



511 Bericht von Ben Wealer, Simon Bauer, Leonard Göke, Christian von Hirschhausen und Claudia Kemfert

Zu teuer und gefährlich: Atomkraft ist keine Option für eine klimafreundliche Energieversorgung

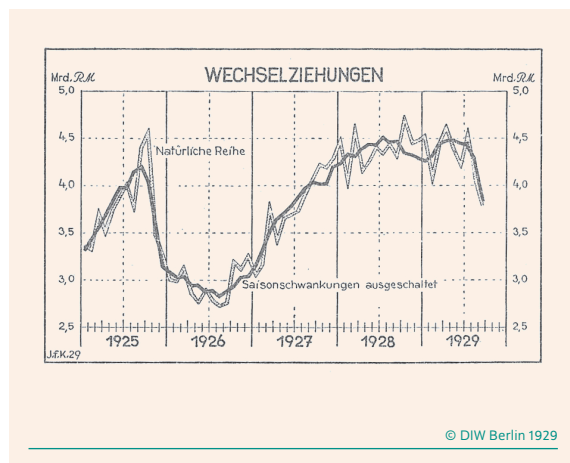
- Atomkraft war historisch und ist gegenwärtig sowie zukünftig unrentabel
- Zudem bestehen hohe externe Kosten durch Strahlungsrisiken
- Atomkraft sollte keine Option für die Energiewende sein

521 Interview mit Christian von Hirschhausen

524 Kommentar von Claudia Kemfert und Alexander Kritikos

Griechenland: mit sauberer Energie aus der Krise

Die Märkte



Der Geldmarkt

Der Rückgang der Geldsätze wurde Mitte des Monats vorübergehend unterbrochen, da der Mediobedarf der Wirtschaft und der öffentlichen Hand zeitweise zu größeren Ansprüchen an den Geldmarkt geführt hat.

Der konjunkturelle Höhepunkt des Geldbedarfs (der übrigens nicht zu verwechseln ist mit dem Bedarf der Wirtschaft an langfristigen Krediten) scheint jedoch seit einiger Zeit schon überschritten zu sein. Jedenfalls deutet der Rückgang der Wechselziehungen darauf hin. Schaltet man nämlich die Saisonschwankungen aus, so zeigt sich seit Juni ein stetiges Sinken der Wechselziehungen. Diese haben im September den niedrigsten Stand seit Mitte 1927 erreicht.

Aus dem Wochenbericht Nr. 30 vom 23. Oktober 1929

IMPRESSUM



DIW Berlin — Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e. V.

Mohrenstraße 58, 10117 Berlin

www.diw.de

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

86. Jahrgang 24. Juli 2019

Herausgeberinnen und Herausgeber

Prof. Dr. Pio Baake; Prof. Dr. Tomaso Duso; Prof. Marcel Fratzscher, Ph.D.; Prof. Dr. Peter Haan; Prof. Dr. Claudia Kemfert; Prof. Dr. Alexander S. Kritikos; Prof. Dr. Alexander Kriwoluzky; Prof. Dr. Stefan Liebig; Prof. Dr. Lukas Menkhoff; Dr. Claus Michelsen; Prof. Karsten Neuhoff, Ph.D.; Prof. Dr. Jürgen Schupp; Prof. Dr. C. Katharina Spieß; Dr. Katharina Wrohlich

Chefredaktion

Dr. Gritje Hartmann; Mathilde Richter; Dr. Wolf-Peter Schill

Lektorat

Jan Stede

Redaktion

Dr. Franziska Bremus; Rebecca Buhner; Claudia Cohnen-Beck;
Dr. Daniel Kemptner; Sebastian Kollmann; Bastian Tittor;
Dr. Alexander Zerrahn

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, 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

Zu teuer und gefährlich: Atomkraft ist keine Option für eine klimafreundliche Energieversorgung

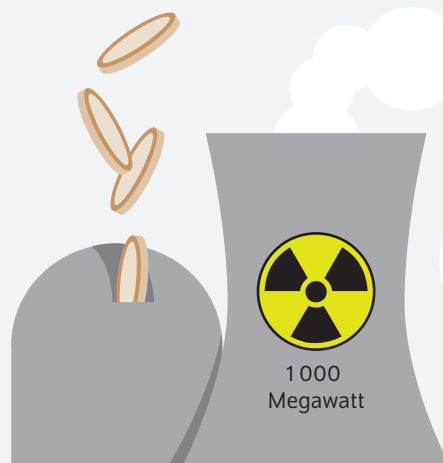
Von Ben Wealer, Simon Bauer, Leonard Göke, Christian von Hirschhausen und Claudia Kemfert

- Analyse der historischen, gegenwärtigen und zukünftigen Wirtschaftlichkeit von Atomkraftwerken
- Wirtschaftshistorische Betrachtung sowie betriebswirtschaftliche Untersuchung von Nettobarwerten für Investitionen in Atomkraft
- Privatwirtschaftliche Investitionen waren in der Vergangenheit stets unrentabel; dies gilt auch für Neuinvestitionen
- Aufgrund von Strahlungs- und Proliferationsrisiken ist Atomkraft eine risikoreiche Technologie
- Die Politik sollte Atomkraft als Option für eine nachhaltige Energieversorgung verwerfen

Eine Investition in ein Atomkraftwerk ist stets privatwirtschaftlich unrentabel, egal welche plausiblen Werte für den zukünftigen Strompreis, die spezifischen Investitionen und die Kapitalkosten angenommen werden.

Betriebswirtschaftliche
Simulation des Nettobarwerts

- Spezifische Investitionen
4 000 bis 9 000 Euro/Kilowatt
- Gewichtete Kapitalkosten
vier bis zehn Prozent
- Strompreis
20 bis 80 Euro/Megawattstunde



1,5–8,9

Erwarteter Verlust
in Milliarden Euro

Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2019

ZITAT

„Atomkraft war niemals auf die kommerzielle Stromerzeugung ausgelegt, sondern auf Atomwaffen. Atomstrom war, ist und bleibt unwirtschaftlich. Darüber hinaus ist Atomkraft mitnichten sauber, sondern aufgrund radioaktiver Strahlung für über eine Millionen Jahre gefährlich für Mensch und Natur.“

— Christian von Hirschhausen, Studienautor —

MEDIATHEK



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

Zu teuer und gefährlich: Atomkraft ist keine Option für eine klimafreundliche Energieversorgung

Von Ben Wealer, Simon Bauer, Leonard Göke, Christian von Hirschhausen und Claudia Kemfert

ABSTRACT

In der sich verschärfenden Diskussionen über wirksamen Klimaschutz wird sowohl in Deutschland als auch in Europa und weltweit die Atomkraft als „saubere Energie“ ins Spiel gebracht. Vor diesem Hintergrund analysiert dieser Bericht ihre historischen, gegenwärtigen und zukünftigen Kosten und Risiken. Die Ergebnisse zeigen, dass Atomkraft aufgrund radioaktiver Strahlung für über eine Millionen Jahre mit-nichten als „sauber“ bezeichnet werden kann, sondern für Mensch und Umwelt gefährlich ist. Zudem fallen hohe Risiken bezüglich Proliferation an. Eine empirische Erhebung aller jemals gebauten 674 Atomkraftwerke zeigt, dass privatwirtschaftliche Motive von Anfang an keine Rolle gespielt haben, sondern militärische Interessen. Selbst bei Vernachlässigung der Kosten für den Rückbau der Atomkraftwerke und die langfristige Lagerung des Atom Mülls wären rein privatwirtschaftliche Investitionen in Atomkraftwerke mit hohen Verlusten verbunden – im Durchschnitt knapp fünf Milliarden Euro pro Kraftwerk, wie eine betriebswirtschaftliche Simulation zeigt. In Ländern, in denen noch Atomkraftwerke gebaut werden, wie etwa China und Russland, spielen private Investitionen auch keine Rolle. Atomkraft ist zu teuer und gefährlich und daher keine Option für eine klimafreundliche Energieversorgung.

Im Kontext der sich verschärfenden Diskussionen über wirksamen Klimaschutz wird von verschiedenen Seiten die Atomkraft unter der Überschrift „saubere Energie“ (*clean energy*) ins Spiel gebracht. So mehrten sich Stimmen, Deutschland sollte im Sinne des Klimaschutzes die Laufzeiten bestehender Atomkraftwerke (AKW) verlängern.¹ Auf europäischer Ebene enthält das sogenannte *Clean Energy Package* – die Fortschreibung der langfristigen EU-Klimaschutzstrategie – nicht nur erhebliche Laufzeitverlängerungen, sondern auch den Neubau von über 100 Atomkraftwerken bis 2050.² Auch die Internationale Energieagentur (IEA) führt in einer aktuellen Studie ein Plädoyer für *nuclear power in a clean energy system* und argumentiert, Atomkraft solle durch erhebliche Subventionen sowohl für Energieversorgungsunternehmen als auch für neue Technologien unterstützt werden.³

Das Narrativ „Atomkraft für Klimaschutz“ ist keineswegs neu: Bereits der Atomphysiker und Erfinder Alvin Weinberg, seit den 1950er Jahren maßgeblich an der Entwicklung von Druckwasserreaktoren beteiligt,⁴ warnte in den 1970er Jahren vor den globalen Folgen der steigenden fossilen Stromerzeugung. Er sah in der Atomkraft die beste Antwort auf den rasant steigenden Energieverbrauch.⁵ Auch der Premierminister des Vereinigten Königreichs, Tony Blair, verband Anfang des 21. Jahrhunderts die Bemühungen um Klimaschutz mit der Forderung nach dem Ausbau der Atomkraft. So fand die Atomkraft als eine wichtige Option für den Klimaschutz Eingang in die von Blair beauftragte Klimaschutzstudie von Nicholas Stern, dem Stern-Report.⁶

¹ Vgl. zum Beispiel Henrik Mortsiefer et al. (2019): VW-Chef fordert radikalere Klimapolitik. Der Tagesspiegel online vom 1. Juni 2019 (online verfügbar, abgerufen am 8. Juli 2019). Dies gilt auch für alle anderen Online-Quellen dieses Berichts, sofern nicht anders vermerkt.

² European Commission (2018): A Clean Planet for All – A European long-term strategic vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. Communication (2018) 773. Brüssel (online verfügbar).

³ IEA (2019): Nuclear Power in a Clean Energy System. Paris.

⁴ Alvin M. Weinberg (1959): Some Thoughts on Reactors. Bulletin of the Atomic Scientists 15 (3), 132–137 (online verfügbar).

⁵ Alvin M. Weinberg (1974): Global Effects on Man's Production of Energy. Science 186 (4160), 205 (online verfügbar).

⁶ Nicholas Stern (2007): The Economics of Climate Change: The Stern Review. Cambridge (online verfügbar).

Vor diesem Hintergrund untersucht dieser Bericht kritisch, ob Atomkraft eine wirtschaftliche und saubere Option für eine zukünftige nachhaltige Energieversorgung darstellt. Hierzu beleuchtet er zum einen aus wirtschaftshistorischer Perspektive die politischen und institutionellen Bedingungen und Kosten, zu denen Atomkraftwerke weltweit errichtet worden sind. Zum anderen ermitteln detaillierte Simulationsrechnungen den erwarteten Nettobarwert für heutige Investitionen aus betriebswirtschaftlicher Perspektive. Die Ergebnisse zeigen, dass Atomkraft in der Vergangenheit keine saubere und kostengünstige Energiequelle war und dies auch in der Zukunft nicht sein wird.

Wirtschaftshistorische Perspektive: Privatwirtschaftliche Grundlage für kommerzielle Atomkraft war von Anfang an nicht gegeben

Die kommerzielle (manchmal auch als „zivile“ Nutzung titulierte) Nutzung der Atomkraft ist ein Nebenprodukt der militärischen Atomkraftentwicklung der 1940er Jahre, insbesondere der beschleunigten Suche nach Atombomben in der Endphase des zweiten Weltkriegs.⁷ Entgegen des anfänglichen Optimismus bezüglich potenziell geringer Kosten der Atomkraft („too cheap to meter“)⁸ war bereits Ende der 1950er Jahre klar, dass Atomkraft keine Chancen auf ökonomische Wettbewerbsfähigkeit hatte.⁹ Sowohl in den USA als auch später in anderen Ländern musste die Ausrüstungs- und Energiewirtschaft mit erheblichen Subventionen an die Atomkraft herangeführt werden. Zudem kam es mit dem Neubau von AKWs seit den 1960er Jahren nicht zu Kostendegressionen. Vielmehr stiegen die Kosten von Atomkraftwerken pro Kilowatt (kW) Leistung kontinuierlich an.¹⁰

Diese Befunde werden seit mehreren Jahrzehnten regelmäßig für die USA gezeigt, aber auch für Frankreich¹¹ und für Reaktoren der sogenannten dritten Generation.¹² Die beiden campusweiten Studien des MIT (2003) und der University of Chicago (2004) stimmen darin überein, dass die Atomenergie im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts mit Kohle und Erdgas nicht konkurrenzfähig war.¹³ Weitere

Studien haben in jüngerer Zeit die mangelnde Wettbewerbsfähigkeit der Atomenergie bestätigt.¹⁴

Politische und institutionelle Rahmenbedingungen des Baus von Atomreaktoren waren militärischer Natur

Zum besseren Verständnis des Phänomens wurde am DIW Berlin eine deskriptive empirische Analyse zu allen 674 seit 1951 gebauten Atomreaktoren durchgeführt, die zur Stromproduktion genutzt wurden (d. h. ohne Forschungsreaktoren).¹⁵ Dabei wurde sowohl die Investitionstätigkeit in diesem Sektor betrachtet als auch die politischen und institutionellen Rahmenbedingungen analysiert, unter welchen die Reaktoren gebaut wurden. Hierbei können vier Entwicklungsphasen identifiziert werden, wobei in keiner Phase privatwirtschaftliche, wettbewerbliche Investitionen eine Rolle spielten.¹⁶

1) Die Frühphase der kommerziellen Nutzung der Atomkraft in der Nachkriegszeit (1945 bis in die 1950er Jahre) war vom sich abzeichnenden kalten Krieg zwischen den USA und seinen Partnerländern auf der einen und der Sowjetunion samt Satellitenstaaten auf der anderen Seite geprägt. Dabei stand die Weiterentwicklung von Atomwaffen und anderen militärischen Nutzungen im Mittelpunkt. Atomkraftwerke wurden vor allem als „Plutoniumfabriken mit angehängter Stromproduktion“¹⁷ konzipiert.

2) Auch die zweite Phase der Diffusion, ab den 1950er Jahren, war von der Geopolitik des kalten Krieges gekennzeichnet. Nach dem Scheitern der Bemühungen der USA, die Ströme von waffenfähigem atomarem Spaltmaterial durch die Einrichtung einer internationalen Behörde zu kontrollieren (*Atoms for Peace*, spätere Internationale Atomenergie-Organisation IAEA), begann ein Wettlauf mit der Sowjetunion zur Verbreitung der jeweils eigenen AKW-Technologie in den Staaten des eigenen Lagers. In wenigen Ländern, etwa den USA und Deutschland, konnten mit Hilfe hoher Subventionen privatwirtschaftliche Energieunternehmen für die Entwicklung und den Betrieb von AKWs gewonnen werden. Jedoch fanden in keinem Fall wettbewerbliche, nicht staatlich abgesicherte Investitionen statt.¹⁸ Parallel hierzu entwickelten nicht blockgebundene Staaten eigene Atomprogramme, wie Indien, Pakistan und Israel.

3) In den 1980er und 1990er Jahren erfolgte der Übergang von einem bipolaren hin zu einem globalen, multipolaren

⁷ François Lévêque (2012): *The Economics and Uncertainties of Nuclear Power*. Cambridge (online verfügbar).

⁸ Lewis Strauss (1954): Remarks Prepared by Lewis L. Strauss, Chairman, United States Atomic Energy Commission, For Delivery at the Founders' Day Dinner, National Association of Science Writers, on Thursday, September 16, 1954, New York (online verfügbar).

⁹ Vgl. hierzu die ausführliche technik-historische Aufarbeitung in Joachim Radkau (1983): *Aufstieg und Krise der deutschen Atomwirtschaft 1945–1975: Verdrängte Alternativen in der Kerntechnik und der Ursprung der nuklearen Kontroverse*. Reinbek bei Hamburg; Joachim Radkau und Lothar Hahn (2013): *Aufstieg und Fall der deutschen Atomwirtschaft*. München; und Joachim Radkau (2017): *Geschichte der Zukunft: Prognosen, Visionen, Irrungen in Deutschland von 1945 bis heute*. München.

¹⁰ Die spezifischen Investitionen für Atomkraftwerke, die in den Jahren 1966–1967 in den Bau gingen, betrugen etwa 700 US-Dollar pro kW. Für die Jahre 1974–1975 betrug dieser Wert ungefähr 3100 US-Dollar pro kW. (Beide Angaben beziehen sich auf den Dollar-Kurs des Jahres 1982.) Vgl. Energy Information Administration (1986): *An Analysis of Nuclear Power Plant Construction Costs*. Washington, DC (online verfügbar).

¹¹ Arnulf Grubler (2010): *The Costs of the French Nuclear Scale-up: A Case of Negative Learning by Doing*. *Energy Policy* 38 (9), 5147–5188 (online verfügbar); Lina Escobar Rangel und François Lévêque (2015): *Revisiting the Cost Escalation Curse of Nuclear Power: New Lessons from the French Experience*. *Economics of Energy & Environmental Policy* 4 (2), 103–126 (online verfügbar).

¹² Vgl. Mycle Schneider et al. (2016): *World Nuclear Industry Status Report 2016*. Paris (online verfügbar).

¹³ Vgl. MIT (2003): *The Future of Nuclear Power*. Cambridge (online verfügbar); University of Chicago (2004): *The Economic Future of Nuclear Power*. Chicago (online verfügbar).

¹⁴ Paul L. Joskow und John E. Parsons (2012): *The Future of Nuclear Power After Fukushima*. *Economics of Energy & Environmental Policy* 1 (2), 99–113 (online verfügbar); William D. D'haeseleer (2013): *Synthesis on the Economics of Nuclear Energy – Study for the European Commission, DG Energy*. Final Report. Leuven (online verfügbar).

¹⁵ Vgl. Ben Wealer et al. (2018): *Nuclear Power Reactors Worldwide – Technology Developments, Diffusion Patterns, and Country-by-Country Analysis of Implementation (1951–2017)*. DIW Berlin Data Documentation 93 (online verfügbar).

¹⁶ Vgl. Wealer et al. (2018), a. a. O.

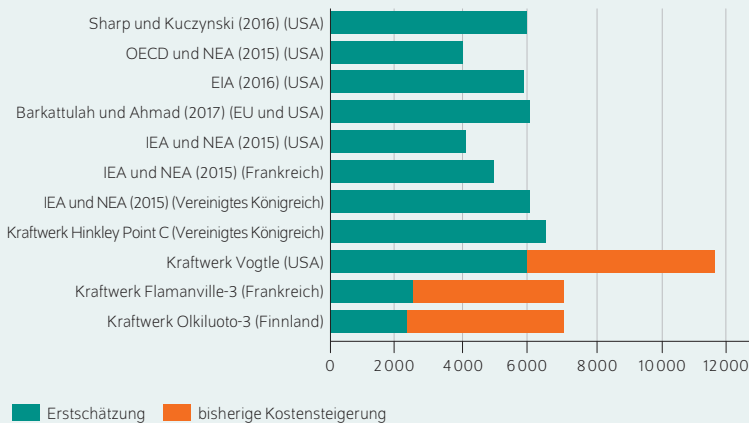
¹⁷ Vgl. die Darstellung bei Radkau (1983), a. a. O., S. 53, zur Entwicklung des ersten Atomreaktors im Vereinigten Königreich im AKW Calder Hall im Jahr 1956.

¹⁸ Vgl. Radkau (1983), a. a. O.

Abbildung 1

Aktuelle Kostenschätzungen für Atomkraftwerke der dritten Generation in Europa und den USA sowie für laufende Bauprojekte

Spezifische Investitionen in US-Dollar (2017) pro Kilowatt



Quellen: Ben Wealer et al. (2018): Cost Estimates and Economics of Nuclear Power Plant Newbuild: Literature Survey and Some Modelling Analysis. IAAE Energy Forum Groningen Special Issue 2018, 43–45 (online verfügbar); Phil Sharp und Stephen Kuczynski (2016): The Future of Nuclear Power in the United States. Washington, D.C. (online verfügbar); OECD und NEA (2015): Nuclear New Build: Insights into Financing and Project Management. (online verfügbar); EIA (2016): Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. (online verfügbar); Nadira Barkatullah und Ali Ahmad (2017): Current Status and Emerging Trends in Financing Nuclear Power Projects. Energy Strategy Reviews 18, 127–140 (online verfügbar); IEA und NEA (2015): Projected Costs of Generating Electricity 2015 Edition. (online verfügbar).

© DIW Berlin 2019

Die aktuellen Kosten übersteigen Schätzungen aus der Literatur deutlich.

Atomwaffen-Rüstungswettbewerb, durch den mindestens zehn Länder in Besitz von Technologie und Wissen zu Atomwaffen gelangten.¹⁹ Neben den USA, dem Vereinigten Königreich, Frankreich und der Sowjetunion waren bzw. sind dies bis heute China, Indien, Pakistan, Nordkorea, Israel und Südafrika. Eine wirtschaftliche Nutzung von Atomkraft durch private, nicht staatlich gestützte Investitionen findet in keinem der Atomländer statt.²⁰

4) Die gegenwärtige Phase ist durch die Rhetorik der „Renaissance der Atomkraft“, in Wirklichkeit aber dem Rückgang der kommerziellen Nutzung in den westlichen Marktwirtschaften gekennzeichnet (Kasten 1). Besonders prägnant sind dabei der finanzielle Bankrott der großen AKW-Bauer Westinghouse (USA)²¹ und Framatome (ehemals Areva, Frankreich)²² sowie die Bestrebungen der Energieversorgungsunternehmen, unrentable Atomkraftwerke möglichst rasch zu schließen

¹⁹ Der Strategieforscher Paul Bracken spricht hier vom Übergang vom ersten in das zweite Atomzeitalter („second nuclear age“), vgl. Paul Bracken (2012): The Second Nuclear Age – Strategy, Danger, and the New Power Politics. New York.

²⁰ Vgl. Wealer et al. (2018), a. a. O.

²¹ Einer der Hauptgründe für Verluste von Westinghouse in Höhe von 6,2 Milliarden US-Dollar und die damit verbundene Einreichung des Insolvenzschutzes im März 2017 waren Kostenüberschreitungen bei den Bauprojekten Vogtle und Summer in den USA. Vgl. Mycle Schneider et al. (2017): World Nuclear Industry Status Report 2017. Paris (online verfügbar).

²² Im Jahr 2018 wurde die Reaktorsparte Areva NP für 1,9 Milliarden Euro hauptsächlich an die staatlich kontrollierte EDF (EDF besaß bereits 75,5 Prozent der Anteile) verkauft und in Framatome umbenannt. Vgl. Mycle Schneider et al. (2018). World Nuclear Industry Status Report 2018. Paris (online verfügbar).

bzw. die finanzielle Verantwortung dem Staat zuzuschieben. In den seit den 1990er Jahren zunehmend liberalisierten Strommärkten gibt es keine Anreize für private Investitionen in Atomkraftwerke. Dies überlässt die Entwicklung der Atomenergie anderen, nicht marktbestimmten Systemen, in denen die Länder aus politischen, militärstrategischen oder anderen Gründen an der nuklearen Entwicklung festhalten, vor allem die Atomkräfte China und Russland.

Die wirtschaftshistorische Betrachtung zeigt, dass Elektrizität hauptsächlich als Kuppelprodukt genutzt wurde. Die treibende Kraft waren militärische Entwicklungen und Interessen, vor allem die Erzeugung von waffenfähigem Plutonium als auch – insbesondere in den USA in den 1950er Jahren – die Entwicklung von Druckwasserreaktoren als U-Boot-Antriebstechnik.²³

Privatwirtschaftliche Grundlage für kommerzielle Atomkraft ist auch heute nicht gegeben

Die wenigen derzeitigen Investitionen in Atomkraftwerke in Europa und OECD-Ländern produzieren absehbar flächendeckend Verluste in bis zu zweistelliger Milliardenhöhe.²⁴ So stiegen die Kosten des AKW Olkiluoto-3 in Finnland von ursprünglich geschätzten drei Milliarden Euro (1995) auf über elf Milliarden Euro. Dies entspricht, Stand 2018, etwa 7200 Euro pro kW (Abbildung 1). In Frankreich ist nach massiven Kostensteigerungen und regelmäßigen Berichten über fehlende Reaktorsicherheit das gesamte Atom-Ausbauprogramm des Energiekonzerns Electricité de France (EDF) in Frage gestellt. Darüber hinaus dürften die hohen Schulden des Konzerns (über 40 Milliarden Euro) zu einer vollständigen Verstaatlichung führen, wenn ein Bankrott vermieden werden soll.²⁵ Von den beiden Investitionsprojekten in den USA wurde eines nach Verdopplung der Kosten aufgegeben (UC Summers, Virginia). Beim anderen (Vogtle, Georgia) stiegen die Kosten von ursprünglich 14 Milliarden US-Dollar, entsprechend etwa 6200 US-Dollar pro kW, im Jahr 2013 auf geschätzte 29 Milliarden US-Dollar im Jahr 2017, entsprechend etwa 9400 US-Dollar pro kW.

Monte-Carlo-Analyse zeigt fehlende betriebswirtschaftliche Grundlage für Investitionen in Atomkraftwerke

In Folgenden wird mittels eines Investitionsmodells die Rentabilität eines Atomkraftwerks unter unterschiedlichen energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen untersucht. Hierbei handelt es sich um eine rein privatwirtschaftliche Perspektive, die externe Kosten außer Acht lässt, etwa für dauerhafte Lagerung von Atommüll.

²³ Vgl. Alvin M. Weinberg (1956): Today's Revolution. Bulletin of the Atomic Scientists 12 (8), 299–302.

²⁴ Vgl. Ben Wealer et al. (2018): Cost Estimates and Economics of Nuclear Power Plant Newbuild: Literature Survey and Some Modelling Analysis. IAAE Energy Forum Special Issue 2018, 43–45 (online verfügbar); sowie Casimir Lorenz et al. (2016): Atomkraft ist nicht wettbewerbsfähig – Auch im Vereinigten Königreich und Frankreich ist Klimaschutz ohne Atomkraft möglich. DIW Wochenbericht Nr. 44, 2047–2054 (online verfügbar).

²⁵ Vgl. Par Pierre Le Hir und Nabil Wakim (2019): Après le nouveau retard de l'EPR de Flamanville, la filière nucléaire dans l'impasse. Le Monde online vom 20. Juni 2019 (online verfügbar).

Das Modell betrachtet eine große Anzahl möglicher Ausprägungen der folgenden drei Rahmenbedingungen: Erstens der Großhandelspreis für Strom, welcher zwischen 20 und 80 Euro pro Megawattstunde (MWh) variiert wird. Dies entspricht der aktuellen Situation in Europa sowie einer konservativen Abschätzung der mittelfristigen Preisentwicklung. Je höher der Strompreis, umso höher sind die zukünftigen Erlöse für einen Kraftwerksbetreiber.²⁶ Zweitens die spezifischen Investitionen, die auf Basis aktueller Schätzungen bzw. Kostenentwicklungen zwischen 4000 und 9000 Euro pro kW variiert werden (Abbildung 1). Sowie drittens die gewichteten Kapitalkosten (weighted average cost of capital, WACC), die zwischen vier und zehn Prozent variiert werden.²⁷ Weitere Kosten belaufen sich auf etwa 90 Euro pro kW und Jahr für Instandhaltung und zwölf Euro pro MWh für Betrieb und den Kernbrennstoff.²⁸ Für die Reaktoren wird eine Laufzeit von 40 Jahren angenommen. Die Analyse geht von einem exemplarischen Atomkraftwerk mit einer elektrischen Leistung von 1000 MW aus.

Eine Monte-Carlo-Simulation ermittelt den Nettobarwert, auch als Kapitalwert oder net present value (NPV) bezeichnet, für eine große Zahl an Kombinationen der unsicheren Variablen. Dabei wird jeweils eine zufällige Ausprägung jeder unsicheren Größe aus einer Gleichverteilung innerhalb der gegebenen Grenzen gezogen und in die Formel für den Nettobarwert eingesetzt. Dieser Schritt wird 100 000 Mal wiederholt. Der Nettobarwert stellt zukünftige Erlösströme den heutigen und zukünftigen Kosten gegenüber. Weil beide Größen auf die Gegenwart abgezinst sind, gibt er den gegenwärtigen Wert einer Investition an. Je höher der Nettobarwert, umso rentabler ist die Investition aus einzelwirtschaftlicher Perspektive. Ist der Nettobarwert negativ, ergibt sich aus einer Investition ein erwarteter Verlust. Durch die Simulation einer Vielzahl möglicher Kombinationen der unsicheren Einflussgrößen kann der mögliche Ergebnisraum gut abgeschätzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Investition in allen Fällen beträchtliche betriebswirtschaftliche Verluste generiert (Abbildung 2). Der (gewichtete) gemittelte Nettobarwert beläuft sich auf rund minus 4,8 Milliarden Euro. Selbst im besten Fall beträgt der Nettobarwert ungefähr minus 1,5 Milliarden Euro. Unter allen Annahmen zu den unsicheren Variablen ist Atomkraft in keinem Fall rentabel. Dies gilt selbst für konservative Annahmen mit hohen Strompreisen, niedrigen Kapitalkosten und niedrigen spezifischen Investitionen.

²⁶ Langfristige Preisprognosen auf Strommärkten sind schwierig, weil sich fundamentale Aspekte ändern können, wie zum Beispiel das Marktdesign. Eine Indikation liefert der Preis für Baseload-Futures in Deutschland. Im Juli 2019 liegt dieser für die Jahre 2020 bis 2023 um 50 Euro pro MWh; vgl. Daten auf der Webseite der Strombörse European Energy Exchange (online verfügbar). Das heißt, Marktteilnehmer rechnen mit einem Preis in dieser Größenordnung. Andererseits wurden in den letzten Jahren auch Preise im Bereich von unter 30 Euro pro MWh beobachtet. In diesem Sinne ist die Spanne von 20 bis 80 Euro pro MWh konservativ, weil sie höhere Preise und somit höhere Erlöse für Kraftwerksbetreiber einschließt.

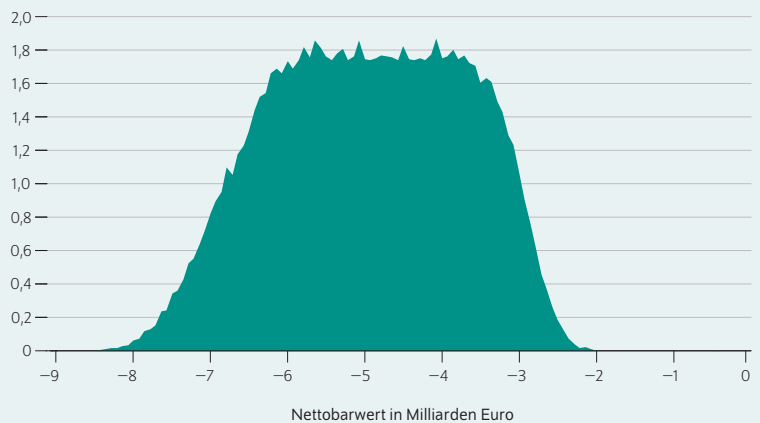
²⁷ Die gewichteten Kapitalkosten (WACC) sind der durchschnittliche Gesamtkapitalkostensatz eines Unternehmens. Der WACC berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der Eigen- und Fremdkapitalkostensätze, gewichtet nach den jeweiligen Anteilen von Eigen- und Fremdkapital am Gesamtkapital.

²⁸ Vgl. Nadira Barkatullah und Ali Ahmad (2017): Current Status and Emerging Trends in Financing Nuclear Power Projects. Energy Strategy Reviews 18, 127–140 (online verfügbar).

Abbildung 2

Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für den Nettobarwert einer Investition in ein exemplarisches Atomkraftwerk mit 1000 MW elektrischer Leistung

Wahrscheinlichkeitsdichte in Prozent



Quelle: Eigene Berechnungen.

© DIW Berlin 2019

Alle Kombinationen der unsicheren Variablen (Strompreis, spezifische Investitionen, Kapitalkosten) ergeben einen deutlich negativen Nettobarwert für Investitionen in Atomkraftwerke.

Externe Kosten: Atomkraft ist nicht versichert und nicht versicherbar

Weitet man die Perspektive auf eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung aus, so wird ersichtlich, dass über die hohen privatwirtschaftlichen Kosten hinaus hohe externe Kosten und Risiken entlang der Wertschöpfungskette vorliegen. Dies betrifft Strahlen-Emissionen bei Uranbergbau, mögliche Strahlen-Emissionen beim Betrieb, den langwierigen und technisch anspruchsvollen Rückbau, die ungeklärte Frage der langfristigen Lagerung von Atomabfällen sowie das Risiko der Proliferation (Kasten 2). Ein großer Teil dieser Kosten wird von der Allgemeinheit getragen. Zuletzt wird dies dadurch deutlich, dass Betreiber von AKWs nicht gegen die Risiken von Unfällen versichert sind. Weltweit gibt es keine Organisation, welche die Finanzdienstleistung einer Versicherung anbietet.²⁹

In den USA begrenzt das Price-Anderson-Gesetz die Haftung der US-Atomindustrie im Falle eines Unfalls auf 9,1 Milliarden US-Dollar. Dies sind weniger als zwei Prozent der bis zu 560 Milliarden US-Dollar, die einen schwere Atomkatastrophe an Schaden anrichten könnte.³⁰ Die restlichen 98 Prozent der Kosten müssten von der Allgemeinheit getragen werden. Das Price-Anderson-Gesetz diene als Blaupause

²⁹ Vgl. Jochen Diekmann (2011): Verstärkte Haftung und Deckungsvorsorge für Schäden nuklearer Unfälle – Notwendige Schritte zur Internalisierung externer Effekte. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 34 (2), 111–132.

³⁰ Vgl. NIRS und WISE (2005): Nuclear Power: No Solution to Climate Change. Nuclear Monitor 621/622 (online verfügbar).

für die nukleare Unfallgesetzgebung in den meisten Ländern mit Atomreaktoren sowie für internationale Konventionen. Im Falle eines Reaktorunfalls wird demnach nur der Anlagenbetreiber haftbar gemacht. Dies reduziert die Kosten für den Bau eines Reaktors, da somit alle Lieferanten für fehlerhafte Anlagenteile, die möglicherweise später zur Unfallursache erklärt würden, vom möglichen Risiko entlastet werden.³¹

Eine Studie des Versicherungsforums Leipzig hat die potenziellen Prämien für eine adäquate Unfallversicherung für AKW-Betreiber ermittelt.³² Diese lägen zwischen vier und 67 Euro je Kilowattstunde (kWh). Zum Vergleich: Der aktuelle Endkundenpreis für Strom liegt bei ungefähr 0,30 Euro pro kWh, also um den Faktor zehn bis 200 niedriger.

Keine Perspektiven durch „neue“ Technikkonzepte

Atomkraftbefürworter verweisen gerne auf laufende technologische Entwicklungen, die in Zukunft zu einer Wirtschaftlichkeit von Atomkraft führen könnten. Hierzu zählen insbesondere sogenannte AKWs der vierten Generation sowie Mini-AKW (small modular reactors, SMRs). Diese Konzepte sind keineswegs neu sondern gehen beide auf die Frühphase der Atomkraft in den 1950er Jahren zurück.³³ Damals wie heute gibt es keine Perspektiven für eine wirtschaftliche Durchsetzung dieser Technologien.

Reaktoren der vierten Generation sind überwiegend sogenannte Schnelle Brüter, welche zwar eine stärkere Ausnutzung des Kernbrennstoffs ermöglichen, sich jedoch bis heute als technisch schwer kontrollierbar und ökonomisch unrentabel erweisen.³⁴ Die Mehrzahl der größeren Schnellen Brüter, die in den 1970er Jahren entwickelt wurden, ist bereits abgeschaltet.³⁵ Darüber hinaus fördert dieser Reaktortyp die Proliferation von hochangereichertem, waffenfähigem Uran bzw. Plutonium im Kontext der Wiederaufarbeitung von Brennstoffen. Dies macht das Material unmittelbar für militärische Zwecke zugänglich.³⁶ Auch von anderen Typen der vierten Generation sind keine technologischen bzw. ökonomischen Durchbrüche zu erwarten.³⁷

³¹ Vgl. Tomas Kaberger (2019): Economic Management of Future Nuclear Accidents. In: Reinhard Haas, Lutz Mez und Amela Ajanovic (Hrsg.): The Technological and Economic Future of Nuclear Power. Wiesbaden, 211 – 220 (online verfügbar).

³² Vgl. Versicherungsforum Leipzig (2011): Berechnung einer risikoadäquaten Versicherungsprämie zur Deckung der Haftpflichtrisiken, die aus dem Betrieb von Kernkraftwerken resultieren. Eine Studie im Auftrag des Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE). Leipzig (online verfügbar).

³³ Vgl. Weinberg (1959), a. a. O.

³⁴ Vgl. Amory B. Lovins (1973): The Case against the Fast Breeder Reactor: An Anti-Nuclear Establishment View. Bulletin of the Atomic Scientists 29 (3), 29–35 (online verfügbar); Thomas B. Cochran et al. (2010): It's Time to Give Up on Breeder Reactors. Bulletin of the Atomic Scientists 66 (3), 50–56 (online verfügbar).

³⁵ Hierzu zählen z. B. Superphénix in Frankreich oder Monju in Japan. Das deutsche Projekt „Schneller Brüter“ Kalkar, welches nie zur Ausführung kam, konnte immerhin in einen Vergnügungspark konvertiert werden, dem Wunderland Kalkar (online verfügbar).

³⁶ Lovins et al. (1980), a. a. O.

³⁷ Vgl. M.V. Ramana (2016): The checkered operational history of high-temperature gas-cooled reactors. Bulletin of the Atomic Scientists 72 (3), 171–179 (online verfügbar); Benjamin K. Sovacool und M.V. Ramana (2015): Back to the Future: Small Modular Reactors, Nuclear Fantasies, and Symbolic Convergence. Science, Technology, & Human Values 40 (1), 96–125 (online verfügbar).

Kasten 1

Rückgang der Atomkraft in Deutschland, Europa und den USA

In Deutschland stießen Forderungen nach Laufzeitverlängerung bestehender AKWs zuletzt auf Ablehnung der Betreiberfirmen.¹ Die Netzentkopplung der verbleibenden sieben deutschen AKWs (9,5 Gigawatt Leistung) erfolgt nach aktueller Planung wie vorgesehen. Das AKW Philippsburg geht Ende 2019 vom Netz, die Blöcke in Brokdorf, Gundremmingen-C und Grohnde Ende 2021 und Isar-2, Emsland und Neckarwestheim-2 im Jahr 2022 (Abbildung 1).

Auch auf europäischer Ebene sollten nach wirtschaftlichem Ermessen weder Neubauten von Atomkraftwerken noch Laufzeitverlängerungen erfolgen. Auch sind durch den Verzicht auf Atomkraft keine Einschränkungen der Versorgungssicherheit zu erwarten.² Die installierte Leistung würde in der EU ohne Laufzeitverlängerungen und bei Berücksichtigung der technischen Lebensdauer von 40 Jahren deutlich zurückgehen (Abbildung 2).³ Bereits bis 2025 würde sie um die Hälfte auf 54 Gigawatt (GW) sinken. Zehn Jahre später wären dann nur rund 14 GW im europäischen Netz. Die restlichen AKW-Betreiber wären hauptsächlich im Osten Europas angesiedelt, in Tschechien, Rumänien und der Slowakei. Diese Reaktoren sind technisch auf 30 Jahre ausgelegt und teilweise ohne Sicherheitsbehälter gebaut.⁴

Auch in den USA, mit knapp 100 Reaktoren der größte Atomstromproduzent weltweit, hat die Atomkraft niemals private Investoren in einem wettbewerblichen Umfeld anziehen können.⁵ Viele Reaktoren unterliegen einer Kostenzuschlagsregulierung (sogenannte Cost-Plus-Regulierung), welche den Betreibern eine auskömmliche Rendite garantiert. Die Kosten hierfür werden auf den Strompreis umgelegt. Wie in Europa ist inzwischen nicht nur die Investition, sondern auch der Betrieb von AKWs in vielen Fällen verlustbringend. Bereits heute

¹ Vgl. Jacob Schlandt (2019): Die Nutzung der Kernenergie hat sich erledigt. Der Tagesspiegel online, Ausgabe vom 5. Juni 2019 (online verfügbar).

² Vgl. Claudia Kemfert et al. (2015): Europäische Klimaschutzziele sind auch ohne Atomkraft erreichbar. DIW Wochenbericht Nr. 45, 1063–1070 (online verfügbar).

³ Für AKWs, die nach 1978 ans Netz gingen und somit jetzt schon über 40 Jahre alt sind, wurden die aktuellen Abschaltzeiten berücksichtigt. Belgien: Doel-3 im Jahr 2022, Tihange-2 im Jahr 2023, Doel-1/2/4 und Tihange-1/3 im Jahr 2025. Niederlande: Borssele im Jahr 2033. Schweden: Ringhals-2 im Jahr 2019, Ringhals-1 im Jahr 2020. Vereinigtes Königreich: Hinkley-Point B-2, Hunterston B-1, Hunterston B-2 und Hinkley-Point B-1 im Jahr 2023, Hartlepool A-1/2, Heysham A-1/2 im Jahr 2024, Dungeness B-1/2 im Jahr 2028, Torness-1/2, Heysham B-1/2 im Jahr 2030, Sizewell B im Jahr 2035. Finnland: Loviisa im Jahr 2021. Deutschland: bis 2022.

⁴ Vgl. Thomas Halverson (1993): Ticking Time Bombs: East Bloc Reactors. Bulletin of the Atomic Scientists 49 (6), 43–48 (online verfügbar).

⁵ Vgl. Ben Wealer et al. (2017): Nuclear Energy Policy in the United States: Between Rocks and Hard Places. IAEA Energy Forum Second Quarter 2017, 25–29.

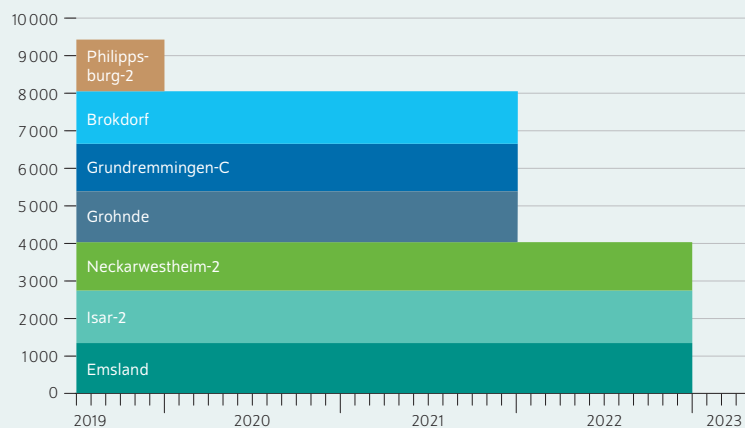
sind laut einer Studie des MIT 35 Atomkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 58 GW unrentabel.⁶ Dies führt landesweit zu Abschaltplänen. Zwischen 2013 und 2018 wurden sieben AKWs (5,3 GW Kapazität) vom Netz genommen. Weitere Pläne zur Außerbetriebnahme belaufen sich auf neun Reaktoren mit 8,7 GW an Leistung. Zugleich ist in den USA auch eine Welle an Forderungen nach Subventionen entstanden, die u. a. in den Staaten New York und Illinois bereits erfolgreich war. Im Mittelpunkt steht dabei das Instrument von *Zero Emission Credits* (ZECs). So zog der vormalige Atomriese Exelon, nach Einführung der ZECs in New York und Illinois, angekündigte Außerbetriebnahmen zurück (Kraftwerke Clinton, Quad Cities, Ginna).⁷

⁶ Hiervon befinden sich 14 GW in deregulierten Strommärkten und 44 GW in regulierten Märkten; vgl. Geoffrey Haratyk (2017): *Early Nuclear Retirements in Deregulated U.S. Markets: Causes, Implications and Policy Options*. Energy Policy 110, 150–166 (online verfügbar).

⁷ Vgl. Schneider et al (2018), a. a. O., S. 100.

Abbildung 1

Gesamte installierte Leistung der deutschen Atomkraftwerke bis 2022 In Megawatt



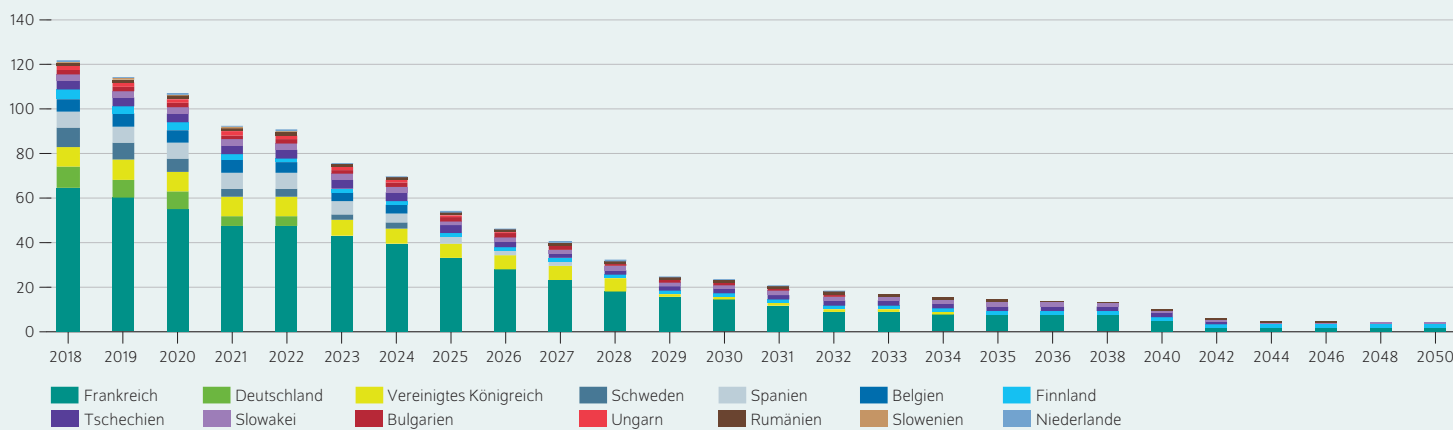
Quelle: Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes (13. AtG-Novelle). Bundesgesetzblatt Jahrgang 2011 Teil I Nr. 43 (online verfügbar).

© DIW Berlin 2019

Ab dem Jahr 2023 werden in Deutschland keine Atomkraftwerke mehr am Netz sein.

Abbildung 2

Installierte Leistung der Atomkraftwerke in der EU-28, falls alle Kraftwerke wie geplant oder nach Erreichen ihrer technischen Lebensdauer vom Netz gehen und kein Neubau stattfindet In Gigawatt



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

© DIW Berlin 2019

In der EU würden ohne Verlängerung der Laufzeit bis 2050 altersbedingt fast alle Atomkraftwerke vom Netz gehen.

Kasten 2

Atomkraft ist nicht sauber

Aufgrund der intensiven und langlebigen Radioaktivität sowie der damit verbundenen Risiken für menschliches Leben und die Natur kann Atomkraft nicht als saubere Energiequelle bezeichnet werden. Dies umfasst die gesamte Wertschöpfungskette. Bei der Gewinnung von Uranerz fallen große Mengen radioaktiver Erzfällnisse an, welche bis heute ganze Landstriche unbrauchbar machen.¹ Durch die Spaltung von Uran und Plutonium bei der Stromerzeugung entsteht radioaktive Strahlung in Form von Teilchenstrahlung mit potentieller Gefährdung für die menschliche Gesundheit. Eine Vielzahl von Studien stellt einen Zusammenhang her zwischen der Ansiedlung von Atomkraftwerken und dem Risiko von Kindern in der Umgebung, an Krebs oder Leukämie zu erkranken.²

Auch die nach dem Leistungsbetrieb verbleibende Strahlengefahr durch Kontamination von Anlagen und Gebäuden führt beim Rückbau von Atomkraftwerken zu erheblichen Risiken. Diese wurden bisher in ihrer technischen Komplexität und finanziellen Bewertung weit unterschätzt und in der energiepolitischen Diskussion weitgehend ignoriert. 70 Jahre nach Beginn der kommerziellen Nutzung von Atomkraftwerken zur Stromerzeugung sind weltweit erst 19 der 173 abgeschalteten AKWs (Stand 2018) vollständig rückgebaut. Frühe Atomkraftländer mit großen Kapazitäten wie Großbritannien, Kanada und Frankreich haben noch keinen Reaktor rückgebaut. Der Rückbau von Calder Hall, dem ersten britischen kommerziellen AKW, das bereits 1953 in Betrieb genommen wurde, reicht weit in das 21. Jahrhundert hinein. Der Rückbau

des französischen AKWs, Chinon-A soll bis 2056 andauern, mehr als ein Jahrhundert nach Baubeginn.³

Ebenso wurde die Herausforderungen der langfristigen Lagerung atomarer Abfälle bisher weitgehend vernachlässigt, sodass bis heute kein langfristiges Lager für hochradioaktive Abfälle in Betrieb ist. In Ländern wie Deutschland, dem Vereinigten Königreich und den USA läuft die Standortsuche bereits seit Jahrzehnten.⁴ Finnland ist das erste Land mit einer Baugenehmigung für ein langfristiges Lager, welches in den 2020er Jahren in Betrieb gehen könnte. In Deutschland wurde zwar mit dem Standortauswahlgesetz von 2016 ein neuer, umfassender Anlauf gemacht. Dieser Prozess wird jedoch – sollte er erfolgreich ausgehen – noch viele Jahrzehnte in Anspruch nehmen. Bis dahin stellt die Zwischenlagerung hoch radioaktiver Abfälle ein hohes Risiko an einer großen Anzahl von Orten dar.

Obwohl schwere Reaktorunfälle selten sind, sind ihre Folgen katastrophal. So ermittelten WissenschaftlerInnen der Max-Planck-Gesellschaft ein Jahr nach der Fukushima-Katastrophe, dass ähnliche Unfälle alle zehn bis 20 Jahre passieren könnten, 200 Mal häufiger als bisher angenommen.⁵ Beinahe-Unfälle bzw. Verbote

¹ Beispiele sind der Uranabbau in der DDR (Gebiet Aue), in Frankreich sowie in Niger, wo das französische Staatsunternehmen Orano seit 40 Jahren Uran abbaut, vgl. Gabrielle Hecht (2017): *Being Nuclear: Africans and the Global Uranium Trade*. Cambridge, London.

² Vgl. Peter Kaatsch et al. (2007): *Epidemiologische Studie zu Kinderkrebs in der Umgebung von Kernkraftwerken (KiKK-Studie)*. Mainz, Salzgeber (online verfügbar).

³ Vgl. Schneider et al. (2018), a. a. O. In Deutschland werden bei den zwei größeren und weitgehend rückgebauten AKWs Gundremmingen-A und Würgassen noch Gebäude für die Zwischenlagerung oder die Verpackung von Atommüll genutzt. Somit können diese Gebäude noch nicht aus dem Atomrecht entlassen werden. Vgl. Ben Wealer, Jan Paul Seidel und Christian von Hirschhausen (2019): *Decommissioning of Nuclear Power Plants and Storage of Nuclear Waste: Experiences from Germany, France, and the UK*. In: Reinhard Haas, Lutz Mez und Amela Ajanovic (Hrsg.): *The Technological and Economic Future of Nuclear Power*. Wiesbaden, 261–286 (online verfügbar).

⁴ Vgl. Achim Brunnengräber und Mirands Schreurs (2015): *Nuclear Energy and Nuclear Waste Governance Perspectives after the Fukushima Nuclear Disaster*. In: Achim Brunnengräber et al. (Hrsg.): *Nuclear Waste Governance. An International Comparison*. Wiesbaden; sowie Maria Rosaria Di Nucci et al. (2018): *The Technical, Political and Socio-Economic Challenges of Governing Nuclear Waste*. In: Achim Brunnengräber et al. (Hrsg.): *Challenges of Nuclear Waste Governance. An International Comparison Volume II*. Wiesbaden.

⁵ Vgl. J. Lelieveld, D. Kunkel, M.G. Lawrence (2012): *Global Risk of Radioactive Fallout after Major Nuclear Reactor Accidents*. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12 (9). 4245–4258 (online verfügbar).

Die SMRs („AKWs für den Vorgarten“) gehen auf Entwicklungen der 1950er Jahre zurück, insbesondere den Versuch, die Atomkraft als Antriebstechnologie für Militär-U-Boote nutzbar zu machen. Jedoch sind auch neuere Ansätze zur Entwicklung von SMRs nicht als Ersatz für größere Anlagen geeignet. Zum einen stellen sich, wie bei allen AKWs, bis heute ungelöste Fragen der Sicherheit. Da die Standardisierung von Reaktoren ein Schlüsselparаметer bei der Herstellung von SMR ist, müssten zum anderen weltweit Vorschriften harmonisiert werden, was kurz- und mittelfristig schwierig oder gar unmöglich ist.³⁸

³⁸ Vgl. Tristano Sainati, Giorgio Locatelli und Naomi Brookes (2015): *Small Modular Reactors: Licensing Constraints and the Way Forward*. *Energy* 82, 1092–1095 (online verfügbar).

Schlussfolgerungen

Die am DIW Berlin erarbeiteten wirtschaftshistorischen und betriebswirtschaftlichen Analysen zeigen, dass Atomkraft in der Vergangenheit privatwirtschaftlich unrentabel war, es in der Gegenwart ist und auch zukünftig sein wird.

Zwischen 1951 und 2017 wurden 674 Atomreaktoren gebaut, jedoch keiner unter wettbewerblichen Bedingungen. In den Fällen, in denen privates Kapital in die Atomwirtschaft floss, wurde es durch hohe Subventionen angereizt. Eine Wende von der Militär-Atomwirtschaft der Nachkriegszeit in eine kommerzielle Nutzung erfolgte nicht, sodass der Boom staatlich finanzierter AKWs bereits in den 1960er Jahren zum Erliegen kam. Die betriebswirtschaftliche Investitionsrechnung bestätigt den Befund: Eine Investition in einen neuen, exemplarischen AKW

von möglichen Kernschmelzen sind wesentlich häufiger als von der Atomwirtschaft behauptet.⁶ Besonders gefährdet sind hierbei ältere Reaktoren. Weltweit wird die Verlängerung der Laufzeit alter Reaktoren von 40 auf 50 oder bis zu 80 Jahre diskutiert.⁷ Da Atomkraftwerke auf eine Laufzeit von 30 oder 40 Jahren ausgelegt sind, führt dies zu erheblicher Materialbelastung und -ermüdung und erhöht somit die Unfallgefahr erheblich.⁸ Als Beispiele können die Problemreaktoren in Tihange (Belgien) und Fessenheim (Frankreich) dienen, beide in direkter Grenznähe zu Deutschland. Auch das AKW Dukovany in der Slowakei, 100 Kilometer nördlich von Wien gelegen, erregt Besorgnis: Zum einen ist es wie viele frühere Sowjet-Reaktoren ohne Sicherheitsbehälter gebaut worden und somit besonders risikoreich.⁹ Zum anderen erhöht sich das Unfallrisiko durch die unbegrenzte Laufzeitverlängerung von Block 1, der ursprünglich 2025 nach vierzigjähriger Laufzeit abgeschaltet werden sollte.

Ein weiteres, wichtiges Risiko im Kontext der Atomkraft ist die Proliferation, also die Verbreitung von Atomwaffen. Der Acheson-Lilienthal Report konstatierte bereits 1946, dass die Wertschöpfungsketten der Entwicklungen der Atomenergie für friedliche Zwecke und für Atomwaffen zum Großteil austauschbar und

voneinander abhängig sind.¹⁰ In der letzten Jahren finden Studien wieder zu dieser Erkenntnis zurück.¹¹ Die Erzeugung von Strom durch Atomkraft ist die wichtigste Triebkraft für die Proliferation bzw. Verbreitung von Atomwaffen und radioaktivem Material.¹² Einige Länder wie Indien, Pakistan, Nordkorea aber auch Israel haben sich unter dem Vorwand des „zivilen“ Einsatzes von Atomkraft Atomwaffen beschafft.¹³ Wenn eine nukleare Infrastruktur vorhanden ist und das Material für Waffen in Anreicherungs- oder Wiederaufbereitungsanlagen, in Militärreaktoren, sogenannten *Dual-Use*-Reaktoren, oder Schnellen Brütern produziert wird, ist es nur eine Frage des politischen Willens bis zur Entscheidung zum Bau von Atomwaffen.

Zuletzt handelt es sich bei Atomkraft unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus (Bau, Betrieb, Rückbau der Anlage, Uranabbau, Brennelemente Herstellung) mitnichten um eine CO₂-freie Technologie. Eine Metastudie ermittelt einen Mittelwert für die Treibhausgas-Emissionen von Atomkraftwerken von 66 Gramm CO₂-Äquivalenten pro kWh. Dies entspricht etwa 20 Prozent der Emissionen eines Gaskraftwerks.¹⁴

⁶ Die Atomregulierungsbehörde NRC in den USA dokumentiert für den Zeitraum 2006–2016 61 Ereignisse und 102 Zustände, die einen möglichen Zusammenbruch des Systems hervorrufen und so zu einer Kernschmelze hätte führen können. Unabhängige ExpertInnen kommen jedoch zu einer anderen Analyse. So hat die NRC nicht nur die drei riskantesten Beinahe-Unfälle des letzten Jahrzehnts nicht registriert, sondern auch weitere 100 Beinahe-Unfälle. Vgl. Jim Riccio (2016): *Nuclear Near Misses: A Decade of Accident Precursors at U.S. Nuclear Plants*. Washington DC (online verfügbar).

⁷ Vgl. Steve Clemmer et al. (2018): *The Nuclear Power Dilemma. Declining Profits, Plant Closures, and the Threat of Rising Carbon Emissions*. Report commissioned by Union of Concerned Scientists. Cambridge, USA (online verfügbar); Jan Haverkamp (Hrsg.) (2014): *Lifetime extension of ageing nuclear power plants: Entering a new era of risk*. Report commissioned by Greenpeace (online verfügbar).

⁸ Vgl. Haverkamp (2014), a. a. O., S. 10.

⁹ Als Sicherheitsbehälter oder auch Containment wird die gasdichte Umhüllung um einen Kernreaktor und, abhängig von der Reaktortechnik, dessen Kreislauf- und Nebenanlagen bezeichnet. Ziel ist es, dass nach einem Störfall keine radioaktiven Stoffe in die Umgebung entweichen können.

¹⁰ Vgl. Chester I. Barnard et al. (1946): *A Report on the International Control of Atomic Energy*. Washington DC. (online verfügbar).

¹¹ Vgl. Andy Stirling und Phil Johnstone (2018): *A Global Picture of Industrial Interdependencies Between Civil and Military Nuclear Infrastructures*. SPRU Working Paper Series SWPS-2018-13 (online verfügbar).

¹² Amory B. Lovins, L. Hunter Lovins und Leonard Ross (1980): *Nuclear Power and Nuclear Bombs*. *Foreign Affairs* 58 (5), 1137–1177 (online verfügbar).

¹³ Lutz Mez (2012): *Nuclear Energy—Any Solution for Sustainability and Climate Protection?* *Energy Policy* 48, 56–63 (online verfügbar).

¹⁴ Benjamin K. Sovacool (2008): *Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey*. *Energy Policy* 36 (2008). 2950–2963 (online verfügbar).

mit 1000 MW elektrischer Leistung führt durchschnittlich zu Verlusten knapp fünf Milliarden Euro. Neben fehlender Wirtschaftlichkeit liegen hohe Risiken in Bezug auf die Proliferation waffenfähigen Materials und die Freisetzung von Strahlung vor, wie die Unfälle in Harrisburg (1977), Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011) zeigen. Atomkraft stellt daher keine relevante Option für eine wirtschaftliche, klimafreundliche und nachhaltige Energieversorgung dar.

Die Energie-, Klima- und Industriepolitik sollte daher auf einen raschen Ausstieg aus der Atomkraft hinwirken. Von Subventionen oder besonderen Tarifierungen für Laufzeitverlängerungen ist abzuraten, weil sie das risikobehaftete und unwirtschaftliche System fortschreiben. Dies gilt natürlich umso stärker für Neubauten. Die Budgets für Forschung an neuen Reaktortypen sollten gestrichen werden.

Das Narrativ „Atomkraft für Klimaschutz“ ist alt, aber heute genauso unzutreffend wie in den 1970er Jahren. Die Beschreibung von Atomkraft als „saubere“ Energie ignoriert die erheblichen Umweltrisiken und nicht zu vernachlässigenden Emissionen über die Prozesskette hinweg. Die deutsche Bundesregierung sollte in der EU und anderen Organisationen mit deutscher Beteiligung diesem Narrativ entgegenwirken.

Ben Wealer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin und Gastwissenschaftler am DIW Berlin | bwealer@diw.de

Simon Bauer ist studentischer Mitarbeiter an der TU Berlin | sb@wip.tu-berlin.de

Leonard Göke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Berlin und Gastwissenschaftler am DIW Berlin | lgoeke@diw.de

Claudia Kemfert ist Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am DIW Berlin | ckemfert@diw.de

Christian von Hirschhausen ist Forschungsdirektor am DIW Berlin | chirschhausen@diw.de

JEL: L51, L95, Q48

Keywords: nuclear power, net present value, profitability, economic history

This report is also available in an English version as DIW Weekly Report 30/2019:

www.diw.de/diw_weekly



INTERVIEW



„Atomkraft ist gefährlich, unwirtschaftlich und für Klimaschutz ungeeignet“

Prof. Dr. Christian von Hirschhausen ist Forschungsdirektor für internationale Infrastrukturpolitik und Industrieökonomie am DIW Berlin

1. **Herr von Hirschhausen, vor dem Hintergrund der Klimadiskussion werden immer wieder Stimmen laut, die Atomkraft als saubere Energie bezeichnen. Ist die Atomkraft eine CO₂-freie Technologie, die helfen könnte, den Ausstoß von Klimagasen zu senken?** Die Atomkraft ist eindeutig keine saubere Energie, sondern die schmutzigste aller verfügbaren Energiequellen. Sie emittiert lebensgefährliche radioaktive Strahlen, sie führt zu erheblichen gesundheitlichen Problemen, sie führt zu Problemen beim Betrieb, beim Rückbau und bei der langfristigen Lagerung. Die Idee, mit der Atomkraft den Klimawandel bekämpfen zu können ist zwar eine alte Idee, sie ist jedoch falsch und irreführend.
2. **Sind die Risiken der Atomkraft also größer als die Klimavorteile?** Die Atomkraft hat keine Klimavorteile. Zum einen emittiert sie entlang des Lebenszyklus ca. 70 Gramm CO₂ je Kilowattstunde, das sind ungefähr 20 Prozent eines Gaskraftwerks. Zum anderen erhält aber der atomare Komplex auch den fossilen Komplex, weil die Betreiber von Atomkraftwerken oftmals gleichzeitig Kohle und Gaskraftwerke betreiben. Deshalb führt die Förderung der Atomkraft zu mehr Klimawandel und nicht zu weniger.
3. **Wie sieht es bei der Kosteneffizienz und der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit der Atomkraft aus?** Es gibt in der Energiewirtschaft einen seltenen Konsens, dass Atomkraft niemals wettbewerbsfähig gewesen ist, es zurzeit nicht ist und, wie wir zeigen, auch nicht werden wird. Zum anderen ist das Ziel der Entwicklung der Atomkraft niemals gewesen, Strom zu produzieren. Sie war ein Koprodukt militärischer Entwicklungen, das allerdings nie den Weg in die Wettbewerbsfähigkeit geschafft hat. Unter den gegenwärtigen und den absehbaren CO₂-Preisen ist Atomkraft selbst mit fossilen Energieträgern nicht wettbewerbsfähig. Atomkraft ist ungefähr um über das Doppelte teurer als Kohlekraft.
4. **Inwieweit erhöht sich die Rentabilität von Atomkraftwerken durch Laufzeitverlängerungen?** Laufzeitverlängerungen sind keine Option. Zum einen sind sie teuer. Man spricht von

25 bis 50 Euro pro Kilowattstunde, also teilweise mehr als der gegenwärtige Großhandelspreis. Zum anderen sind sie gefährlich, weil Atomkraftwerke in der Regel auf 40 Jahre ausgelegt sind. Das Material ermüdet, es kommt zu Mikrorissen und die Gefahr steigt. Wir haben bereits jenseits unserer Grenzen wenig Abstand zu alten Meilern, die hochriskant sind.

5. **Wie teuer müsste Atomstrom sein, um wirklich kostenträgend zu sein?** Unsere Modellrechnungen zeigen, dass wir, je nach Rahmenbedingungen, Strompreise von 120 bis 150 Euro pro Megawattstunde bräuchten. Das liegt um das drei- bis vierfache über den aktuellen Strompreisen.
6. **Wie steht es um die Rentabilität von neuen Atomkraft-Technologien?** Man spricht heutzutage gerne und viel von neuen Technologien. Bei genauerem Hinsehen stellt man fest, dass dies überwiegend Konzepte aus den 1950er Jahren sind. Zum Beispiel wurde der „Schnelle Brüter“ in den fünfziger Jahren gefeiert, in den siebziger Jahren ans Netz genommen und in den neunziger Jahren abgeschaltet. Auch die Mini-Atomkraftwerke gehen auf Konzepte der Fünfzigerjahre zurück. Sie haben keine technologische und schon gar keine ökonomische Perspektive.
7. **In Deutschland soll 2022 das letzte Atomkraftwerk vom Netz gehen. Wie sollte sich die Politik gegenüber den Atomkraftbefürwortern verhalten?** Zum einen muss klar sein, dass Atomkraft nicht sauber ist, sondern schmutzig. Zum zweiten sollte die Subventionierung von Atomkraft unterbleiben. Zum dritten sollte sich insbesondere die deutsche Bundesregierung in den internationalen Gremien gegen die Verharmlosung der Risiken der Atomkraft aussprechen. Aus der Atomkraft kann man nicht aussteigen, die Risiken bleiben für Jahrmillionen bestehen. Das ist wie in dem Song „Hotel California“: „You can check out any time you like, but you can never leave.“

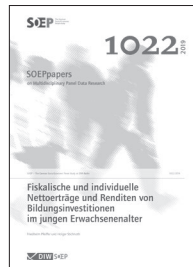
Das Gespräch führte Erich Wittenberg.



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

SOEP Papers Nr. 1022

2019 | Friedhelm Pfeiffer, Holger Stichnoth



Fiskalische und individuelle Nettoerträge und Renditen von Bildungsinvestitionen im jungen Erwachsenenalter

In dieser Studie werden auf der Basis einer Weiterentwicklung des ZEW Mikrosimulationsmodells des Abgaben- Steuer- und Transfersystems fiskalische und individuelle Nettoerträge und Renditen von Bildungsinvestitionen für junge Erwachsene bezogen auf das Jahr 2016 untersucht und mit früheren Schätzungen bezogen auf das Jahr 2012 verglichen. Nach den Ergebnissen liegt die fiskalische Bildungsrendite pro Auszubildenden bei einer Ausbildungsdauer von vier Jahren und über das Erwerbsleben hinweg bei 20,6 %, im Vergleich zu einer Person ohne Berufsausbildung. Im Falle von

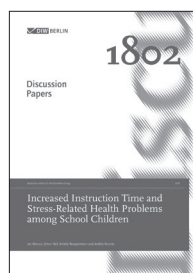
Personen mit einem Schul- und Hochschulabschluss, erworben im Alter zwischen 17 und 25 Jahren und betrachtet bis zum Alter von 66 Jahren, beträgt die fiskalische Rendite 10,2 %, ebenfalls im Vergleich zu einer Person ohne Berufsausbildung. Während die individuellen Bildungsrenditen aus dem Bruttoeinkommen im Mittel bei über 10 % liegen, schrumpfen sie nach Abzug von Steuern und Sozialabgaben sowie aufgrund des Transferentzugs auf etwa 6 %. Dies verdeutlicht empirisch das Ausmaß signifikanter Interdependenzen zwischen Bildungs-, Steuer- und Sozialpolitik. Im Vergleich zu 2012 sind die fiskalischen Renditen für die Ausbildung etwas gestiegen und für die Kombination Schule/Studium etwas gefallen.

www.diw.de/publikationen/soeppapers



Discussion Papers Nr. 1802

2019 | Jan Marcus, Simon Reif, Amelie Wuppermann, Amélie Rouche



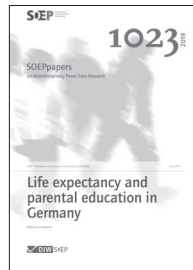
Increased Instruction Time and Stress-Related Health Problems among School Children

While several studies suggest that stress-related mental health problems among school children are related to specific elements of schooling, empirical evidence on this causal relationship is scarce. We examine a German schooling reform that increased weekly instruction time and study its effects on stress-related outpatient diagnoses from the universe of health claims data of the German Social Health Insurance. Exploiting the differential timing in the reform implementation across states, we show that the reform slightly increased stress-related health problems among school children. While increasing instruction time might increase student performance, it might have adverse effects in terms of additional stress.

www.diw.de/publikationen/diskussionspapiere



SOEP Papers Nr. 1023
2019 | Mathias Huebener



Life Expectancy and Parental Education in Germany

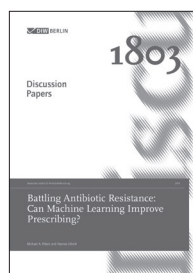
This study analyses the relationship between life expectancy and parental education. Based on data from the German Socio-Economic Panel Study and survival analysis models, we show that maternal education is related to children's life expectancy – even after controlling for children's own level of education. This applies equally to daughters and sons as well as to children's further life expectancies examined at age 35 to age 65. This pattern is more pronounced for younger cohorts. In most cases, the education of the father is not significantly related to children's life expectancy. Neither the vocational training nor the occupational position of the parents in childhood, which both correlate with household

income, can explain the connection. The health behaviour of the children and the health accumulated over the life course appear as important channels. This study extends the previous literature that focused mostly on the relationship between individuals' own education and their life expectancy. It implies that the link between education and life expectancy is substantially stronger and that returns to education are higher if the intergenerational component is considered.

www.diw.de/publikationen/soeppapers



Discussion Papers Nr. 1803
2019 | Michael A. Ribers, Hannes Ullrich



Battling Antibiotic Resistance: Can Machine Learning Improve Prescribing?

Antibiotic resistance constitutes a major health threat. Predicting bacterial causes of infections is key to reducing antibiotic misuse, a leading cause of antibiotic resistance. We combine administrative and microbiological laboratory data from Denmark to train a machine learning algorithm predicting bacterial causes of urinary tract infections. Based on predictions, we develop policies to improve prescribing in primary care, highlighting the relevance of physician expertise and time-variant patient distributions for policy implementation. The proposed policies delay prescriptions for some patients until test

results are known and give them instantly to others. We find that machine learning can reduce antibiotic use by 7.42 percent without reducing the number of treated bacterial infections. As Denmark is one of the most conservative countries in terms of antibiotic use, targeting a 30 percent reduction in prescribing by 2020, this result is likely to be a lower bound of what can be achieved elsewhere.

www.diw.de/publikationen/diskussionspapiere





Claudia Kemfert ist Leiterin der Abteilung Energie, Verkehr, Umwelt am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin).



Alexander Kritikos ist Forschungsdirektor am Deutschen Institut für Wirtschaftsforschung (DIW Berlin).

CLAUDIA KEMFERT UND ALEXANDER KRITIKOS

Griechenland: mit sauberer Energie aus der Krise

Der Kommentar gibt die Meinung der Autorin und des Autors wieder.

Seit der Finanzkrise hat kein anderes EU-Land so wenig in eine nachhaltige Energieversorgungsstruktur investiert wie das finanziell angeschlagene Griechenland. Entsprechend unsicher ist die Energieversorgung im Land und bedroht zusätzlich die Wettbewerbsfähigkeit der von der Krise ohnehin gebeutelten griechischen Unternehmen, die mehr für Energie zahlen als ihre EU-Konkurrenten. Griechenland steht daher vor grundsätzlichen Entscheidungen in Bezug auf seine Energiepolitik, insbesondere, inwieweit das Land weiterhin auf fossile oder stärker auf regenerative Energiequellen setzen will.

Griechenland könnte im Bereich der Erneuerbaren viel bewegen. Ressourcen, wie Meer, Wind und Sonne stehen dem krisengeschüttelten Land quasi unbegrenzt zur Verfügung. Es ist Verschwendung, diese nicht mehr zu nutzen als bisher. Über Investitionen in Wasser-, oder Wellenkraftwerke, Solar- und Windparks ist es möglich, die heimische Energieversorgung zum großen Teil sicherzustellen und Überschüsse in die Nachbarländer zu exportieren.

Doch Griechenland plant auch für die Zukunft die Verbrennung von Kohle. Auf den Inseln wird Strom aus klimaschädlichem Diesel gewonnen, der teuer importiert und mit 500 bis 700 Millionen Euro pro Jahr subventioniert wird.

Im Jahr 2010 gab es einen vielversprechenderen Anfang. Dank eines Energiewende-Gesetzes deckte Solarstrom im Jahr 2013 bereits über sechs Prozent des griechischen Strombedarfs, im Bereich Erneuerbaren entstanden 20 000 neue Jobs. Zu der Zeit sprach man in Brüssel und Athen vom vielversprechenden Projekt „Helios“, bei dem Griechenland ab 2015 erneuerbaren Strom bis nach Deutschland liefern sollte. Doch die garantierten Einspeisevergütungen waren zu hoch und fielen der Schuldenkrise zum Opfer. Investitionen in erneuerbare Energien brachen ein, zahlreiche Jobs gingen verloren, Unternehmen haben sich aus Griechenland zurückgezogen. Zwar wurde der Markt für Erneuerbare nach 2015 durch gezielte Programme wieder etwas stabilisiert, er bleibt aber hinter den Möglichkeiten. Bis heute entstammen rund 84 Prozent der Energieproduktion aus fossilen Quellen, Öl wird in großem Umfang importiert.

Die EU als Ganze hat sich aber zum Ziel gesetzt, im Rahmen der Energieunion weniger abhängig von Energieimporten zu werden. Gerade in Griechenland mit seinen großen Potentialen ist das möglich. Dazu braucht es eine stärkere Diversifizierung der Energieträger, vor allem einen Ausbau der erneuerbaren Energien, sowie eine effizientere Nutzung der erzeugten Energie.

Ein Beispiel: Die Inseln können dezentral mit privaten Investitionen insbesondere den Ausbau von Solar- und Windenergie fortführen und durch die Entrichtung angemessener Einspeisevergütungen einen Großteil ihrer eigenen Energieversorgung sicherstellen. Über die Errichtung von immer billiger werden den Energiespeicher ließe sich die Versorgung sicherstellen. Genau für die Planung und Durchführung solcher dezentraler Investitionen benötigen die griechischen Kommunen Beratung und Unterstützung durch die EU.

Mit einer solchen Strategie ließen sich die fossilen Energieimporte in Griechenland weiter senken. Der Ausbau erneuerbarer Energien eröffnet gleichzeitig wirtschaftliche Chancen: Entsprechende Investitionen schaffen neue Arbeitsplätze, schließlich gibt es auch griechische Produzenten in diesem Bereich, und erhöhen die Wertschöpfung. Auch die Industrie könnte günstiger mit Energie versorgt werden, zugunsten ihrer Wettbewerbsfähigkeit.

Zugegeben, die Rahmenbedingungen für Investitionen in Griechenland sind schlecht, und private Investitionen sind deshalb auch in diesem Sektor zunächst nur begrenzt zu erwarten. Die frisch gewählte Regierung muss die seit vielen Jahren diskutierten angebotsorientierten Reformen zur Steigerung privater Investitionen endlich durchführen. Aber sie muss auch ihre Energiepolitik überdenken. Die knappen staatlichen Mittel, die für den Energiebereich vorgesehen sind, wären als steuerliche Anreize für Investoren in Richtung Energiewende gut genutzt.

Dieser Beitrag ist am 20. Juli 2019 auf capital.de erschienen.