



111 Bericht von Alexander Wimmers, Fanny Böse, Claudia Kemfert, Björn Steigerwald, Christian von Hirschhausen und Jens Weibezahn

Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen

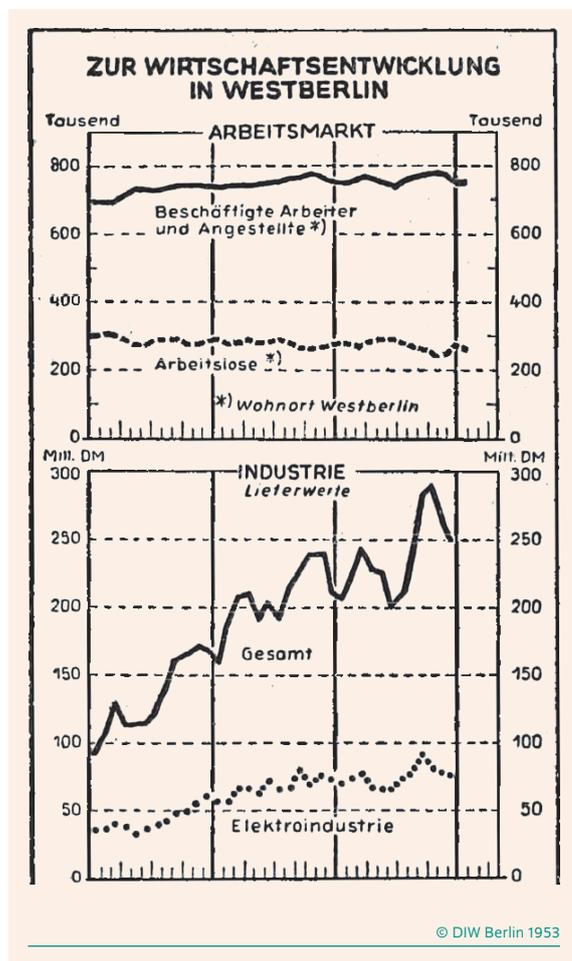
- Studie untersucht Rentabilität und technologische Umsetzbarkeit von Reaktorkonzepten weltweit
- Bestehende und geplante Kraftwerksprojekte sind unwirtschaftlich, auch technischer Durchbruch nicht zu erwarten
- Fokus der Forschung im Bereich Atomenergie auf die Endlagersuche richten

122 Interview mit Christian von Hirschhausen

124 Kommentar von Marcel Fratzscher

Warum Reiche in Deutschland vergleichsweise wenig spenden

Die Kursentwicklung am amerikanischen Aktienmarkt



Die Aktienkurse in den Vereinigten Staaten von Amerika hatten Mitte 1949 einen Tiefpunkt erreicht und sind von da an bis zur Gegenwart gestiegen. Der Aufschwung ist nur von geringfügigen, bei einer langanhaltenden Hausse unvermeidlichen Rückschlägen begleitet gewesen. Aufschlussreich für die Beurteilung dieser Entwicklung ist ein Vergleich der Aktienkurse mit der Bewegung der Reingewinne der Kapitalgesellschaften und der Dividenden sowie eine Gegenüberstellung von Aktien- und Rentenrenditen.

Die Aktienkursbildung wird in erster Linie durch den auf die Aktie entfallenden Reingewinn beeinflusst, der sich nach Abzug der Körperschaftssteuer und vor Verteilung der Dividenden ergibt. Da über die Höhe der Dividendenausschüttung erst entschieden wird, wenn die Reingewinne verdient und der Größenordnung nach bekannt sind, schlagen sich Änderungen der Reingewinne erst einige Zeit später in einer Änderung der Dividende pro Aktie nieder.

Aus dem Wochenbericht Nr. 10 vom 6. März 1953

IMPRESSUM



DIW Berlin — Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.

Mohrenstraße 58, 10117 Berlin

www.diw.de

Telefon: +49 30 897 89-0 Fax: -200

90. Jahrgang 7. März 2023

Herausgeberinnen und Herausgeber

Prof. Dr. Tomaso Duso; Sabine Fiedler; Prof. Marcel Fratzscher, Ph.D.; Prof. Dr. Peter Haan; Prof. Dr. Claudia Kemfert; Prof. Dr. Alexander S. Kritikos; Prof. Dr. Alexander Kriwoluzky; Prof. Dr. Lukas Menkhoff; Prof. Karsten Neuhoﬀ, Ph.D.; Prof. Dr. Carsten Schröder; Prof. Dr. Katharina Wrohlich

Chefredaktion

Prof. Dr. Pio Baake; Claudia Cohnen-Beck; Sebastian Kollmann; Kristina van Deuverden

Lektorat

Dr. Caroline Stiel

Redaktion

Rebecca Buhner; Dr. Hella Engerer; Ulrike Fokken; Petra Jasper; Kevin Kunze; Sandra Tubik

Vertrieb

DIW Berlin Leserservice, Postfach 74, 77649 Offenburg

leserservice@diw.de

Telefon: +49 1806 14 00 50 25 (20 Cent pro Anruf)

Gestaltung

Roman Wilhelm, Stefanie Reeg, Eva Kretschmer, DIW Berlin

Umschlagmotiv

© imageBROKER / Steffen Diemer

Satz

Satz-Rechen-Zentrum Hartmann + Heenemann GmbH & Co. KG, Berlin

Druck

USE gGmbH, Berlin

ISSN 0012-1304; ISSN 1860-8787 (online)

Nachdruck und sonstige Verbreitung – auch auszugsweise – nur mit Quellenangabe und unter Zusendung eines Belegexemplars an den Kundenservice des DIW Berlin zulässig (kundenservice@diw.de).

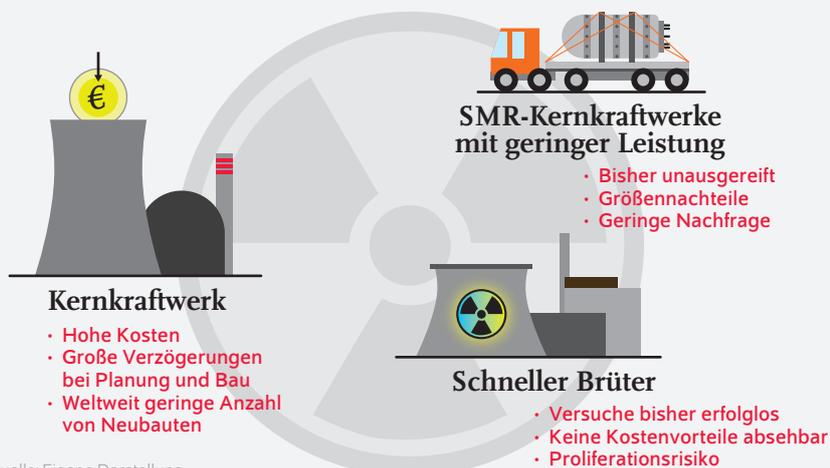
Abonnieren Sie auch unseren DIW- und/oder Wochenbericht-Newsletter unter www.diw.de/newsletter

Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen

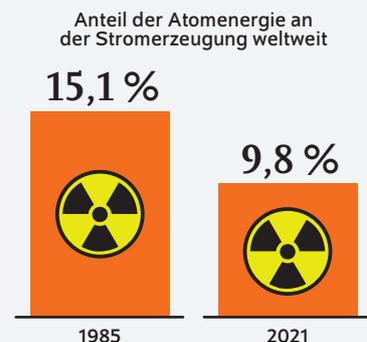
Von Alexander Wimmers, Fanny Böse, Claudia Kemfert, Björn Steigerwald, Christian von Hirschhausen und Jens Weibezahn

- Studie untersucht Rentabilität und technologische Umsetzbarkeit von Reaktorkonzepten weltweit
- Trotz bevorstehenden Atomausstiegs auch in Deutschland Debatte über neue Reaktorkonzepte
- Bestehende und geplante Kraftwerksprojekte sind unwirtschaftlich, auch technischer Durchbruch nicht zu erwarten
- Umdenken in Energiesystemanalyse zugunsten erneuerbarer Energien weg von Atomenergie
- Forderungen in Deutschland nach Forschungsförderung für den Neubau von Kernkraftwerken sind Irrweg

Aktuell diskutierte Kernkraft-Projekte sind nicht zukunftsfähig



Quelle: Eigene Darstellung.



© DIW Berlin 2023

ZITAT

„Atomenergie war, ist und bleibt unrentabel und technologisch riskant. Daran ändern auch angeblich neuartige Reaktorkonzepte nichts, die de facto ihren Ursprung in der Frühzeit der Atomenergie in den 1950/60er Jahren haben.“

— Alexander Wimmers —

MEDIATHEK



Audio-Interview mit Christian von Hirschhausen
www.diw.de/mediathek

Ausbau von Kernkraftwerken entbehrt technischer und ökonomischer Grundlagen

Von Alexander Wimmers, Fanny Böse, Claudia Kemfert, Björn Steigerwald, Christian von Hirschhausen und Jens Weibezahn

ABSTRACT

In Deutschland gehen die letzten drei Kernkraftwerke Mitte April endgültig vom Netz. Die Energiekrise infolge des russischen Angriffskriegs in der Ukraine hat allerdings auch hierzulande Forderungen nach dem Bau neuer Kernreaktoren angeheizt. Eine ähnliche Debatte wird im Kontext der Klimakrise auch international geführt. Atomenergie war aber schon seit den 1950er Jahren eine der teuersten Energiequellen und ist dies bis heute. Zudem ist sie keine zeitnahe Lösung, da der Bau der Reaktoren Jahrzehnte dauert. Auch technisch ist kein signifikanter Durchbruch zu wettbewerblichen Reaktoren absehbar. Dies gilt sowohl für SMR (Small Modular Reactor)-Konzepte mit geringer Leistung als auch für andere, wie zum Beispiel schnelle Brutreaktoren. Diese Erkenntnis setzt sich inzwischen auch in Fachkreisen der Energiesystemmodellierung durch, in denen bisher aufgrund überoptimistischer Annahmen stets ein wesentlicher Anteil an Atomenergie vorhergesagt und erneuerbare Energien vernachlässigt wurden.

Am 15. April 2023 werden in Deutschland die letzten drei Kernkraftwerke abgeschaltet: „Emsland“ in Niedersachsen, „Isar-2“ in Bayern und „Neckarwestheim-2“ in Baden-Württemberg. Damit endet die Ära der kommerziellen Nutzung von Atomenergie in Deutschland. Im Fokus stehen nun der Rückbau von Kernkraftwerken sowie die Suche nach sicheren Zwischenlagern und einem Endlager für radioaktive Abfälle. Die in Deutschland und weltweit mit der Entwicklung kommerzieller Kernkraftwerke seit den 1950er Jahren verbundene Hoffnung, einen kostengünstigen und technologisch innovativen Energieträger zu entwickeln, hat sich nicht bewahrheitet. Vielmehr ist die ursprüngliche Idee zur Entwicklung einer Plutoniumwirtschaft,¹ also der Herstellung einer fast unbegrenzten Menge kostengünstigen Spaltstoffs durch einen geschlossenen Brennstoffkreislauf, gescheitert. Im Gegenteil ist Strom aus Kernkraftwerken mit Abstand der teuerste – und das seit Beginn des Atomzeitalters in den 1950er Jahren bis heute. Die Atomenergie war und ist nicht wettbewerbsfähig gegenüber alternativen Stromerzeugungstechnologien (früher Kohle, heute erneuerbaren Energien).² Ökonomische Fragen des Rückbaus sind ungeklärt. Weltweit ist noch kein einziges Endlager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb.³

Dennoch wird die Entwicklung sogenannter neuartiger Kernreaktoren und der damit verbundene Neubau von Kernkraftwerken in einigen Ländern lebhaft diskutiert. Insbesondere in den offiziellen Atomwächtern (USA, Russland, China, Frankreich, Vereinigtes Königreich), aber auch in einigen

1 Glen T. Seaborg (1970): *The Plutonium Economy of the Future*. Santa Fe, New Mexico (online verfügbar, abgerufen am 23. Februar 2023). Dies gilt auch für alle anderen Online-Quellen dieses Berichts, sofern nicht anders vermerkt).

2 1957 kostete eine Kilowattstunde Kwh aus Kohle 0,87 US-Cent, aus Atomenergie 5,19 US-Cent, vgl. Fritz Baade (1958): *Welt-Energiwirtschaft: Atomenergie – Sofortprogramm oder Zukunftsplanung*. Hamburg: Rowohlt. 2010 waren diese Kosten auf 7,4 für Kohle beziehungsweise 10,5 US-Cent pro kWh für Atomenergie angestiegen, vgl. Lucas W. Davis (2012): *Prospects for Nuclear Power*. *Journal of Economic Perspectives* 26 (1), 49–66 (online verfügbar). Seit den 2010er Jahren sind Erneuerbare die neue Konkurrenztechnologie. 2021 lagen die Kosten für Wind bei 3,8, für Photovoltaik bei 3,6 US-Cent pro kWh, während sich Atomenergie auf 16,7 US-Cent pro kWh verteuert hat, vgl. Lazard (2009–2021): *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis – Versionen 4 bis 15*, New York (online verfügbar).

3 Das erste Endlager überhaupt wird voraussichtlich im kommenden Jahr in Finnland eröffnen, vgl. Achim Brunnengräber und Maria R. Di Nucci (2019): *Conflicts, Participation and Acceptability in Nuclear Waste Governance: An International Comparison*. Wiesbaden (online verfügbar).

wenigen Ländern, die erst jetzt einen Einstieg in die Atomenergie planen (Türkei, Ägypten, Bangladesch) oder gerade vollzogen haben (Belarus, Vereinigte Arabische Emirate), ist die Debatte im Gang.

In Europa hat die Aufnahme von Atomenergie in die EU-Taxonomie⁴ Möglichkeiten eröffnet, Neubauprojekte noch stärker als bisher zu subventionieren. Begründet wird dies mit Nachhaltigkeitsaspekten, was allerdings unter Expert*innen höchst umstritten ist. Auch in Deutschland und anderen europäischen Ländern werden derzeit in Politik und Gesellschaft Forderungen laut, als längerfristige Lösung im Rahmen der Energiewende neue Kernkraftwerke zu bauen und die hierfür notwendigen Forschungsbemühungen zu verstärken.⁵ Allerdings hat die deutsche Energiewirtschaft selbst dieser Perspektive bisher eine klare Absage erteilt. Unklar ist vor allem, welche Technologien für die Weiterentwicklung von Atomenergie überhaupt zur Verfügung stünden und wie diese in absehbarer Zeit wettbewerbsfähig werden sollten.

Anteil der Atomenergie an der Stromerzeugung geht weltweit zurück

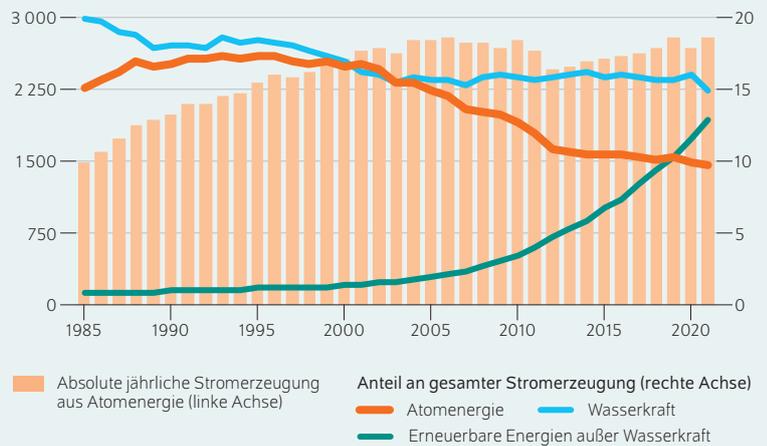
Weltweit ist der Ausbau von Kernkraftwerken nach dem Bauboom der 1970/80er Jahre weitgehend zum Erliegen gekommen. Die Produktion von Strom aus Kernkraftwerken liegt seit den späten 1990er Jahren auf einem unveränderten Niveau von circa 2600 Terawattstunden (TWh) pro Jahr.⁶ Ihr Anteil an der gesamten Stromerzeugung sinkt jedoch: Seit dem historisch höchsten Anteil an der weltweiten Stromproduktion von 17,6 Prozent im Jahr 1996 geht dieser stetig zurück und lag 2021 erstmals seit Jahrzehnten unter zehn Prozent (Abbildung 1). Der Anteil erneuerbarer Energien steigt dagegen stetig an.

Der Anteil der Atomenergie an der Stromerzeugung wird weiter sinken. Bis zum Jahr 2040 gehen rund 200 Kernkraftwerke vom Netz.⁷ Diesen umfangreichen Abschaltungen stehen lediglich 53 aktuell laufende Neubauprojekte (circa 50 Gigawatt) gegenüber. Abgesehen von 21 aktiven Ausbauprojekten in China erweist sich ihre Entwicklung jedoch als langwierig. Bei 26 der laufenden Neubauprojekte treten derzeit Verzögerungen in der Planung, Genehmigung oder Fertigstellung auf, teilweise mit erheblichem Ausmaß von mehr als zehn Jahren. Andererseits erleben erneuerbare Energien eine ungebrochene Dynamik im Ausbau und werden auch

Abbildung 1

Weltweite Entwicklung der Stromerzeugung aus Atomenergie, Wasserkraft und anderen erneuerbaren Energien

Jährliche Erzeugung in Terawattstunden (linke Achse); Anteile in Prozent (rechte Achse)



Quelle: BP Statistical Review; eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2023

Der Anteil an der weltweiten Stromerzeugung aus Atomenergie liegt erstmals unter zehn Prozent, erneuerbare Energien werden hingegen immer wichtiger.

wegen der in der Zukunft zunehmenden Elektrifizierung den Anteil der Atomenergie im Strommix weiter verringern.

Neubaupläne technisch unsicher und ökonomisch fragwürdig

Einige Länder haben in den vergangenen Jahren politische Absichten zum Neubau eines oder mehrerer Kernkraftwerke bekundet. In Europa hegen vor allem Frankreich und Großbritannien ambitionierte Ausbauziele für Kernkraftwerke.⁸ Darüber hinaus gibt es solche Diskussionen auch in den Niederlanden, Schweden, Polen, Ungarn und Tschechien, und inzwischen auch wieder in Deutschland. Jedoch ist in den meisten Fällen unklar, mit welchen Reaktortypen diese Pläne umgesetzt und wie die Reaktoren finanziert werden sollen. Dies wird im Folgenden anhand der drei Reaktorgruppen diskutiert, die in der Debatte eine Rolle spielen.

Aktuelle Generation von Leichtwasserreaktoren mit großen Bauverzögerungen und überteuert

Die derzeit einzige realistische Option zum Bau von Kernkraftwerken besteht in der Nutzung der bestehenden Technologie. Dabei handelt es sich um leuchtwassergekühlte Reaktoren der dritten Generation im Bereich von 600 bis 1600 Megawatt (MW) elektrischer Leistung. Beispiele hierfür sind der französische European Pressurized Reactor (EPR;

⁴ Europäische Kommission (2022): Ergänzender delegierter Rechtsakt zur Klimataxonomie. Brüssel (online verfügbar).

⁵ Roland Berger et al. (2022): Wohlstand in Gefahr: Für eine neue Strategie in der Energiepolitik. 12–2022. ifo Schnelldienst; ntv (2022): Gesamtmetall-Chef denkt über Bau neuer AKWs nach, 1. August (online verfügbar); Achim Brunnengräber et al. (2023): Monumentale Verdrängung: Die neue Pro-Atom-Troika. Blätter für deutsche und internationale Politik, Nr. 2, 9–12 (online verfügbar).

⁶ 1 TWh= 1 Milliarde kWh.

⁷ Nach aktuellen Schätzungen werden in den 2020er Jahren weltweit 84 Gigawatt (110 Reaktoren) vom Netz gehen. Darüber hinaus erreichen zwischen 2031 und 2040 81 Gigawatt (95 Reaktoren) und in den 2040er Jahren 71 Gigawatt (72 Reaktoren) das Ende ihrer heute geplanten Betriebsgenehmigung, vgl. Mycle Schneider et al. (2022): World Nuclear Industry Status Report 2022. Paris (online verfügbar).

⁸ HM Government. (2022): British Energy Security Strategy. London (online verfügbar); Ania Nussbaum und Francois De Beaupuy (2022): Macron Pledges New Nuclear Reactors—If He's Re-Elected. Bloomberg, 10. Februar (online verfügbar).

Abbildung 2

Durchschnittliche Kapazitätsentwicklung von Kernkraftwerken
Fünf-Jahres-Durchschnitt der elektrischen Leistung in Megawatt



Quelle: Mycle Schneider Consulting; eigene Darstellung.

© DIW Berlin 2023

Die Kapazität neuer Kernkraftwerke ist von sehr geringen elektrischen Leistungen in den 1950ern schnell angestiegen und beträgt inzwischen über 1000 Megawatt.

unter anderem in Frankreich und China im Bau, dort auch zwei Reaktoren am Netz), der US-amerikanische AP1000 (hergestellt vom US-Konzern Westinghouse) und der russische VVER 1200 (hergestellt vom russischen Staatskonzern Rosatom). Der Bau solcher Reaktoren, insbesondere der wassergekühlten thermischen Reaktoren, hatte in den 1970/80er Jahren seinen Höhepunkt. In den darauffolgenden Jahrzehnten ist weltweit, insbesondere in den USA und Europa, der Neubau jedoch stark zurückgegangen. Gründe dafür waren unter anderem die hohen Kosten und ständige Bauverzögerungen.⁹ Aktuelle Kostenanalysen und -vergleiche mit erneuerbaren Stromerzeugungstechnologien, deren Stromgestehungskosten unter 100 US-Dollar/MWh liegen, zeigen, dass die aktuell horrenden Baukosten für Kernkraftwerke um zwei Drittel reduziert werden müssten, um in einem dekarbonisierten europäischen Energiesystem einen Anteil von zehn Prozent an der Stromproduktion zu halten.¹⁰ Entgegen ursprünglicher Erwartungen ist der Bau von Kernkraftwerken über die Jahrzehnte nicht günstiger geworden, vielmehr stiegen die Kosten (pro Kilowatt (kW) Leistung) kontinuierlich an. Darüber hinaus gelang es zu keinem Zeitpunkt, die in anderen Branchen (Chipproduktion, Solarpanels) erzielten Standardisierungs- und Massenproduktionsvorteile zu heben.¹¹

⁹ Ben Wealer et al. (2021): Kernenergie und Klima. 9. Diskussionsbeiträge der Scientists for Future, Zenodo (online verfügbar).

¹⁰ Leonard Göke, Alexander Wimmers und Christian von Hirschhausen (2023): Economics of nuclear power in decarbonized energy systems. Working Paper (online verfügbar).

¹¹ Christian von Hirschhausen (2023): Atomenergie: Geschichte und Zukunft einer riskanten Technologie. München, Kapitel 4 (Energiewirtschaft und Klimaschutz).

SMR-Konzepte nicht ausgereift und auf absehbare Zeit nicht verfügbar

Eine Alternative zu den laufenden Kraftwerksbauten könnte darin bestehen, zu den geringen Leistungsgrößen der 1950/60er Jahren zurückzukehren und in diesem Segment basierend auf der etablierten Leichtwasser-Technologie Reaktortypen weiterzuentwickeln. Diese Idee wurde 2010 vom damaligen US-Energieminister Steven Chu unter dem Schlagwort „SMR“ ins Gespräch gebracht, um diese Reaktoren als „Amerikas neue nukleare Option“ zu bewerben.¹² Unter dem Begriff SMR wurden ursprünglich Reaktoren kleinerer und mittlerer Leistungen („small and medium sized reactors“) zusammengefasst.¹³ Der Buchstabe „m“ sollte nunmehr für eine „modulare“ Massenproduktion stehen („small modular reactors“).¹⁴ In diesem Zusammenhang versteht man heute unter SMR-Konzepten Reaktoren mit einer elektrischen Leistung bis zu 300 MW.

Der Begriff SMR hat inzwischen Eingang in energie- und innovationspolitische Diskussionen gefunden.¹⁵ Jedoch ist der aktuelle SMR-Hype unbegründet, weil es sich um alte Reaktorkonzepte handelt, die sich aufgrund von ökonomischen Nachteilen durch die geringeren Leistungen (Kosten) nicht etabliert haben. Weiterhin bleiben sie radiologisch gefährlich, da sich die Probleme des vermehrten Transports und der Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle vervielfachen würden.

Die Möglichkeit, Kernkraftwerke mit geringer Leistung zu bauen, ist seit den 1950er Jahren bekannt und stellt daher keine Innovation dar. Im Gegenteil: Der erste in den USA entwickelte SMR-Reaktor war ein für die US-Marine entwickelter Leichtwasserreaktor für den U-Boot-Einsatz. Nach seinem Einbau in das erste kommerzielle Kernkraftwerk in Shippingport, Pennsylvania, 1957 führte er zum Siegeszug der Leichtwasser-Technologie.¹⁶ Jedoch wurden diese Reaktoren mit geringen Leistungen lediglich als Ausgangspunkt genommen, um rasch zum Bau von größer dimensionierten Kraftwerken mit höheren Leistungen überzugehen. Die Suche nach Größenvorteilen führte in der Folgezeit dazu, dass die durchschnittliche elektrische Leistung von Kernkraftwerken bereits in den 1970er Jahren auf 500 MW stieg; heute liegt sie über 1000 MW (Abbildung 2).

¹² Steven Chu (2010): America's New Nuclear Option: Small Modular Reactors Will Expand the Ways We Use Atomic Power. Wall Street Journal, 23. März 2010 (online verfügbar).

¹³ International Atomic Energy Agency (IAEA) (1961): Small and Medium Power Reactors 1960. Wien; IAEA (1971): Small and Medium Power Reactors 1970. Wien.

¹⁴ IAEA (2014): Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. IAEA Booklet. Wien (online verfügbar); IAEA (2018): Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). Wien.

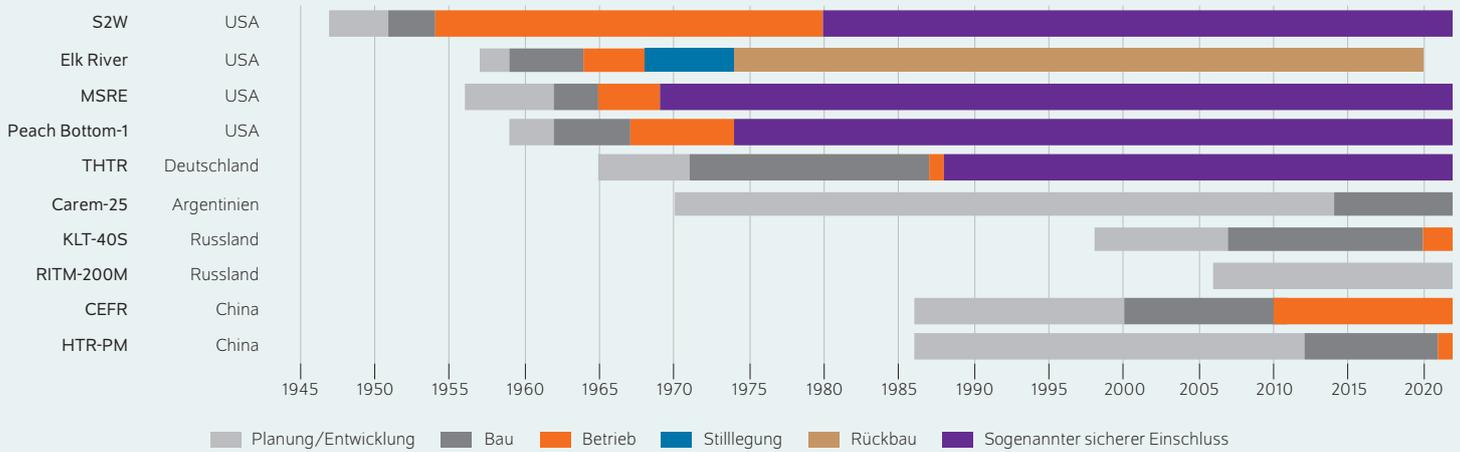
¹⁵ Christoph Pistner et al. (2021): Sicherheitstechnische Analyse und Risikobewertung einer Anwendung von SMR-Konzepten (Small Modular Reactors). Wissenschaftliches Gutachten im Auftrag des Bundesamtes für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE). Darmstadt; Thomas und Ramana (2022), a. a. O.; IAEA (2022): Advances in Small Modular Reactor Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). IAEA Booklet. Wien (online verfügbar).

¹⁶ Robin Cowan (1990): Nuclear Power Reactors: A Study in Technological Lock-In. The Journal of Economic History 50 (3), 541–567.

Abbildung 3

Zeitspannen historischer und aktueller SMR-Konzepte

Planungs- & Entwicklungs-, Bau- und Betriebszeiten sowie Rückbau und sogenannter sicherer Einschluss



Quelle: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung; eigene Darstellung.

© DIW Berlin 2023

Schon in den 1950er Jahren wurden SMR-Konzepte entworfen, gebaut und betrieben. Nur wenige davon sind noch in Betrieb.

Trotz jahrzehntelanger Forschung konnte kaum ein Kernkraftwerk der Kategorie SMR den kommerziellen Leistungsbetrieb aufnehmen. Vielmehr zeichneten sich die Versuche – wie auch bei Kernkraftwerken größerer Leistungsklassen – durch lange Entwicklungsphasen, kurze Betriebsphasen und sehr lange Rückbauphasen aus (Abbildung 3). Viele der historischen SMR-Reaktoren sind bis heute nicht endgültig entsorgt.

Zusätzlich zu den historischen Prototypen befinden sich derzeit lediglich sechs SMR-Reaktoren weltweit in Betrieb: beispielweise ein schwimmendes Kraftwerk vom Typ KLT-40S mit einer elektrischen Leistung von 64 MW im ostsibirischen Pevek, das nach 13 Jahren Bauzeit im Jahr 2020 in Betrieb ging.¹⁷ An dem Leichtwasserreaktorprojekt CAREM (Central Argentina de Elementos Modulares) in Argentinien wird seit den 1980er Jahren gearbeitet, eine Inbetriebnahme ist aufgrund des Baustopps in weite Ferne gerückt. Darüber hinaus befindet sich eine Reihe von Projekten in der Entwicklungs- beziehungsweise Genehmigungsphase.¹⁸ In den USA hat beispielsweise das leichtwassergekühlte Reaktordesign VOYGR der Firma NuScale eine Standard-design-Lizenz für den Bau von Reaktoren erhalten;¹⁹ jedoch gibt es hierfür bisher kaum Nachfrage und die Kosten sind zuletzt massiv gestiegen. Auch andere Länder wie Großbritannien oder Kanada beteiligen sich an der Entwicklung von

SMR-Konzepten und rechnen in der Zukunft mit der Realisierung eines Demonstrationsreaktors.²⁰

Diese Projekte haben gemein, dass sie die ersten ihrer Art des jeweiligen Designs darstellen. Für solche frühen Prototypen beziehungsweise Demonstrationsprojekte ist der verlässliche Betrieb sowie die Etablierung einer potenziellen Serienproduktion weiterer Reaktoren gleicher Bauart noch völlig offen. Diese stellt aber die Voraussetzung für die notwendige Kostendegression dar. Es besteht aber keine Perspektive, die erheblichen Größennachteile durch Massenproduktion zu überkompensieren. Hierfür wäre bei optimistischer Betrachtung der Bau von mehreren Tausend baugleichen Kernkraftwerken notwendig (Kasten). Zu beachten ist außerdem, dass ein massiver Bau von Reaktoren eine Harmonisierung und Standardisierung von Designs und Regelwerken benötigt, die auch mittelfristig kaum umsetzbar ist.²¹

Selbst unter Annahme von optimistischen Rahmenbedingungen ist nicht von einem kostenmäßig wettbewerbliehen Angebot auszugehen. Eine aktuelle Studie mit Beteiligung des DIW Berlin zeigt, dass in einer Simulation mit Zufallsstichproben (Monte-Carlo-Simulation) von SMR-Konzepten die zu erwartenden durchschnittlichen Stromgestehungskosten (levelized costs of electricity) für wassergekühlte Konzepte hierbei durchschnittlich zwischen 213 und

¹⁷ World Nuclear News (2019): Russia connects floating plant to grid. 19. Dezember (online verfügbar).

¹⁸ Pistner et al. (2021), a. a. O.; IAEA (2022), a. a. O.

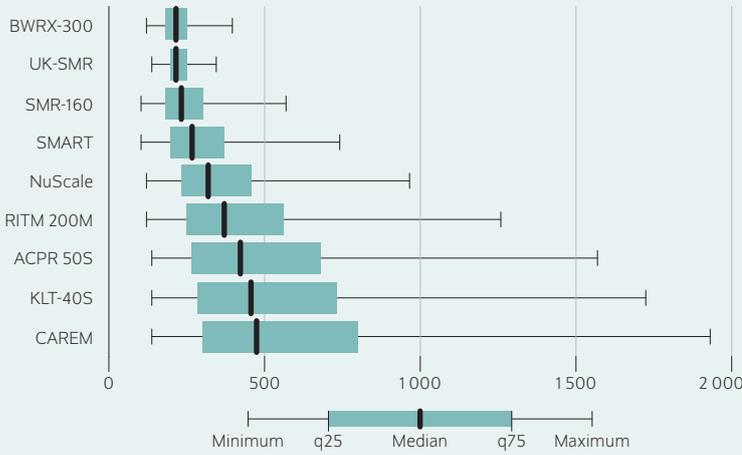
¹⁹ IAEA (2022), a. a. O.

²⁰ Stephen Thomas und M. V. Ramana (2022): A Hopeless Pursuit? National Efforts to Promote Small Modular Nuclear Reactors and Revive Nuclear Power. WIREs Energy and Environment, Januar (online verfügbar).

²¹ Tristano Sainati, Giorgio Locatelli und Naomi Brookes (2015): Small Modular Reactors: Licensing Constraints and the Way Forward. Energy 82 (März), 1092–1095 (online verfügbar).

Abbildung 4

Stromerzeugungskosten von SMR-Konzepten
In US-Dollar pro Megawattstunde



Anmerkung: Nur Leichtwasserreaktoren sind dargestellt.

Quelle: Steigerwald et al. (2022).

© DIW Berlin 2023

Die erwarteten Kosten aktueller SMR-Konzepte liegen deutlich höher als die anderer Energieträger.

581 US-Dollar/MWh liegen (Abbildung 4).²² Damit wären sie, falls sie jemals gebaut würden, bereits aus heutiger Perspektive wesentlich teurer als Strom aus erneuerbaren Energien. Auch die problematische Produktion hochradioaktiver Abfälle bleibt weiterhin bestehen.

Schnelle Brutreaktoren und andere nicht leichtwassergekühlte Reaktoren auf absehbare Zeit weder verfügbar noch wettbewerbsfähig

Jenseits von SMR wird diskutiert, ob in den nächsten Jahrzehnten Reaktortypen im industriellen Maßstab kosteneffizient zur Verfügung stehen könnten, deren Entwicklung in den 1970er Jahren aufgrund technischer Probleme und fehlender Wettbewerbsfähigkeit weitgehend eingestellt worden war. Dabei handelt es sich um nicht leichtwassergekühlte Reaktoren mit unterschiedlichen Kühlkonzepten und Neutronenspektren. Diese Reaktortypen werden in der Atomwirtschaft als „Gen IV“-Reaktoren bezeichnet, beziehen sich jedoch auf Technologielinien, die bereits in den 1940er Jahren entwickelt und in den 1950er Jahren zu Prototypen geführt haben. Neben Reaktoren mit einem schnellen Neutronenspektrum („schnelle Brüter“) handelt es sich dabei vor allem um Hochtemperaturreaktoren und Flüssigsalzreaktoren. Sie konnten sich nicht gegenüber der leichtwassergekühlten Reaktortechnologie durchsetzen.²³

²² Björn Steigerwald et al. (2022): Estimating Production Costs of Future Nuclear Fission Reactors – The Effect of Parameter Choice and an Application to SMR Concepts under Development (“Small Modular Reactors“), 43rd IAEA International Conference am 2. August 2022, Tokio.

²³ Christoph Pistner und Matthias Englert (2017): Neue Reaktorkonzepte. Eine Analyse des aktuellen Forschungsstands. Darmstadt: Öko-Institut eV (online verfügbar), Cowan (1990), a. a. O.;

Kasten

Modellrechnung

Die Rückkehr zum Bau von Reaktoren mit geringer Leistung wird mit der Hoffnung verbunden, Kostenvorteile durch Modularisierung beziehungsweise Massenproduktion zu erreichen.¹ In der Literatur wird jedoch zunächst davon ausgegangen, dass spezifische Baukosten mit steigender Größe der Anlage (Kapazität) abnehmen beziehungsweise mit Verringerung der Leistungskapazität zunehmen (Größenvorteile).²

Eine vereinfachte Modellrechnung aus der Produktionstheorie zeigt, dass die SMR-Konzepte unter einem strategischen Größennachteil leiden, der nur bei extrem hohen und aus heutiger Sicht unerreichbaren Produktionsmengen aufgehoben werden könnte: Der Kostennachteil, den ein SMR gegenüber den Leichtwasserreaktoren mit einer höheren Kapazität aufweist, könnte theoretisch durch Lern- beziehungsweise Masseneffekte kompensiert werden. Eine steigende Produktionsmenge eines standardisierten Produkts würde so zu sinkenden spezifischen Baukosten entweder durch Masseneffekte einer Serienproduktion oder durch höhere Produktivität der Arbeit (Lerneffekte) führen.

Die Baukosten für einen Reaktor aus der hypothetischen Massenproduktion, das heißt den „n-ten“ Reaktor einer Serie ($C_{SMR,n}$), hängen ab von den Kosten für den ersten dieser Reaktoren, der Lernrate „x“ sowie der Anzahl der Verdopplungen des Produktionsoutputs „d“ (Formel, linker Teil). Die Kosten für den ersten Reaktor mit geringer Kapazität ($C_{SMR,1}$) wiederum lassen sich durch einen Vergleich mit einem Reaktor größerer Leistung darstellen (Formel, rechte Seite). Anhand dieser stilisierten Produktionskostenrechnung lässt sich die Anzahl der SMR-Reaktoren ermitteln, die den Kostennachteil, der durch Größenvorteile entsteht, kompensieren würde.³

- ¹ Giorgio Locatelli, Chris Bingham und Mauro Mancini (2014): Small Modular Reactors: A Comprehensive Overview of Their Economics and Strategic Aspects. Progress in Nuclear Energy 73, 75–85 (online verfügbar).
- ² Geoffrey Rothwell (2016): Economics of Nuclear Power. London.
- ³ Clara Lloyd, Robbie Lyons und Tony Roulstone (2020): Expanding Nuclear’s Contribution to Climate Change with SMRs. Nuclear Future, 39.

Seit circa 20 Jahren laufen nunmehr neue Bemühungen, diese Reaktortypen wieder anzuschieben. Zudem sollen Konzepte zur besseren Abfallbehandlung und höheren Brennstoffausnutzung realisiert sowie die Proliferationsrisiken (Weitergabe als kernwaffenfähiges Material) gesenkt werden.²⁴ Mit der Gründung des „GenIV International Forum“

Ben Wealer et al. (2018): Nuclear Power Reactors Worldwide—Technology Developments, Diffusion Patterns, and Country-by-Country Analysis of Implementation (1951–2017). DIW Data Documentation 93 (online verfügbar).

²⁴ GenIV International Forum (2002): A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Technology Roadmap GIF-002-00 (online verfügbar).

Tabelle

Definition der Berechnungsparameter

Parameter	Definition
$C_{SMR,n}$	Absolute Baukosten für den n -ten <i>small modular reactor</i> ("n-th of a kind") (US-Dollar)
$C_{SMR,1}$	Absolute Baukosten für den Bau des ersten <i>small modular reactor</i> ("First of a kind") (US-Dollar)
x	Lernrate bzw. Faktor der Kostenreduktion für jede Verdopplung der Produktionsmenge n
d	Anzahl der Verdopplungen der Produktionsmenge n , das heißt $n = 2^d$
C_{LR}	Absolute Baukosten Leichtwasserreaktor (US-Dollar)
S_{SMR}	Elektrische Leistung <i>small modular reactor</i> (Megawatt)
S_{LR}	Elektrische Leistung Leichtwasserreaktor (Megawatt)
b	Skaleneffekt

Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2023

$$C_{SMR,n} = C_{SMR,1} \times (1-x)^d = C_{LR} \times \left(\frac{S_{SMR}}{S_{LR}}\right)^b \times (1-x)^d$$

Für eine beispielhafte Berechnung werden zwei Reaktordesigns (einmal niedrig- und einmal hochkapazitär) des amerikanischen Unternehmens Westinghouse herangezogen: ein SMR-Design eines leichtwassergekühlten Reaktors mit einer Leistung von 225 MWe (S_{SMR}) und der AP1000, ein leichtwassergekühlter Reaktor mit circa 1100 MW (S_{LR}). In der Produktionsrechnung soll dieses SMR-Design die spezifischen Baukosten des leichtwassergekühlten AP1000-Designs von 6 000 USD/kW ersetzen. Weiterhin werden eine Lernrate von $x = 0,06$ (sechs Prozent) und Skaleneffekte von $b = 0,55$ angenommen. Unter diesen Umständen wären die spezifischen Baukosten des SMR erst ab circa 3 000 produzierten Reaktoren (also $d \approx 11,55$ Verdopplungen der Produktionsmenge) niedriger als die des AP1000⁴ (Tabelle).

4 Pistner et al. (2021), a. a. O.; Steigerwald et al. (2022) a. a. O.

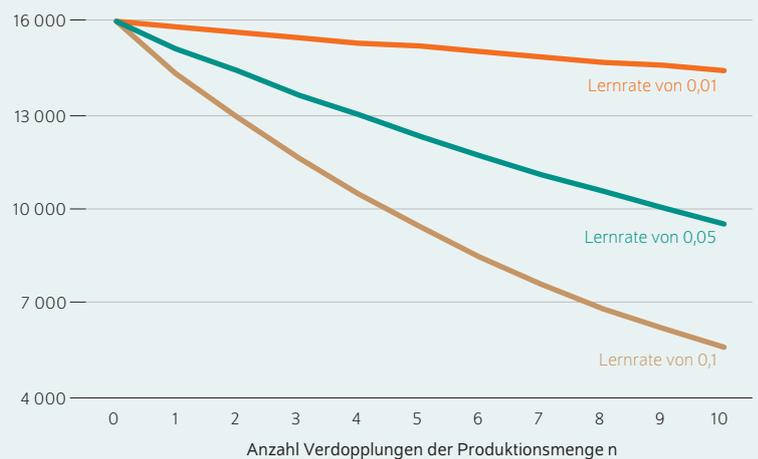
im Jahr 2001 haben sich 14 Mitgliedsstaaten, darunter die USA, China, Russland, die Staaten der EURATOM, das Vereinigte Königreich und andere zusammengeschlossen. Ihr Ziel ist es, nicht-leichtwassergekühlte Reaktorkonzepte weiterzuentwickeln.²⁵ Allerdings sind diese Bemühungen bisher technologisch und kommerziell wenig erfolgreich geblieben.²⁶ Die Zeiträume, bis zu denen funktionstüchtige

25 GenIV International Forum (2022): Annual Report 2021 (online verfügbar).

26 Edwin Lyman (2021): 'Advanced' isn't Always Better: Assessing the Safety, Security, and Environmental Impacts of Non-Light-Water Nuclear Reactors. Union of Concerned Scientists (online verfügbar).

Abbildung

Kostendegression durch Lerneffekte in Abhängigkeit von Lernrate und Verdopplung der Produktionsmengen
Spezifische Baukosten für SMR in US-Dollar pro Kilowatt



Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz; eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2023

SMR-Konzepte haben einen strukturellen Kostennachteil und könnten erst im Bereich von mehreren tausend Exemplaren an die Kosten aktueller Leichtwasserreaktoren herankommen.

Die Abbildung zeigt eine Sensitivitätsanalyse dieses Zusammenhangs auf: Mit höheren Lernraten „x“ erfolgt eine schnellere Reduktion der spezifischen Baukosten. Jedoch dürften diese Lernraten für Kernkraftwerke mit geringer Leistung weit unterhalb der Werte liegen, die für andere Massenproduktionen, zum Beispiel Mikrochips oder Solarzellen, erreicht wurden. Des Weiteren müsste berücksichtigt werden, dass ja auch die Leichtwasserreaktoren mit hoher Leistung durch Lerneffekte etwas günstiger werden könnten. Und diese Kosten liegen, wie im Haupttext erwähnt, noch weiter oberhalb derer von erneuerbaren Energien. Insgesamt ist somit die Perspektive, mit SMR-Konzepten Kostenvorteile zu erzielen, sehr gering (Abbildung).

Demonstratoren in den geplanten Größenklassen (in der Regel weit über 300 MW) vorliegen könnten, werden vom Generation IV International Forum (GIF) regelmäßig verschoben, jüngst in die 2040er Jahre.

Die geringe Investitionsdynamik und fehlende Durchsetzungsperspektive der nicht leichtwassergekühlten Reaktorentwicklungen lassen sich anhand einer Technologielinie aufzeigen, die als am weitesten entwickelt gilt und für die derzeit ein Pilotprojekt in den USA geplant ist: Dabei handelt es sich um (natriumgekühlte) Reaktoren mit einem schnellen Neutronenspektrum, landläufig auch als „schnelle Brüter“

Tabelle

Historische Beispiele für Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum („Schnelle Brüter“)
Bau- und Betriebszeiten

Reaktorkonzept	Land	Leistung (MWth)	Baubeginn	Betrieb	Stilllegung	Noch aktiv (?)	Durchschnittliche Kapazitätsauslastung
Experimentalreaktoren							
Rhapsodie	Frankreich	40	1962	1967	1983		Keine Angaben
KNK-II	Deutschland	52	1975	1977	1991		17,10 Prozent
DFR	Großbritannien	60	1954	1959	1977		33,80 Prozent
FBTR	Indien	40	1972	1985		2022	Keine Angaben
PEC	Italien	120	1974	2022		2022	Keine Angaben
JOYO	Japan	140	1970	1977	2007		Keine Angaben
BR-10	Sowjetunion/Russland	55	1956	1959	2002		Keine Angaben
BOR-60	Sowjetunion/Russland	9	1958	1964		2022	Keine Angaben
EBR-I	USA	1,2	1947	1951	1963		Keine Angaben
EBR-II	USA	62,5	1958	1963	1994		Keine Angaben
Fermi	USA	200	1956	1965	1972		Keine Angaben
FFTF	USA	400	1970	1980	1992		Keine Angaben
CEFR	China	65	2000	2010			Keine Angaben
Demonstratoren							
SNR-300	Deutschland	762	1973		1991		Nie in Betrieb
Phoenix	Frankreich	563	1968	1973	1983		Circa 50 Prozent
PFR	Vereinigtes Königreich	650	1966	1974	1994	2022	7 Prozent
PFBR	Indien	1250	2003	2012	2016		Keine Angaben
Monjou	Japan	714	1985	1994	1999		Von 1996 bis 2010 wegen Unfall außer Betrieb
BN-350	Sowjetunion/Russland	750	1964	1972		2022	85 Prozent
BN-600	Sowjetunion/Russland	1470	1967	1980		2022	74 Prozent (1982 bis 2009)
BN-800	Russland	2100	2006	2016	1983 ¹		71 Prozent
CRBRP	USA	unbekannt	1982				Nie in Betrieb

1 Baubeginn 1983, keine Bautätigkeit zwischen 1986 bis 2006, dann Wiederaufnahme.

Quelle: Eigene Recherche.

© DIW Berlin 2023

bezeichnet.²⁷ Dieser Reaktortyp wurde bereits während der 1950er Jahren entwickelt, insbesondere in der Sowjetunion und den USA, aber auch in Frankreich, Deutschland und Japan, später auch in China.²⁸ In der Frühzeit der Reaktorentwicklung ging man davon aus, dass alle Technologielinien auf den schnellen Brutreaktor und die Plutoniumwirtschaft hinauslaufen würden.²⁹

Viele Jahrzehnte nach den optimistischen Anfängen des „schnellen Brütters“ machte sich allerdings sowohl technisch als auch ökonomisch Ernüchterung breit. So lässt sich die Entwicklung von schnellen Reaktoren vor allem über

Projektabbrüche beschreiben. Anfängliche Demonstrationsprojekte in den USA wurden in den 1970ern aufgrund von ökonomischen, technischen und auch aufgrund von Proliferationsrisiken wieder eingestellt (Tabelle 1).³⁰ Außerdem kam es immer wieder zu technischen Problemen wie Kühlmittelbränden, da das verwendete Kühlmittel Natrium bei Kontakt mit Wasser oder Luft hochreaktiv ist. Auch in Deutschland gab es Versuche, jene Reaktorkonzepte zu entwickeln, beispielweise den schnellen Brüter in Kalkar, der jedoch wegen sicherheitstechnischer Bedenken und fehlender wirtschaftlicher Perspektiven nie in Betrieb ging.³¹ Auch in Frankreich konnten sich schnelle Reaktoren nicht etablieren. Russland ist das einzige Land, in dem noch zwei derartige Reaktoren auf dem Gelände des Kernkraftwerks Belojarsk nahe Saretschny betrieben werden, allerdings ist der Sprung zur kommerziellen Nutzung ebenfalls ausgeblieben. China betreibt einen Forschungsreaktor nahe Peking

27 Im Vergleich zu Reaktoren mit thermischem Spektrum haben Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum eine höhere Brennstoffausnutzung, da sie spaltbares Material erbrüten. Dieses Material muss jedoch aufwendig wiederaufbereitet werden, bevor es erneut genutzt werden kann (sogenannter Mischoxid- oder MOX-Brennstoff). Die Wiederaufbereitung von Brennstoff ist mit sehr hohen Kosten verbunden, vgl. Frank von Hippel, Masafumi Takubo und Jungmin Kang (2019): Plutonium: How Nuclear Power’s Dream Fuel Became a Nightmare. Singapur (online verfügbar). Nur wenige Länder betreiben heutzutage Wiederaufbereitungsanlagen, beispielsweise Frankreich, UK und Russland. In China befinden sich zwei Wiederaufbereitungsanlagen im Bau, vgl. Matthew Bunn, Hui Zhang und Li Kang (2016): The Cost of Reprocessing in China. Cambridge MA (USA), Belfer Center for Science and International Affairs Harvard Kennedy School (online verfügbar).

28 Pistner und Englert (2017), a. a. O.

29 Für Details zu diesem Abschnitt vgl. Christian von Hirschhausen (2022): Nuclear Power in the Twenty-First Century (Part II) – The Economic Value of Plutonium. DIW Berlin Discussion Paper Nr. 2011 (online verfügbar).

30 Thomas B. Cochran et al. (2010): Fast Breeder Reactor Programs: History and Status. Research Report 8. Princeton, N.J.: International Panel on Fissile Materials (online verfügbar).

31 Heute befindet sich auf dem Gelände der Freizeitpark „Wunderland Kalkar“. Willy Marth (1992): Der Schnelle Brüter SNR 300 im Auf und Ab seiner Geschichte. KfK 4666. Kernforschungszentrum Karlsruhe (online verfügbar); WDR (2022): Wunderland Kalkar hat neuen Eigentümer. Nachrichten, 3. August (online verfügbar). Vgl. zur Geschichte der deutschen Kernkraftwerke auch den Fotoband von Lena-Jülide Camurdas et al. (2023): Einfach mal abschalten, und dann? Die Geschichte der deutschen Atomkraft und ihr radioaktives Erbe (online verfügbar).

(Fangshan) und baut derzeit einen ersten Demonstrationsreaktor in der Provinz Fujian.³² Nach der Stilllegung der Reaktoren mit schnellem Neutronenspektrum versucht nun auch das US-Energieministerium in Kooperation mit der Firma TerraPower³³ erneut schnelle Reaktoren zu bauen – mit erheblicher staatlicher Förderung.³⁴

Die Wettbewerbsfähigkeit dieser Reaktoren hängt von drei wesentlichen Parametern ab: dem Uranpreis, den Baukosten und den Entsorgungskosten. In keinem der drei Bereiche ist ein Kostenvorteil für die schnellen Reaktoren abzusehen. Eine Berechnung des Break-Even-Preises von Uran zeigt auf, bei welchem Preis der Betrieb eines hypothetischen schnellen Reaktors mit Wiederaufbereitung genauso teuer wäre wie ein Leichtwasserreaktor ohne Wiederaufbereitung. Überschlägige Berechnungen legen nahe, dass der Uranpreis um ein Vielfaches höher liegen müsste als jener, den man am Markt beobachten kann.³⁵ Die Baukosten für den in den USA geplanten Piloten sind nicht absehbar, dürften aber wesentlich höher liegen als die der leichtwasserbasierten Technologielinie, die ihrerseits weit teurer ist als andere Energiequellen. Auch bei den Entsorgungskosten ist von dem Pilotprojekt kein Vorteil absehbar.

Umdenken in der Energiesystemmodellierung hat begonnen

Das geringe Potenzial der Atomwirtschaft zur Entwicklung von wettbewerbsfähigen Reaktorkonzepten wird inzwischen auch in Fachkreisen der Energiesystemmodellierung und integrierter Assessment Modelle (IAM) reflektiert. Diese hatten bisher teilweise sehr hohe Anteile an Atomenergie in Klimaschutzszenarien errechnet. So war bis vor Kurzem zu beobachten, dass Atomenergie als kohlenstoffarme Technologie Berücksichtigung in Klimaszenarien fand – und dies unabhängig von deren offensichtlich fehlenden Wettbewerbsfähigkeit.³⁶ Im Mittel gehen Szenarien mit ansteigendem Anteil an Atomenergie davon aus, dass bis zum Jahr 2050 die jährliche weltweite Stromerzeugungsmenge aus Atomenergie etwa 5 600 TWh beträgt – was mehr als einer Verdopplung der heutigen Stromerzeugung entspräche. Bei diesen Szenarien nahmen die Modellierer*innen bisher für Atomenergie niedrige Investitionskosten an. Gleichzeitig ging man für Erneuerbare aber von relativ hohen Kosten aus (insbesondere Solar) sowie von überhöhten

32 IAEA (2022): Nuclear Power Reactors in the World. IAEA-RDS-2/42. Wien (online verfügbar).

33 TerraPower gehört teilweise Bill Gates, das Konzept wird in Zusammenarbeit mit Lowell Wood entwickelt, der vormals mit Edmund Teller zusammenarbeitete, der als „Vater“ der Wasserstoffbombe gilt.

34 Als eines von zwei Konzepten erhielt TerraPower von der amerikanischen Regierung Zuschüsse in Milliardenhöhe, jüngst aufgestockt mit dem Infrastrukturgesetz der Biden-Regierung im Jahr 2021. Vgl. Office of Nuclear Energy (2020): U.S. Department of Energy Announces \$160 Million in First Awards under Advanced Reactor Demonstration Program. Governmental Website. 12. Oktober (online verfügbar); U.S. Congress (2021): Infrastructure Investment and Jobs Act (IIJA) – Bipartisan Infrastructure Law (online verfügbar).

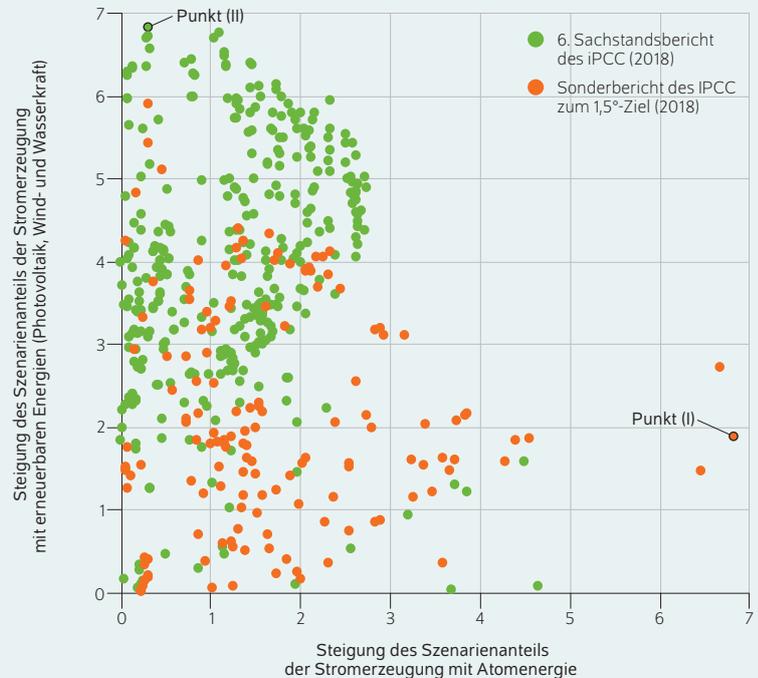
35 Matthew Bunn et al. (2003): The Economics of Reprocessing Versus Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel. Project on Managing the Atom. Belfer Center for Science and International Affairs, Harvard Kennedy School (online verfügbar); Hirschhausen (2022), a. a. O.

36 Son H. Kim et al. (2014): Nuclear Energy Response in the EMF27 Study. Climatic Change 123 (3–4), 443–460 (online verfügbar).

Abbildung 5

Vergleich von Energie- und Klimaszenarien im 1,5-Grad-Bericht (2018) und dem sechsten Sachstandsbericht (2022)

Steigung des Anteils an Stromproduktion von 2020 bis 2100 in Promille



Lesebeispiel: Oranger Punkt rechts, bezeichnet mit Punkt (I): Betrachtung der Veränderung des prozentualen Anteils der jeweiligen Technologie an der Stromerzeugung zwischen den Jahren 2020 und 2100. Ein positiver Wert bedeutet hierbei einen Anstieg des jeweiligen Anteils über den Beobachtungszeitraum (Steigung des Anteils von Atomenergie (0,0068) | Steigung des Anteils von erneuerbaren Energien (Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft) (0,0018)). Grüner Punkt mit größtem Y-Wert, bezeichnet mit Punkt (II): (Steigung des Anteils von Atomenergie (0,0003) | Steigung des Anteils von erneuerbaren Energien (Photovoltaik, Wind und Wasserkraft) (0,0068)).

Anmerkung: Nur Leichtwasserreaktoren sind dargestellt.

Quelle: Björn Steigerwald et al. (2023): Nuclear Bias in Energy Scenarios: A Review and Results from an in-Depth Analysis of Long-Term Decarbonization Scenarios. Gehalten auf der 13. Internationalen Energiewirtschaftstagung (IEWT) Wien am 15. Februar 2023.

© DIW Berlin 2023

In vielen Energieszenarien findet ein Umdenkprozess von Atomenergie in Richtung erneuerbare Energien statt.

Systemintegrationskosten für Erneuerbare bei gleichzeitiger Vernachlässigung der Systemkosten der Atomenergie.

Jedoch hat in den Fachkreisen vor wenigen Jahren ein Umdenkprozess begonnen. Dieser führt dazu, dass sich das Energiemodellierungs-Paradox³⁷ abschwächt und einer stärker an realwirtschaftlichen technischen Entwicklungen orientierten Modellierung und zugrundeliegenden Annahmen weicht. Dies zeichnet sich insbesondere durch aktualisierte Kostenannahmen für erneuerbare Energien, insbesondere für die Photovoltaik und die Kosten der

37 Diesen Gegensatz zwischen einer stark zunehmenden Bedeutung von Atomenergie trotz deren offensichtlich fehlender betriebswirtschaftlicher Wettbewerbsfähigkeit kann man auch als „nukleares Energiemodellierungs-Paradoxon“ bezeichnen, vgl. Christian von Hirschhausen (2017): Nuclear Power in the Twenty-first Century – An Assessment (Part I). DIW Discussion Paper Nr. 1700 (online verfügbar).

Energiesystemintegration aus.³⁸ Eine Vielzahl von Modellen identifiziert inzwischen nicht mehr Atomenergie, sondern erneuerbare Energien als den wesentlichen Treiber des zukünftigen Energiemix.

Vergleicht man die Energieszenarien des Berichts des Weltklimarats (IPCC) von 2018 mit dem im Jahr 2022, ist zu beobachten, dass die Anzahl von Szenarien mit einem starken Anstieg an Atomenergie (im Zeitraum zwischen 2020 und 2100) gesunken ist und sich der Anstieg an erneuerbaren Energien erhöht hat (Abbildung 5). Lag im Sonderbericht des IPCC zum 1,5-Grad-Ziel (2018) der Schwerpunkt noch bei zunehmenden Anteilen an Atomenergie (orange Punkte), so hat sich dieser im 6. Sachstandsbericht des IPCC (2022) in Richtung steigender Anteile Erneuerbarer und sinkender Anteile Atomenergie verschoben (grüne Punkte). Auch die Modellier*innen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) weisen in einem kostenoptimalen Dekarbonisierungspfad darauf hin, dass Atomenergie in den nächsten Jahrzehnten weitgehend durch erneuerbare Energien ersetzt werden müsste.³⁹

Fazit: Atomenergieausbau technisch riskant und ökonomisch unrentabel – Schwerpunkt auf Entsorgung legen

Die Atomwirtschaft hat es in den vergangenen Jahrzehnten nicht geschafft, wettbewerbsfähige Reaktoren zu produzieren. Zudem führt die aktuelle Dynamik auf den Energiemärkten dazu, dass alte Kernkraftwerke zu Hunderten vom Netz genommen werden. In Deutschland, aber auch im übrigen Europa und weltweit steht dagegen ausreichend und kostengünstig erneuerbare Energie für ein klima- und plutoniumneutrales Energiesystem zur Verfügung.

Hoffnungen auf radikale Innovationen und die Ausbreitung von bisher nicht industriell erprobten Reaktorkonzepten erscheinen angesichts der Erfahrungen der vergangenen Jahrzehnte als unbegründet: Die Idee, Kernkraftwerke mit geringen Leistungen zu bauen, wurde bereits in den 1950er Jahren praktiziert und dann aufgrund struktureller Kostennachteile rasch aufgegeben; auch deshalb sind heute vom SMR Hype keine Verbesserungen zu erwarten. Versuche zur Wiederbelebung von bisher nicht durchgesetzten nicht leichtwassergekühlten Reaktoren werden zwar in einigen Ländern betrieben, dürften jedoch auch in den kommenden Jahrzehnten keinen industriellen Durchbruch zeigen. Deshalb sollten Bestrebungen nicht in die Erforschung angeblich neuer Reaktorkonzepte fließen, sondern sich auf die Herausforderungen des Rückbaus und der Lagerung radioaktiver Abfälle fokussieren. Die Atomwende, also die Abkehr vom System Atomenergie, ist erst dann gelungen, wenn die Hinterlassenschaften in Form von radioaktiven Abfällen möglichst sicher tiefegeologisch endgelagert sind.

Der Umdenkprozess in der Energiesystem- und integrierten Assessment-Modellierung spiegelt die geringen Perspektiven der Atomwirtschaft auf wettbewerbsfähige Reaktoren wider. Zwar teilten Expert*innen lange Zeit den Traum von der Plutoniumwirtschaft. Jedoch ist dieser Konsens in den vergangenen Jahren einer realistischeren Einschätzung von Technologie- und Kostenentwicklungen gewichen. Unter Berücksichtigung aktueller Trends und Daten bleibt Atomenergie den erneuerbaren Energien kostenmäßig weit unterlegen.

Aus der Analyse lassen sich folgende Implikationen ableiten: Die Politik sollte sich im Rahmen der Forschungsförderung künftig auf Bereiche konzentrieren, von denen substantielle Beiträge zur Energiewende zu erwarten sind, wie erneuerbare Energien, Speicher und andere Flexibilitätsoptionen. Atomenergie gehört nicht dazu. Bemühungen, Energieproduktion aus Kernkraftwerken, zum Beispiel Wasserstoff, das Label „grün“ beziehungsweise „nachhaltig“ anzuhängen, sollte sie entschieden entgegnet werden. Bei der Ausgestaltung des Stromsektordesigns in Deutschland und Europa sollten Lösungen abgelehnt werden, die auf die Subventionierung von Kernkraftwerken zielen (wie zum Beispiel in Frankreich und Polen).

³⁸ Dmitrii Bogdanov et al. (2021): Full Energy Sector Transition towards 100 % Renewable Energy Supply: Integrating Power, Heat, Transport and Industry Sectors Including Desalination. *Applied Energy* 283 (Februar), 116273 (online verfügbar); Konstantin Löffler et al. (2017): Designing a Model for the Global Energy System—GENESYS-MOD: An Application of the Open-Source Energy Modeling System (OSEMOSYS). *Energies* 10 (10), 1468 (online verfügbar).

³⁹ Gunnar Luderer et al. (2021): Impact of Declining Renewable Energy Costs on Electrification in Low-Emission Scenarios. *Nature Energy* 7, November (online verfügbar).

PERSPEKTIVEN DER ATOMENERGIE

Alexander Wimmers ist Gastwissenschaftler der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | awimmers@diw.de

Fanny Böse ist Doktorandin an der TU Berlin | fab@wip.tu-berlin.de

Claudia Kemfert ist Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | sekretariat-evu@diw.de

Björn Steigerwald ist Gastwissenschaftler der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | bsteigerwald@diw.de

Christian von Hirschhausen ist Forschungsdirektor in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt im DIW Berlin | chirschhausen@diw.de

Jens Weibezahn ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Copenhagen School of Energy Infrastructure (CSEI) der Copenhagen Business School (CBS) | jew.eco@cbs.dk

JEL: L51, L94, Q48

Keywords: nuclear power, economics, technology, innovation, energy system analysis

This report is also available in an English version as DIW Weekly Report 10+11/2023:

www.diw.de/diw_weekly



INTERVIEW



Prof. Dr. Christian von Hirschhausen, Forschungs-
direktor in der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt
am DIW Berlin

„Neue Kernkraftwerke können keinen Beitrag zu nachhaltiger Energieversorgung leisten“

1. **Herr von Hirschhausen, obwohl die letzten deutschen Kernkraftwerke bald abgeschaltet werden, wird von verschiedenen Seiten immer wieder über neue Kernkraftwerke diskutiert. Warum eigentlich? Mit welchen Argumenten wird eine Energietechnik eingefordert, deren Verabschiedung man eigentlich gerade beschlossen hatte?** Die Argumente, die in den einschlägigen Diskussionen genannt werden, sind Klimaschutz, Versorgungssicherheit und auch die Aufrechterhaltung einer Kompetenz in Kernphysik und kerntechnischer Forschung, um international mitspielen zu können.
2. **Inwieweit könnten denn neue Kernkraftwerke einen klimaneutralen Beitrag zur Energieversorgung leisten?** Wir brauchen neben der Klimaneutralität auch eine Plutoniumneutralität im System, weil es nicht nur darum geht, CO₂ zu reduzieren, sondern auch das gefährliche, langlebige Plutonium in den radioaktiven Abfällen. Daher kann die gegenwärtige Kernkraftwerksgeneration, die sogenannte dritte Generation, keine Rolle zum Erreichen nachhaltiger Energieversorgung, Klima- und Plutoniumneutralität spielen. Das gilt auch für die noch gar nicht existierenden SMR-Kernkraftwerke oder andere Typen, wie zum Beispiel den sogenannten schnellen Brüter.
3. **SMR steht für Small Modular Reactor. Das sind sogenannte Mini-Atomkraftwerke, für die es auch von prominenter Seite Fürsprecher gibt. Was spricht konkret gegen diese jetzt vielfach propagierte Technologie?** Die Tatsache, dass man Kernkraftwerke mit geringer Leistung produzieren kann, ist seit 1957 bekannt. Von daher stellt das keine Innovation dar. Es handelt sich um Leichtwasserreaktoren, die wegen der geringen Leistung und der geringen Marktnachfrage derzeit und auf absehbare Zeit nicht wettbewerbsfähig zur Verfügung stehen. Sie hätten auch erhebliche Nachteile aufgrund von zusätzlichen Transporten sowie der Gefahr der Proliferation, also der illegalen Entnahme möglicherweise waffenfähigen Materials. Auch sie stellen

daher keine Perspektive dar für eine klima- und plutoniumneutrale Energieversorgung.

4. **Trotz allem gibt es viele Energiesystemmodelle für langfristige Klimaschutzzszenarien, in denen die kohlenstoffarme Atomenergie einen großen Anteil hat. Warum?** Das ist historisch gewachsen. Ein Teil der Expert*innen für Energiesystemmodellierung hängt aus historischen, technischen und traditionellen Gründen der Kernkraft an. Man spricht auch von einer „verhandelten Atomperspektive“. Dieser Konsens, der lange auch den Weltklimarat IPCC beherrschte, ist allerdings am Bröckeln, weil man festgestellt hat, dass die Kosten der Kernkraft sehr hoch sind. Wir sind jetzt im Bereich von 15 Cent pro Kilowattstunde, wohingegen damals Kohle, heute die Erneuerbaren, um ein Vielfaches günstiger waren und sind. Das setzt sich inzwischen auch in den eher traditionellen Energiesystemmodellierungskreisen durch. Wir beobachten zum Beispiel im sechsten Sachstandsbericht des IPCC (2022) eine Entwicklung weg von Kernkraft hin zu Erneuerbaren.
5. **Welche politischen Handlungsempfehlungen leiten Sie daraus ab?** Wir müssen zum einen die Atomwende, das heißt die Abkehr von der Atomwirtschaft im Kontext der Energiewende, rasch durchziehen und uns auf den Rückbau und die Entsorgung konzentrieren. Wir müssen die gegenwärtige Forschungspolitik kritisch auf den Prüfstand stellen und wir müssen Marktdesigns, die in Deutschland oder auch im Ausland auf die Subventionierung von Kernkraftwerken setzen, als solche identifizieren und möglichst verhindern. Das gilt insbesondere im europäischen Kontext, wo einige Nachbarländer, insbesondere Frankreich, aber auch Polen, versuchen, über diesen Mechanismus unrentable Kernkraftwerke zu finanzieren.

Das Gespräch führte Erich Wittenberg.



Das vollständige Interview zum Anhören finden Sie auf
www.diw.de/interview

SOEP Papers Nr. 1181
2023 | Hend Sallam



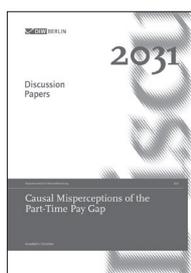
Holding the Door Slightly Open: Germany's Migrants' Return Intentions and Realizations

Return migration intentions are complex and are not necessarily followed by future return migration. Our study compares successful return or repeated migration with self-declared return intentions. We take advantage of the latest German Socio-Economic Panel survey dropout studies and fieldwork to observe a wider return migration window than reported in the literature to answer the question of whether return migration intentions eventually coincided with actual emigration behaviors. We also examine the validity of return migration estimates. This paper explores whether return intentions eventually materialize, whether they can eventually predict actual return behaviors, and if the determinants of actual and predicted return based on intentions are similar. Overall, our results support that migration intentions can predict actual return behavior. While our results show discrepancies in the predictors of return intentions and actual returns, they show emigration intentions as good predictors of actual future emigration. Moreover, we find that life satisfaction significantly impacts the individual intention to remigrate.

www.diw.de/publikationen/soeppapers



Discussion Papers Nr. 2031
2023 | Annekatriin Schrenker



Causal Misperceptions of the Part-Time Pay Gap

This paper studies if workers infer from correlation about causal effects in the context of the part-time wage penalty. Differences in hourly pay between full-time and part-time workers are strongly driven by worker selection and systematic sorting. Ignoring these selection effects can lead to biased expectations about the consequences of working part-time on wages ('selection neglect bias'). Based on representative survey data from Germany, I document substantial misperceptions of the part-time wage gap. Workers strongly overestimate how much part-time workers in their occupation earn per hour, whereas they are approximately informed of mean full-time wage rates. Consistent with selection neglect, those

who perceive large hourly pay differences between full-time and part-time workers also predict large changes in hourly wages when a given worker switches between full-time and part-time employment. Causal analyses using a survey experiment reveal that providing information about the raw part-time pay gap increases expectations about the full-time wage premium by factor 1.7, suggesting that individuals draw causal conclusions from observed correlations. De-biasing respondents by informing them about the influence of worker characteristics on observed pay gaps mitigates selection neglect. Subjective beliefs about the part-time/full-time wage gap are predictive of planned and actual transitions between full-time and part-time employment, necessitating the prevention of causal misperceptions.

www.diw.de/publikationen/diskussionspapiere





MARCEL FRATZSCHER

Warum Reiche in Deutschland vergleichsweise wenig spenden

Marcel Fratzscher, Präsident des DIW Berlin.
Der Kommentar gibt die Meinung des Autors wieder.

Nach dem Erdbeben in der Türkei und Syrien sind die notleidenden Menschen auf Spenden angewiesen. Die Spendenbereitschaft liegt Untersuchungen zufolge gerade nach Katastrophen sehr hoch. Nach Beginn des russischen Angriffs auf die Ukraine vor einem Jahr hatten die Menschen in Deutschland sogar mehr gespendet als jemals zuvor. Zwischen 40 und 50 Prozent der Erwachsenen spenden hierzulande jedes Jahr. Eine Studie des DIW Berlin mit dem Deutschen Zentralinstitut für soziale Fragen (DZI) zeigt einen klaren Trend: Die Spendenbereitschaft hierzulande nimmt kontinuierlich zu. Im Jahr 2021 wurden 12,9 Milliarden Euro gespendet – deutlich mehr als die 10,3 Milliarden Euro im Jahr 2019 oder in vielen früheren Jahren.

Das Spendenverhalten in Deutschland unterscheidet sich nicht zuletzt nach dem Einkommen – allerdings anders, als viele denken würden: Zwar spenden Menschen mit geringen Einkommen seltener als Menschen mit hohen Einkommen. Wenn die zehn Prozent der Menschen mit den geringsten Einkommen jedoch spenden, dann geben sie im Durchschnitt 1,9 Prozent ihres durchschnittlichen jährlichen Einkommens. Das ist prozentual doppelt so viel wie bei den zehn Prozent der Menschen mit den höchsten Einkommen, die lediglich 0,9 Prozent des Einkommens geben. Dieser Unterschied verstärkt sich sogar, wenn man die steuerliche Absetzbarkeit von Spenden berücksichtigt, die sich nach dem individuellen Steuersatz richtet. Da Menschen mit geringen Einkommen keine oder nur eine geringe Einkommensteuer zahlen, werden sie steuerlich nicht oder nur geringfügig entlastet. Kurzum: Reiche Spender*innen in Deutschland geben gemessen an ihrem verfügbaren Einkommen deutlich weniger Geld als Menschen mit geringer Einkunft.

Was erklärt diesen Unterschied im Spendenverhalten? Ein Vergleich zwischen Deutschland und den USA kann eine Antwort bieten: In den USA ist das private Spendenaufkommen viel höher als in Deutschland, vor allem von Menschen mit sehr hohem Einkommen und Vermögen. So haben sich zahlreiche Hochvermögende in den USA dem Giving Pledge von Microsoft-Gründer Bill Gates angeschlossen und versprochen, den größten Teil ihres Vermögens noch zu Lebzeiten über Spenden an die Gesellschaft

zurückzugeben. Der gesellschaftliche Konsens in den USA ist: Ein moralisches Leben führt jemand, der erfolgreich ist und viel Vermögen erwirtschaftet, aber arm stirbt und den größten Teil seines Reichtums zu Lebzeiten an die Gesellschaft spendet. In Deutschland dominiert die entgegengesetzte Logik: Ein moralisches Leben ist ein sparsames Leben mit großer Akkumulation von Vermögen, das an die nächste Generation vererbt wird.

Auch ein unterschiedliches Staatsverständnis dürfte eine wichtige Rolle spielen. Anders als in den USA sehen in Deutschland viele die soziale Sicherung primär als Aufgabe des Staates an. Dabei gilt das Motto: Ich zahle Steuern, damit der Staat die sozialen Aufgaben übernimmt und ich keine finanzielle Verantwortung mehr trage. In Bezug auf Spenden und Steuern zeigt sich in Deutschland ein Widerspruch: Viele wollen, dass der Staat die soziale Absicherung übernimmt. Gleichzeitig wird lautstark eine hohe Steuerbelastung beklagt. Viele wollen die Steuern senken, was den Sozialstaat und die Handlungsfähigkeit des Staates schwächen und damit mehr Spenden für sozial Benachteiligte erfordern würde. Die Kritik trifft allerdings nicht auf alle Hochvermögenden zu. Immer mehr Erb*innen hierzulande engagieren sich in Initiativen wie Tax Me Now. Sie haben den Wunsch, der Staat möge große Vermögen stärker besteuern, um seine Aufgaben besser erfüllen zu können, allen Bürger*innen ein menschenwürdiges Leben zu ermöglichen, sozialen Frieden zu gewährleisten und öffentliche Leistungen bereitzustellen.

Unser Verhältnis zu Spenden und Steuern in Deutschland ist also stark geprägt von einem widersprüchlichen Staatsverständnis. Mehr Bescheidenheit und Solidarität, damit eine größere Spendenbereitschaft gerade von Gutverdienenden und vor allem die Entrichtung und nicht die Vermeidung von Steuern, würden uns als Gesellschaft guttun. Aber vielleicht ist der einzige Weg, um Solidarität und soziale Absicherung zu ermöglichen, nicht eine höhere Spendenbereitschaft, sondern höhere Steuern auf große Vermögen, sodass der Staat seine Aufgaben ausreichend erfüllen kann.

Der Kommentar ist in einer längeren Version am 24. Februar 2023 bei ZEIT Online erschienen.