -Zerfall	$Z + 1$	A	Umwandlung eines Neutrons (n) in ein Proton unter Aussendung eines Elektrons (e ⁻) und eines Elektron-Antineutrinos.

			$n \rightarrow p + (e^- + \bar{\nu}_e)$
b ⁺ -Zerfall	$Z - 1$	A	Umwandlung eines Protons in ein Neutron unter Aussendung eines Positron (e^+) und eines Elektron-Neutrinos. $p \rightarrow n + (e^+ + \nu_e)$
Elektroneneinfang	$Z - 1$	A	Umwandlung eines Positrons in ein Neutron unter Einfang eines Elektrons aus der Elektronenhülle des Atoms. $p + e^- \rightarrow n + (\nu_e)$
Spontanspaltung	$Z - \sim \frac{1}{2} Z$	$A - \sim \frac{1}{2} A$	Spaltung des Kerns in zu- meist zwei Teile mit annähernd gleicher Masse und Ladung

Schwerwasser:

Als schweres Wasser (D₂O) wird Wasser bezeichnet, welches mit Wassermolekülen angereichert ist, die Deuterium anstelle von Wasserstoff im Molekül eingebaut haben. Deuterium ist ein Wasserstoffisotop mit zwei Neutronen statt einem Neutron im Kern. Schweres Wasser hat eine niedrigere Wahrscheinlichkeit Neutronen zu absorbieren als leichtes Wasser (H₂O), was sich auf das Reaktordesign und den verwendeten Brennstoff auswirkt (Koelzer, 2019, S. 180 f.).

Anhang II – Kategoriensystem für die Auswertung der Experteninterviews unter Verwendung des Programms MAXQDA

Liste der Codes	Memo	Häufigkeit
Zitierfähige Stellen		23
Vorteile IS TRIGA gegenüber IS SMRs	Vorteile, des Innovationssystem TRIGA gegenüber dem Innovationssystem SMRs	19
Junge Unternehmen im IS SMRs		2
Herausforderungen junger Unternehmen		11
Beitrag junger Unternehmen	Warum werden sie benötigt? Was leisten sie?	8
<i>Start-ups als Ideenschmiede</i>		10
Aussichten auf Erfolg	Erfolgsaussichten von jungen Unternehmen, unabhängig ob diese positiv oder negativ bewertet werden	15
<i>Positive Aussichten</i>	Positive Aussichten auf Erfolg für junge	2
<i>Negative Aussichten</i>	Negative Aussichten auf Erfolg für junge Unternehmen	18
Vorteile junger Unternehmen	Vorteile junger Unternehmen/Start-ups gegenüber etablierten Unternehmen	12
Vorteile etablierter Unternehmen	Vorteile etablierter Unternehmen gegenüber jungen Unternehmen	7
Sonstiges		4
SMR Markterwartung		1
Potenzial von SMRs		22
<i>Uneindeutige Markterwartung</i>	Marktaussichten nicht eindeutig positiv oder negativ bewertet	6
<i>Negative Markterwartung</i>	Marktaussichten negativ bewertet	7
<i>Positive Markterwartung</i>	Marktaussichten positiv bewertet	19
Verbesserungen benötigt	Wie könnte der Markt positiv beeinflusst werden?	9
Sonstiges		5
Junge Talente		0
Motivation für junger Menschen in der Nuklearindustrie		0
<i>Andere Motivationsgründe</i>	Alle anderen Motivationsgründe außer dem Klimaschutz	1
<i>Klimawandel als Motivationsgrund</i>	Umgang mit dem Klimawandel als Motivationsgrund für die Arbeit auf dem Gebiet der Kerntechnik	2
Neutrale Meinung		1
Negative Meinung	Negative Meinung zum Thema Nachwuchs, die ausdrückt, dass nicht genügend Nachwuchs vorhanden ist	6
Positive Meinung	Positive Meinung, die ausdrückt, dass genügend Nachwuchs vorhanden ist. Positive Meinungen, die ein gestiegenes Interesse junger Talente für die Kerntechnik wahrnimmt.	6
Prototypen		2
Wichtigkeit von Prototypen	Bewertung der Wichtigkeit von Prototypen für die Verbreitung von SMRs.	9
Herausforderungen für Prototypen		10
Gründe für Prototypen	Gründe, warum Prototypen in der Entwicklung	8
Entwicklungsgeschwindigkeit von		1
Beurteilung der Geschwindigkeit	Wie bewerten die Interviewpartner die Geschwindigkeit.	5
Bedingungen, die die Entwicklung verlangsamen	Alle Aspekte, die eine Entwicklung von Reaktoren bremsen	16

Liste der Codes	Memo	Häufigkeit
Bedingungen, die die Entwicklung beschleunigen	Alle Aspekte, die die Entwicklungszeit eines Reaktors beschleunigen können	16
Herausforderungen für SMRs		1
Legitimität		1
<i>Haltung der Gesellschaft gegenüber</i>		4
<i>Politische Entscheidungen</i>		5
<i>Regularien</i>		4
Ressourcenmobilisierung		3
<i>Lieferkette</i>		5
Suchrichtung		0
Wissensverbreitung		1
Wissensentstehung		3
Unternehmerische Aktivitäten		1
<i>Fehlendes Produkt</i>		2
Marktentstehung	Bremssende oder negative Auswirkungen auf den Markt von SMRs	5
<i>Konkurrenzsituation mit großen Kernkraftwerken</i>		4
<i>Konkurrenzsituation SMRs</i>		2
Sonstiges		1
<i>Vision für die Kernenergie</i>		2
Sonstiges		12
TRIGA als Geschenk		4
Wichtigkeit von Erfahrung bzw. Codesystem Summe		5
		351

Anhang III – Wichtige Auszüge aus der „Atoms for Peace“ – Rede von Dwight D. Eisenhower vor der Generalversammlung der Vereinten Nationen

“Address by Mr. Dwight D. Eisenhower, President of the United States of America, to the 470th Plenary Meeting of the United Nations General Assembly

Tuesday, 8 December 1953, 2:45 p.m.

General Assembly President: Mrs. Vijaya Lakshmi Pandit (India)

[...]

I know that the American people share my deep belief that if a danger exists in the world, it is a danger shared by all; and equally, that if hope exists in the mind of one nation, that hope should be shared by all. Finally, if there is to be advanced any proposal designed to ease even by the smallest measure the tensions of today's world, what more appropriate audience could there be than the members of the General Assembly of the United Nations. [...] I feel impelled to speak today in a language that in a sense is new [...] That new language is the language of atomic warfare.

[...] On 16 July 1945, the United States set off the world's biggest atomic explosion. Since that date in 1945, the United States of America has conducted forty-two test explosions. Atomic bombs are more than twenty-five times as powerful as the weapons with which the atomic age dawned, while hydrogen weapons are in the ranges of millions of tons of TNT equivalent.

Today, the United States stockpile of atomic weapons, which, of course, increases daily, exceeds by many times the total equivalent of the total of all bombs and all shells that came from every plane and every gun in every theatre of war in all the years of the Second World War. A single air group whether afloat or land based, can now deliver to any reachable target a destructive cargo exceeding in power all the bombs that fell on Britain in all the Second World War.

In size and variety, the development of atomic weapons has been no less remarkable. The development has been such that atomic weapons have virtually achieved conventional status within our armed services. In the United States,

the Army, the Navy, the Air Force and the Marine Corps are all capable of putting this weapon to military use.

But the dread secret and the fearful engines of atomic might are not ours alone. In the first place, the secret is possessed by our friends and allies, the United Kingdom and Canada, whose scientific genius made a tremendous contribution to our original discoveries and the designs of atomic bombs.

The secret is also known by the Soviet Union. The Soviet Union has informed us that, over recent years, it has devoted extensive resources to atomic weapons. During this period the Soviet Union has exploded a series of atomic devices, including at least one involving thermo-nuclear reactions. [...]

First, the knowledge now possessed by several nations will eventually be shared by others, possibly all others. Second, even a vast superiority in numbers of weapons, and a consequent capability of devastating retaliation, is no preventive, of itself, against the fearful material damage and toll of human lives that would be inflicted by surprise aggression. [...] Should such an atomic attack be launched against the United States, our reactions would be swift and resolute. But for me to say that the defence capabilities of the United States are such that they could inflict terrible losses upon an aggressor, for me to say that the retaliation capabilities of the United States are so great that such an aggressor's land would be laid waste, all this, while fact, is not the true expression of the purpose and the hopes of the United States. [...] Could anyone wish his name to be coupled by history with such human degradation and destruction? Occasional pages of history do record the faces of the "great destroyers", but the whole book of history reveals mankind's never-ending quest for peace and mankind's God-given capacity to build.

It is with the book of history, and not with isolated pages, that the United States will ever wish to be identified. My country wants to be constructive, not destructive. It wants agreements, not wars, among nations. [...] So my country's purpose is to help us to move out of the dark chamber of horrors into the light, to find a way by which the minds of men, the hopes of men, the souls of men everywhere, can move forward towards peace and happiness and well-being. [...]

The United States knows that if the fearful trend of atomic military build-up can be reversed, this greatest of destructive forces can be developed into a great boon, for the benefit of all mankind. The United States knows that peaceful power from atomic energy is no dream of the future. The capability, already proved, is here today. Who can doubt that, if the entire body of the world's scientists and engineers had adequate amounts of fissionable material with which to test and develop their ideas, this capability would rapidly be transformed into universal, efficient and economic usage?

To hasten the day when fear of the atom will begin to disappear from the minds the people and the governments of the East and West, there are certain steps that can be taken now.

I therefore make the following proposal.

The governments principally involved, to the extent permitted by elementary prudence, should begin now and continue to make joint contributions from their stockpiles of normal uranium and fissionable materials to an international atomic energy agency. We would expect that such an agency would be set up under the aegis of the United Nations. [...] The more important responsibility of this atomic energy agency would be to devise methods whereby this fissionable material would be allocated to serve the peaceful pursuits of mankind. Experts would be mobilized to apply atomic energy to the needs of agriculture, medicine and other peaceful activities. A special purpose would be to provide abundant electrical energy in the power-starved areas of the world.

Thus the contributing Powers would be dedicating some of their strength to serve the needs rather than the fears of mankind.

[...]

Against the dark background of the atomic bomb, the United States does not wish merely to present strength, but also the desire and the hope for peace.

[...]” („Atoms for Peace Speech“, 2014)

Anhang IV – Auszug aus der Research Reactor Database der IAEA: Liste der TRIGA Reaktoren

Facility Name	Country	City	Type	Thermal Power [kW _{th}]	Status	First Criticality Date
UT TRIGA Univ. Texas	USA	Austin, TX	TRIGA MARK I	250	DECOMMISSIONED	01.01.1963
BRR UC Berkeley	USA	Berkeley, CA	TRIGA MARK III	1000	DECOMMISSIONED	08.10.1966
ICI TRIGA Reactor	UK	Billingham	TRIGA MARK I	250	DECOMMISSIONED	08.01.1971
TRIGA Mark I Michigan State Univ.	USA	East Lansing, MI	TRIGA MARK I	250	DECOMMISSIONED	03.21.1969
FRF-2	Germany	Frankfurt am Main	TRIGA CONV	1000	DECOMMISSIONED	10.01.1977
FRH	Germany	Hannover	TRIGA MARK I	250	DECOMMISSIONED	01.31.1973
TRIGA Mark F, Northrop	USA	Hawthorne, CA	TRIGA MARK F	1000	DECOMMISSIONED	01.01.1963
TRIGA HD I	Germany	Heidelberg	TRIGA MARK I	250	DECOMMISSIONED	08.01.1966
TRIGA HD II	Germany	Heidelberg	TRIGA MARK I	250	DECOMMISSIONED	02.28.1978
TRIGA Cornell Univ	USA	Ithaca, NY	TRIGA MARK II	500	DECOMMISSIONED	01.01.1962
TRIGA Puerto Rico Nuclear Center	USA	Mayagüez, Puerto Rico	TRIGA CONV	2000	DECOMMISSIONED	01.19.1972
Veterans Affairs RR	USA	Omaha, NE	TRIGA MARK I	20	DECOMMISSIONED	06.26.1959
TRIGA Mark II	USA	San Diego, CA	TRIGA MARK II	50	DECOMMISSIONED	12.11.1959
GA-TRIGA III	USA	San Diego, CA	TRIGA MARK III	2000	DECOMMISSIONED	01.01.1966
KRR-1	Korea, Republic of	Seoul	TRIGA MARK II	250	DECOMMISSIONED	03.19.1962
KRR-2	Korea, Republic of	Seoul	TRIGA MARK III	2000	DECOMMISSIONED	04.10.1972
DORF TRIGA Mark F Univ. Arizona	USA	Silver Spring, MD	TRIGA MARK F	250	DECOMMISSIONED	09.01.1961
TRIGA Univ. Illinois Advanced TRIGA	USA	Tucson, AZ	TRIGA MARK I	100	DECOMMISSIONED	12.06.1958
Univ. Illinois Advanced TRIGA	USA	Urbana, IL	TRIGA MARK II	1500	DECOMMISSIONED	07.23.1969
LOPRA Univ. Illinois	USA	Urbana, IL	TRIGA	10	DECOMMISSIONED	12.28.1971
TRICO II	Democratic Republic of the Congo	Kinshasa	TRIGA MARK II	1000	EXTENDED SHUT-DOWN	03.24.1972
ACRR Annular Core RR	USA	Albuquerque, NM	TRIGA MODIFIED	2400	OPERATIONAL	06.01.1967
TRIGA II Univ. Texas	USA	Austin, TX	TRIGA MARK II	1100	OPERATIONAL	03.12.1992
TRIGA Mark II, Bandung	Indonesia	Bandung	TRIGA MARK II	2000	OPERATIONAL	10.19.1964
TRR-1/M1	Thailand	Bangkok	TRIGA MARK III	1300	OPERATIONAL	11.07.1977
IPR-R1	Brazil	Belo Horizonte	TRIGA MARK I	100	OPERATIONAL	11.06.1960
AFRRI TRIGA	USA	Bethesda, MD	TRIGA MARK F	1000	OPERATIONAL	01.01.1962
IAN-R1	Colombia	Bogota	TRIGA CONV	30	OPERATIONAL	01.20.1965
MUTR Univ. Maryland	USA	College Park, MD	TRIGA MODIFIED	250	OPERATIONAL	12.01.1960
NSCR Texas A&M Univ.	USA	College Station, TX	TRIGA CONV	1000	OPERATIONAL	01.01.1962
OSTR, Oregon State Univ.	USA	Corvallis, OR	TRIGA MARK II	1100	OPERATIONAL	03.08.1967
GSTR US Geological Survey	USA	Denver	TRIGA MARK I	1000	OPERATIONAL	02.26.1969
BTRR, BAEC TRIGA Research Reactor	Bangladesh	Dhaka	TRIGA MARK II	3000	OPERATIONAL	09.14.1986
THOR	Taiwan, China	Hsinchu City	TRIGA CONV	2000	OPERATIONAL	04.13.1961
NRAD	USA	Idaho Falls, ID	TRIGA MARK II	250	OPERATIONAL	10.12.1977

UC Irvine TRIGA	USA	Irvine, CA	TRIGA MARK I	250	OPERATIONAL	11.25.1969
ITU-TRR	Türkiye	Istanbul	TRIGA MARK II	250	OPERATIONAL	03.11.1979
TRIGA Puspatti (RTP)	Malaysia	Kajang	TRIGA MARK II	1000	OPERATIONAL	06.28.1982
TRIGA Mark III	Mexico	La Marquesa Ocoyoacac	TRIGA MARK III	1000	OPERATIONAL	11.08.1968
TRIGA- MARK II LJUBLJANA	Slovenia	Ljubljana	TRIGA MARK II	250	OPERATIONAL	05.31.1966
UWNR Univ. Wisconsin FRMZ	USA	Madison, WI	TRIGA CONV	1000	OPERATIONAL	03.26.1961
	Germany	Mainz	TRIGA MARK II	100	OPERATIONAL	08.03.1965
KSU TRIGA Mark II	USA	Manhattan, KN	TRIGA MARK II	250	OPERATIONAL	10.16.1962
Dow TRIGA	USA	Midland, MI	TRIGA MARK I	300	OPERATIONAL	07.06.1967
LENA, TRIGA II PAVIA	Italy	Pavia	TRIGA MARK II	250	OPERATIONAL	11.15.1965
TRIGA II Pitesti - SS Core	Romania	Pitesti	TRIGA DUAL CORE	14000	OPERATIONAL	02.02.1980
TRIGA II Pitesti - Pulsed	Romania	Pitesti	TRIGA DUAL CORE	500	OPERATIONAL	02.02.1980
RRR Reed College	USA	Portland, OR	TRIGA MARK I	250	OPERATIONAL	07.02.1968
WSUR Washington State Univ. MA-R1	USA	Pullman, WA	TRIGA CONV	1000	OPERATIONAL	03.07.1961
	Morocco	Rabat	TRIGA MARK II	2000	OPERATIONAL	05.02.2007
TRIGA RC-1	Italy	Rome	TRIGA MARK II	1000	OPERATIONAL	06.11.1960
UC Davis/McClellan TRIGA	USA	Sacramento, CA	TRIGA MARK II	2000	OPERATIONAL	01.20.1990
TRIGA Univ. Utah	USA	Salt Lake City, UT	TRIGA MARK I	100	OPERATIONAL	10.25.1975
ARRR	USA	San Ramon, CA	TRIGA CONV	250	OPERATIONAL	07.09.1964
PSBR Penn St. Univ.	USA	State College, PA	TRIGA MARK CONV	1000	OPERATIONAL	08.15.1955
NSRR	Japan	Tokai	TRIGA ACPR	300	OPERATIONAL	06.30.1975
TRIGA II VIENNA	Austria	Vienna	TRIGA MARK II	250	OPERATIONAL	03.07.1962
KARTINI-PSTA	Indonesia	Yogyakarta	TRIGA MARK II	100	OPERATIONAL	01.25.1979
TRICO I	Democratic Republic of the Congo	Kinshasa	TRIGA MARK I	50	PERMANENT SHUTDOWN	06.06.1959
FIR-1	Finland	Espoo	TRIGA MARK II	250	UNDER DECOMMISSIONING	03.27.1962
FRN	Germany	Munich	TRIGA MARK III	1000	UNDER DECOMMISSIONING	08.23.1972
NRF, Neutron Rad Facility	USA	Richland, WA	TRIGA MARK I	1000	UNDER DECOMMISSIONING	03.01.1977
GA-TRIGA I	USA	San Diego, CA	TRIGA MARK I	250	UNDER DECOMMISSIONING	05.03.1958
GA-TRIGA F	USA	San Diego, CA	TRIGA MARK I	250	UNDER DECOMMISSIONING	07.01.1960
Musashi Reactor	Japan	Tokyo	TRIGA MARK II	100	UNDER DECOMMISSIONING	01.30.1963
TRIGA-II Rikkyo	Japan	Yokosuka	TRIGA MARK II	100	UNDER DECOMMISSIONING	12.08.1961

List of Applied Filters

Countries	Region or Country
Search reactor by name	TRIGA
Reactor Status	All Status

Anhang V – Akteure mit eigenen SMR – Konzepten

Die Tabelle wurde aus der Vertiefungsarbeit „Brückentechnologie oder alter Hut – Untersuchung zum Stand von Forschung und Entwicklung für Small Modular Reactors (SMR)“ entnommen (Riemer, 2024, S. 48–54). Dort sind auch die für diese Tabelle verwendeten ergänzenden Quellen einzeln aufgeführt. Die Daten stammen aus: Advances in Small Modular Reactors, (IAEA, 2022, S. 2–4 Tabelle 1).

Tabelle 15: Staatliche Akteure mit SMR - Konzepten, welche bei der IAEA gelistet sind.

Staatliche Akteure

Firmenname	SMR – Konzept	Land	Anmerkungen
Comision Nacional de Energia Atomica	Carem	Argentinien	
China General Nuclear Power Corporation	ACPR50S	China	Tochterunternehmen des Staatskonzerns China General Nuclear Power Group (CGN) Firma in Staatsbesitz
China General Nuclear Power Group	NHR200-II		
Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University	HTR-PM HTR-10	China	Institut einer Universität
State Power Investment Corporation	CAP200 HAPPY200	China	
Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute	CAP200	China	Tochterunternehmen von State Power Investment Corporation
Tsinghua University	NHR200-II HTR-PM HTR-10	China	Universität
Chinese Academy of Science – Shanghai Institute of Applied Physics	smTMSR-400	China	
Électricité de France, EDF	NUWARD™	Frankreich	Französischer Staat ist zu 100% Besitzer von EDF (seit 2023); Framatome Frankreich ist ein Teil der EDF

National Research and Innovation Agency	PeLUIt/RDE	Indonesien	
Japan Atomic Energy Agency Consortium	GTHTTR300	Japan	
Japan Atomic Energy Agency	HTTR	Japan	
Rosatom	RITM-200N ABV-6E RITM-200M VBER-300	Russland	Russischer Staatskonzern
JSC Afrikantov OKBM, Rosatom	RITM-200N KLT-40S ABV-6E RITM-200M VBER-300 GT-MHR MHR-T MHR-100	Russland	Tochter von Rosatom
King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy	SMART	Saudi-Arabien	
PBMR SOC Ltd.	PBMR-400	Südafrika	Konzortium aus (staatlichen) südafrikanischen Unternehmen und Westinghouse
Ulsan National Institute of Science & Technologie	MicroURANUS	Südkorea	Universität
Korea Atomic Energy Research Institute	i-SMR SMART	Südkorea	Staatlich finanziertes Forschungsinstitut
University of West Bohemia Pilsen	TEPLATOR™	Tschechische Republik	Universität
The Czech Institute of Informatics, Robotics and Cybernetics of the Czech Technical University in Prague	TEPLATOR™	Tschechische Republik	Institut einer Universität
Framatome Inc.	SC-HTGR	USA	Ableger des französischen Staatsunternehmens Framatome, Framatome ist eine 100% Tochter des Staatskonzerns EDF
University of California, Berkeley	MK1 PB-FHR	USA	Universität

Tabelle 16: Private Akteure mit SMR - Konzepten, welche bei der IAEA gelistet sind.

Private Akteure

Firmenname	SMR - Konzepte	Land	Anmerkungen
China National Nuclear Corporation	ACP100 DHR400 ACP100S	China	börsennotiert
Nuclear Power Institute of China	ACP100 ACP100S	China	100% Tochter von CNNC
Seaborg Technologies ApS	CMSR	Dänemark	2014 gegründet
Copenhagen Atomics	Copenhagen Atomics Waste Burner	Dänemark	2014 gegründet
JIMMY ENERGY SAS	JIMMY	Frankreich	
newcleo srl	LFR-AS-200	Italien	2021 gegründet
Mitsubishi Heavy Industries, Inc.	IMR	Japan	
Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation	4S	Japan	bis 2023 börsennotiert
StarCore Nuclear	STARCORE	Kanada	Gegründet 2008
ARC Clean Energy	ARC-100	Kanada	
Candu Energy Inc.	Candu	Kanada	Teil von Atkinsrealis bzw. SNC Lavalin
Terrestrial Energy Inc.	IMSR400	Kanada	2013 gegründet
Moltex Energy	SSR-W SSR-U	Kanada UK	2014 gegründet
THORIZON	THORIZON	Niederlande	2018 gegründet, Ausgründung aus einem Forschungs- institut
STAR ENERGY SA	STAR	Schweiz	2017 gegründet
LeadCold	SEALER-55	Schweden	Ausgründung aus dem Royal Institute of Technology in Stockholm
STL Nuclear (PTY) Ltd.	HTMR100	Südafrika	
Eskom Holdings SOC Ltd.	AHTR-100	Südafrika	
KEPCO E&C	BANDI-60	Südkorea	Tochterfirma von KEPCO
Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd.	i-SMR	Südkorea	100% Tochter von Kepco
Rolls-Royce SMR Ltd.	Rolls-Royce SMR	UK	Mehrheitseigner ist Rolls Royce, wei- tere Anteile liegen bei einem Quatari- scher Staatsfonds

NuScale Power Corporation	VOYGR™	USA	Börsennotiert, Ausgründung aus dem Idaho National Lab, 2007
GE-Hitachi Nuclear Energy	BWRX-300	USA	Gemeinsame Allianz von Hitachi und GE
Hitachi-GE Nuclear Energy	BWRX-300	Japan	
Holtec International	SMR-160	USA	
Westinghouse Electric Company LLC	Westinghouse SMR Westinghouse LFR	USA	
BWX Technologies, Inc.	mPower	USA	Aktiengesellschaft
General Atomics	EM ² FMR	USA	
X-Energy LLC	Xe-100	USA	2009 gegründet (Zeitungsartikel)
KAIROS Power, LLC.	KP-FHR	USA	2016 gegründet
Elysium Industries	MCSFR	USA	2015 gegründet
Flibe Energy, INC.	LFTR	USA	2011 gegründet
ThorCon International	ThorCon	USA + Indonesien	2016 gegründet

Tabelle 17: Weitere Akteure mit SMR - Konzepten, welche bei der IAEA gelistet sind.

Akteure, die nicht als staatlich oder privat identifiziert werden konnten

Firmenname	SMR - Konzepte	Land	Anmerkungen
International Thorium Molten-Salt Forum	FUJI	Japan	
NIKIET	VK-300 KARAT-45 KARAT-100 RUTA-70 SHELF-M BREST-OD-300	Russland	Ein Teil von Rosatom? Die Vermutung konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht weiter verifiziert werden.
JSC AKME Engineering	SVBR	Russland	In der vorliegenden Untersuchung war es nicht möglich, zusätzliche Informationen zu erlangen.
Last Energy Inc.	OPEN20	USA	In der vorliegenden Untersuchung war es nicht möglich,

zusätzliche Infor-
mationen zu erlangen.

Anhang VI – Neubauprojekte von Kernreaktoren zur kommerziellen Stromerzeugung zwischen Januar 2020 und Oktober 2024

Tabelle 18: Übersicht über Neubauprojekte von Kernreaktoren zur kommerziellen Stromerzeugung, basierend auf den Daten des IAEA Power Reactor Information System (IAEA, 2024b).

Jahr	Anzahl Projekte mit Baubeginn	Minimal Power	Maximal Power	Länder (Anzahl)
2024	8	1000 MW _e	1224 MW _e	China (6) Ägypten (1) Russland (1)
2023	6	1000 MW _e	1124 MW _e	China (5) Ägypten (1)
2022	8	1114 MW _e	1200 MW _e	China (5) Ägypten (2) Türkei (1)
2021	8	917 MW _e	1200 MW _e	China (5) Indien (2) Türkei (1)
	2 SMR	100 MW _e	300 MW _e	China (1) Russland (1)
2020	6	642 MW _e	1400 MW _e	China (5) Türkei (1)

Anhang VII – Interviewleitfaden

A. Interviewleitfaden – Deutsche Version

Einführung:

1. Wie sind Sie in die Kerntechnik gekommen?
2. Welche Berührungspunkte mit TRIGA – Reaktoren und SMR hatten Sie bisher?

Themenblock Vergleich beider Innovationssysteme:

A. Geschwindigkeit bei der Entwicklung

General Atomics brauchte Mitte der 50er drei Jahre von der Konzeptidee bis zum ersten genehmigten und gebauten Prototyp gebraucht. Heute braucht die Entwicklung, der Bau und die Genehmigung eines Reaktors deutlich mehr Zeit. Das gilt auch für SMR. Der argentinische CAREM-Reaktor befindet sich seit 2014 im Bau, die erste Idee dazu ist 40 Jahre alt. Seit 2006 befindet sich das Projekt auf der Prioritätenliste, die Inbetriebnahme ist für 2026 geplant. Der HTR-PM in China ging 2021 in Betrieb, 20 Jahre nach Projektbeginn. Selbst die schnellen Projekte wie der ACP-100 in China oder der Brest-OD-300 in Russland brauchen insgesamt gut 5 oder 7 Jahre für den Bau, vorausgesetzt die Timeline für 2026 wird gehalten.

3. Brauchen Ihrer Meinung nach heutige Reaktorkonzepte zu lange, bis sie in Betrieb gehen? Bitte begründen Sie Ihre Meinung.
4. Was braucht es, um die Geschwindigkeit beim Bau von Reaktoren zu beschleunigen?

B. Prototypen

In den USA galt das Konzept von NuScale als vielversprechend. Nun hat Nuscale den Bau seines Prototypens 2023 abgebrochen.

5. Wie wichtig halten Sie den Bau von Prototypen für das Weiterkommen von SMR?

C. Nachwuchs

In den 50ern kam es nach der „Atoms for Peace“ – Rede von Präsident Eisenhower schnell zu einem Hype rund um die Kernenergie. Auf dem Gebiet der Kernphysik und Kernchemie arbeiteten viele bekannte Wissenschaftler, von denen nicht wenige mit einem Nobelpreis für ihre Forschung belohnt wurden. Wissensentstehung ist eine wichtige Funktion in einem Innovationssystem.

6. Mir stellt sich die Frage, ob die Kerntechnik noch spannend genug für Wissenschaftler und ihre Forschung ist. Wie ist Ihrer Meinung mit dem Thema Nachwuchs bestellt?

Themenblock Marktentstehung SMR:

Die OECD nennt 2021 als eine wichtige Voraussetzung für das Durchsetzen von SMR, dass ein weltweiter Markt entstehen muss, damit diese sich über die „Ökonomie der Zahlen“ tragen.

7. Wie schätzen Sie den weltweiten Markt für SMR ein?
8. Was muss Ihrer Meinung nach global gesehen passieren, dass sich die Marktsituation für SMR verbessert?

Themenblock Junge Unternehmen auf dem SMR-Markt:

Während meiner Recherche ist mir aufgefallen, dass insbesondere in den USA und Kanada sich rund um die SMR viele junge Unternehmen gegründet haben. So sind 24% der Unternehmen mit eigenen Konzepten jünger als 10 Jahre und weitere 29% zwischen 11-20 Jahre am Markt. Zusammen sind das gut die Hälfte aller privaten Akteure mit SMR-Konzepten. Diese Firmen haben zwar Konzepte entwickelt, aber bisher keine Prototypen gebaut und damit wenig Erfahrung auf dem Markt gesammelt.

9. Wie wichtig sind junge Unternehmen auf dem Gebiet der SMR?
10. Wie wichtig ist es als Unternehmen Erfahrungen auf dem Gebiet der Kerntechnik nachweisen zu können, wenn man in diesem Feld unternehmerisch aktiv werden möchte?
11. Welche Vorteile haben junge Unternehmen gegenüber den etablierten Playern?
12. Welche Vorteile haben etablierte Player gegenüber jungen Unternehmen?
13. Glauben Sie, dass die jungen Unternehmen eine Chance haben, sich auf dem Markt durchzusetzen?
14. General Atomics musste seine Erfahrung auf dem Gebiet der Kerntechnik auch erst sammeln. Hatte General Atomics Ihrer Meinung nach gegenüber heutigen jungen Unternehmen Vor- oder Nachteile? Können Sie das ausführen?
15. Wie könnten die jungen Firmen darin unterstützt werden ihre Konzepte umzusetzen?

Letzte Frage:

16. Gibt es etwas, dass Sie noch gerne dem Interview anfügen möchten oder ein Aspekt, der Ihrer Meinung nach gar nicht berücksichtigt wurde oder zu kurz gekommen ist?

B. Interviewleitfaden – englische Version I

Introduction:

1. How did you find your way into the nuclear industry?
2. What experience do you have with TRIGA reactors and SMR so far?

Topic Block: Comparison of Both Innovation Systems

A. Development Speed

General Atomics took three years from the conceptual idea to the first approved and built prototype TRIGA-Reactor in the mid-1950s. Today, the development, construction, and approval of a reactor take significantly more time, and this also applies to SMR. The Argentine CAREM reactor has been under construction since 2014, with the first idea dating back 40 years. The project has been on the priority list since 2006, and commissioning is planned for 2026. The HTR-PM in China went into operation in 2021, 20 years after the project began. Even fast projects like the ACP-100 in China or the Brest-OD-300 in Russia take a good 5 to 7 years to build, assuming the 2026 timeline is maintained.

3. In your opinion, do today's reactor concepts take too long to become operational? Please justify your opinion.
4. What is needed to accelerate the speed of reactor construction?

B. Prototypes

In the U.S., the NuScale concept was considered promising. However, NuScale canceled the construction of its prototype last year.

5. How important do you consider the construction of prototypes for the progress of SMR?

C. Next Generation

Knowledge generation is an important function in an innovation system. At the beginning of the nuclear industry many well-known scientists worked in the field of nuclear physics and nuclear chemistry at this time. Some of them were Nobel Prize laureate. In my opinion, this attracts young scientists.

6. I wonder if the nuclear industry is still exciting enough for scientists and their research. What is your opinion on the issue of nurturing young talents?

Topic Block: SMR Market Emergence

The OECD identified in 2021 that one important condition for the success of SMR is the creation of a global market so that they can sustain themselves through "economies of numbers".

7. How do you assess the global market for SMR?
8. In your opinion, what needs to happen globally to improve the market situation for SMR?

Topic Block: Young Companies in the SMR Market

During my research, I noticed that especially in the U.S. and Canada, many young private companies have been founded around SMR. 24% of companies with their own concepts are younger than 10 years, and another 29% have been on the market for 11-20 years. Together, this represents more than half of all

private actors with SMR concepts. These companies have developed concepts but have not built prototypes yet and thus have little experience in the market.

9. How important are young companies in the field of SMR?
10. How important is it for a company to demonstrate experience in nuclear technology when it wants to operate in this field?
11. What advantages do young companies have over established players?
12. What advantages do established players have over young companies?
13. Do you think young companies have a chance to succeed in the market?
14. General Atomics had to gain its experience in nuclear technology as well. In your opinion, did General Atomics have advantages or disadvantages compared to today's young companies? Can you elaborate on that?
15. How could young companies be supported in implementing their concepts?

Final Question:

16. Is there anything you would like to add to the interview or any aspect that you think was not considered or was given too little attention?

C. Interviewleitfaden – englische Version II, Überarbeitungen farblich markiert

Introduction:

1. How did you find your way into the nuclear **technology**?
2. (What experience do you have with **TRIGA** reactors and SMR so far?)
à Nur wenn sich das aus der ersten Frage nicht ergibt.

Topic Block: Comparison of Both Innovation Systems

A. Development Speed

General Atomics took three years from the conceptual idea to the first approved and built prototype TRIGA-Reactor in the mid-1950s. **Even considered that the people involved in the development had experience in the field, it was fast to today's standards.** Today, the development, construction, and approval of a reactor take significantly more time, and this also applies to SMR. The Argentine CAREM reactor has been under construction since 2014, **with the first idea dating back 40 years. The project has been on the priority list since 2006,** and commissioning is planned for 2026. The HTR-PM in China went into operation in 2021, 20 years after the project began. Even fast projects like the ACP-100 in China or the Brest-OD-300 in Russia take a good 5 to 7 years to build, assuming the 2026 timeline is maintained.

3. In your opinion, do today's reactor concepts take too long to become operational? Please justify your opinion.
4. What is needed to accelerate the speed of reactor construction?

B. Prototypes

In the U.S., the NuScale concept was considered promising. However, NuScale canceled the construction of its prototype last year.

5. How important do you consider the construction of prototypes for the progress of SMR?

C. Next Generation

Knowledge generation is an important function in an innovation system. At the beginning of the nuclear industry many well-known scientists worked in the field of nuclear physics and nuclear chemistry at this time. Some of them were Nobel Prize laureate. In my opinion, this attracts young scientists.

6. I wonder if the nuclear industry is still exciting enough for scientists and their research. What is your opinion on the issue of nurturing young talents?

Topic Block: Young Companies in the SMR Market

During my research, I noticed that especially in the U.S. and Canada, many young private companies have been founded around SMR. 24% of companies with their own concepts are younger than 10 years, and another 29% have been on the market for 11-20 years. Together, this represents more than half of all private actors with SMR concepts. These companies have developed concepts but have not built prototypes yet and thus have little experience in the market.

7. How important are young companies in the field of SMR?
8. How important is it for a company to demonstrate experience in nuclear technology when it wants to operate in this field?
9. What advantages do young companies have over established players?
10. What advantages do established players have over young companies?
11. Do you think young companies have a chance to succeed in the market?
12. General Atomics had to gain its experience in nuclear technology as well. In your opinion, did General Atomics **had** advantages or disadvantages **in their early days** compared to today's young companies? Can you elaborate on that?
- ~~13. How could young companies be supported in implementing their concepts?~~

Topic Block: SMR Market Emergence

The OECD identified in 2021 that one important condition for the success of SMR is the creation of a global market so that they can sustain themselves through "economies of numbers".

14. How do you assess the global market for SMR?
15. In your opinion, what needs to happen globally to improve the market situation for SMR?

Final Question:

16. Is there anything you would like to add to the interview or any aspect that you think was not considered or was given too little attention?

Anhang VIII – Transkripte der durchgeführten Experteninterviews mit MAXQDA – Codes (digital)

Dateipfad: Riemer_908121_Anhang VIII (digital) zur Masterthesis.pdf

Das Inhaltsverzeichnis der Datei lautet wie folgt:

- A) Interview I-1_05.09.24.pdf
- B) Interview I-2_25.09.24.pdf
- C) Interview I-3_17.09.24.pdf
- D) Interview I-4_06.09.24.pdf
- E) Interview I-5_25.09.24.pdf
- F) Interview I-6_30.08.24.pdf
- G) Interview I-7_12.09.24.pdf
- H) Interview I-8_12.09.24.pdf

Autor:innen



Jessica Riemer

ist seit 2016 am Forschungsreaktor TRIGA Mainz der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (JGU) tätig und übernimmt dort die Verantwortung als stellvertretende Strahlenschutzbeauftragte. In dieser Funktion liegt ihr Fokus auf dem praktischen Strahlenschutz am Reaktor sowie auf der sicheren Freigabe und Entsorgung radioaktiver Abfälle. Darüber hinaus ist sie in die Durchführung von radioaktiven Transporten eingebunden, wobei sie die damit einhergehenden strengen Vorgaben sicherstellt. Sie ist aktiv in Strahlenschutzkursen der JGU, sowie in Strahlenschutzthementagen involviert, die im Rahmen studentischer Praktika, oder auch dem Girls Day, angeboten werden. Damit trägt sie dazu bei, das Wissen und Verständnis für Strahlenschutzthemen weiterzugeben. Weiterhin unterstützt sie die Betriebsmannschaft des Reaktors als zweite Schichtleiterin und ist somit in den reaktorbetrieblichen Ablauf integriert. |



Prof. Dr. Ralf Isenmann

vertritt seit 2017 die Professur für BWL im Innovations- und Technologiemanagement am Fachbereich Wirtschaftsingenieurwesen und Technologiemanagement (WITM) an der WBH. Seine Schwerpunkte in Forschung und Lehre, Projekten und Publikationen liegen an den Schnittstellen zwischen Technologie- und Innovationsmanagement mit Schwerpunkten in Technologie-Roadmapping, Szenario-Analyse sowie Delphi-Methode einerseits und Nachhaltigkeitsmanagement mit Schwerpunkten in Sustainability Reporting, Industrial Ecology und Bildung für nachhaltige Entwicklung andererseits.

Überblick über die Bände der Schriftenreihe

- Band 1 / 2022** **Christoph Sternberg, Ralf Isenmann**
Untersuchung regionaler Besonderheiten im Individualverkehr bei
ausgewählten deutschen Smart-City-Projekten
- Band 2 / 2022** **Fabian Fries, Manfred Hahn**
Dynamik von Doppelstern-Systemen
- Band 3 / 2022** **Stefan Kaden, Ralf Isenmann**
IT based Framework facilitating Technology Roadmapping striving for Sustainability
- Band 4 / 2022** **Hannah Seibel, Manfred Hahn**
Von der Raupe zur Drohne – Leichtbau in Anlehnung an die Natur
- Band 5 / 2022** **Thomas König, Manfred Hahn**
Statische Festigkeitsberechnung einer 5-Speichen Fahrradfelge aus
Faserverbund- kunststoff
- Band 6 / 2022** **Alrik Selle, Manfred Hahn**
Ertüchtigung der automatisierten Wetterbeobachtung unter extremen Vereisungen
- Band 7 / 2023** **Valerie Seitz, Birgit Zimmermann**
Nachhaltiges Energiekonzept für einen Bauernhaushalt im ländlichen Äthiopien
- Band 8 / 2023** **Volker Kempf, Helge Nuhn**
Validation of personality survey instruments using vector space
representations of natural language
- Band 9 / 2023** **Torben Rippe, Klaus Fischer**
Umweltökonomische Instrumente und Stakeholdermanagement
- Band 10 / 2023** **Guido Walz**
Introduction to Extrapolation Algorithms in Numerical Analysis
including New Results
- Band 11 / 2024** **René Kumpf, Rüdiger Breitschwerdt, Helge Nuhn**
Evaluationskriterien für IT-Reifegradmodelle eine Analyse aus der
Literatur mit beispielhafter Anwendung der Ergebnisse
- Band 12 / 2024** **Kurt Becker, Henrik Bruns, Gernot Graebner, Ralf Isenmann**
Never stop learning – Aktuelle Entwicklung in Unternehmen
- Band 13 / 2024** **Klaus Fischer, Karsten Glöser, Michael Haag, Ralf Isenmann, Ursula Tischner**
Transformation gestalten – Wissenschaftsforum 2023
- Band 14 / 2024** **Yanez Ahlfs, Nina Golowko**
Konzept zur Komplexitätsbewältigung für die Produktionsplanung
und -steuerung in der auftragsorientierten Werkstattfertigung im
Tischlerhandwerk
- Band 15 / 2026** **Valerie Seitz, Birgit Zimmermann**
Nachhaltigkeitsanalyse einer Bauerngemeinschaft in Äthiopien zur
Identifikation von Förderpotential zur nachhaltigen ländlichen Entwicklung
- Band 16 / 2026** **Lukas Ebner, Thomas Wenisch**
Identifikation und Evaluation von Antriebstopologien in elektrischen
Antriebssträngen von Elektrofahrzeugen mittels Patentanalyse

Band 17 / 2026 **Jessica Riemer, Prof. Dr. habil. Ralf Isenmann**
TRIGA – Forschungsreaktoren und Small Modular Reactors –
Eine vergleichende technologische Innovationssystemanalyse



wbh

**WILHELM BÜCHNER
HOCHSCHULE**

Eine Hochschule der Klett Gruppe

Wilhelm Büchner Hochschule
Hilpertstraße 31
64295 Darmstadt

