

Nuklearökonomie und Finanzierung

Kernkraftwerke gehören zu den teuersten Bauprojekten überhaupt. Dabei werden in vielen Kostenschätzungen nicht einmal alle Kosten berücksichtigt, wie Stilllegung, Endlagerung des Atommülls und Versicherung gegen schwere Unfälle. Die Hauptverkaufsargumente der Atomkonzerne – kontinuierliche anstelle von variabler Stromproduktion, niedrige CO₂-Emissionen, Regelbarkeit und Erzeugung von Wärme, die für andere Zwecke genutzt werden kann – werden allesamt von einer Vielzahl anderer, zunehmend innovativer Wettbewerber, insbesondere im Bereich der Erneuerbaren, entkräftet.

Überblick

Unter den Top Ten der „Liste der teuersten Gebäude der Welt“ sind Kernkraftwerke mit sieben Projekten prominent vertreten.¹ Die Kernenergie steht daher unter zunehmendem Wettbewerbsdruck. Dieser betrifft nicht nur die Erzeugung, sondern auch andere Elemente, die mit den Kosten und der Zuverlässigkeit der Leistung im Zusammenhang stehen. In diesen Bereich fällt die ausreichende Verfügbarkeit, die effiziente Nutzung oder die Laststeuerung, die Integration von Elektrofahrzeugen ins Netz oder die Stromspeicherung zum Ausgleich der schwankenden Leistung von Wind- und Solarenergie. Die Erfahrung zeigt, dass Photovoltaik (PV) und Energiespeicherung eine wettbewerbsfähige Serviceoption darstellen können. Außerdem werden bereits langfristige Handelsverträge über die Kombination von Solar-, Wind- und Speicheranlagen abgeschlossen.

¹ *Wikipedia*, „List of most expensive buildings“, siehe en.wikipedia.org/wiki/List_of_most_expensive_buildings. Dieser Verweis dient nur zur Veranschaulichung, erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist nicht als Billigung der Methode zu verstehen.

Die Finanzierung von Kernkraftwerken ist von der geopolitischen Lage abhängig, nicht von der Wirtschaft

Obwohl kein zuverlässiger, umfassender und globaler Überblick über Kreditdaten verfügbar ist, deuten Teildaten auf eine starke Kreditunterstützung insbesondere in Russland und China für Projekte im Ausland hin. Vorteilhafte Finanzierungsbedingungen sind der Schlüssel zum relativen Erfolg beider Länder im Kernkraftbereich. Laut einem ehemaligen Beamten der Nuklearenergie-Agentur (NEA) der OECD sind „China und Russland dabei, die Atomindustrie des Westens aus dem Geschäft zu drängen“.² Es scheint jedoch ein Trend hin zu einer an Bedeutung gewinnenden Rolle von Export-Import-Banken und verschiedenen internationalen Entwicklungsbanken bei der Finanzierung von Atomprojekten zu bestehen. Außerdem nehmen staatliche Interventionen in vielen Ländern seit einiger Zeit zu. Einigen Schätzungen zufolge befinden sich bereits etwa 45 Prozent der weltweiten Atomkraftkapazität vollständig in staatlichem Besitz.³

Aktive Reaktoren stehen unter andauerndem Wettbewerbsdruck, werden aber staatlich subventioniert

In den letzten Jahren waren aktive Reaktoren in vielen Ländern mit finanziellen Herausforderungen konfrontiert. Ungeplante Ausfälle verringerten die Leistung und alternde Reaktoren oder unerwartete Probleme trieben die Kosten für Wartung, Reparatur und Reinvestitionen stark in die Höhe, vor allem in Frankreich und Japan.

Auch den Klimawandel bekommt die Atomstromerzeugung zu spüren, z. B. in den Bereichen Kühlwasserverfügbarkeit, Kühlkapazität und Sturmereignisse. Während die Auswirkungen auf die Gesamtleistung bisher begrenzt sind, haben sich die klimabedingten Störungen der Kernenergieerzeugung in den letzten 30 Jahren verachtfacht und können für begrenzte Zeiträume erhebliche Auswirkungen auf die verfügbare Kapazität haben.

² Geoffrey Rothwell, „Projected electricity costs in international nuclear power markets“, Energy Policy, Bd. 164, . Mai 2022, S.3–5, siehe [sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421522001306?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421522001306?via%3Dihub).

³ Mycle Schneider, Antony Froggatt, et al., „World Nuclear Industry Status Report 2023“, Dezember 2023, siehe worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2023-.html.

Die Konkurrenz durch günstiges Erdgas und zunehmend auch durch Wind- und Solar-energie stellt ein ernsthaftes wirtschaftliches Risiko für die Kernenergieanbieter dar. In Finnland beispielsweise musste die Stromerzeugung des mit starker Verspätung ans Netz gegangenen Reaktors Olkiluoto-3 nur einen Monat nach Aufnahme des kommerziellen Betriebs gedrosselt werden. Gründe waren die steigende Stromproduktion aus erneuerbaren Energien und die negativen Großhandelspreise für Strom. Ähnliche Einschränkungen wurden von spanischen Reaktoren bekannt.

Die Nuklearindustrie argumentiert, dass die Schließung von Kraftwerken zu einem Anstieg der CO₂-Emissionen führen werde, und bezeichnet die Schließungen als verfrüht. Sie ruft nach hohen Subventionen zur Unterstützung des Betriebs unwirtschaftlicher Kraftwerke auf und setzt sich mit dieser Forderung immer häufiger durch. In den USA wurden auf bundesstaatlicher Ebene 19 Reaktoren mit Steuergeldern subventioniert. Diese Subventionen laufen über einen Zeitraum von fünf bis zwölf Jahren und werden bis 2030 schätzungsweise bei über 15 Milliarden US-Dollar liegen. Darüber hinaus finanziert das Civil Nuclear Credit (CNC)-Programm einen nationalen Subventionspool von sechs Milliarden US-Dollar, um die Schließung wirtschaftlich angeschlagener Reaktoren zu verhindern.

Der größte Kernkraftwerksbetreiber der Welt, der französische Energieversorger EDF, wurde 2023 vollständig verstaatlicht, da er vom Bankrott bedroht war. Die französische Regierung setzt sich auch erfolgreich für die Öffnung verschiedener EU-Finanzierungsmechanismen zur Subventionierung ihrer bestehenden Nuklearflotte ein. Die belgische Regierung hat grundsätzlich zugestimmt, das wirtschaftliche Risiko einer geplanten Laufzeitverlängerung von zwei Reaktoren um zehn Jahre über das zuvor vereinbarte Abschaltdatum von 2025 hinaus zu teilen. Zu diesem Zweck wurde ein gemeinsames Unternehmen mit dem Versorgungsunternehmen Engie-Electrabel gegründet. Um die Wiederinbetriebnahme der seit dem 11. März 2011 abgeschalteten Reaktoren zu beschleunigen, erwägt die japanische Regierung außerdem Subventionen, die den erfolgreichen Bietern für die nächsten 20 Jahre Einnahmen garantieren würden.

Wirtschaftlichkeit von Reaktorneubauten

Die von der Nuklearenergieagentur (Nuclear Energy Agency) der OECD ermittelten Investitionskostenschätzungen für Leichtwasserreaktoren (LWR) zu aktuellen Marktpreisen variieren um den Faktor 2 zwischen 2.157 und 4.250 US-Dollar pro Kilowatt. Eine unabhängige Bewertung der Technischen Universität Berlin auf der Grundlage einer Datenbank

mit den Daten von 88 Reaktoren ergab viel höhere Werte wie etwa 6.000 US-Dollar pro Kilowatt für die durchschnittlichen Overnight-Kosten (Investitionskosten zum aktuellen Datum ohne Zeitfaktor) von LWR.

Die Aussagekraft von Analysen der Overnight-Kosten für die Bewertung der Wettbewerbsfähigkeit der Kernenergie ist beschränkt: So werden Finanzierungs- und andere Kosten nicht berücksichtigt, obwohl die Finanzierung als wesentlicher Kostenfaktor gilt. Auch die Anzahl realer Fälle, die als Referenz dienen können, ist begrenzt. Zudem wird häufig angenommen, dass die n-te Umsetzung durch die Errichtung mehrerer Einheiten Lerneffekte mit sich bringt. Dabei wird jedoch die Zahl n, die zwischen fünf und einigen hundert (im Fall der sogenannten Small Modular Reactors oder SMRs) liegen kann, nicht klar definiert.

Die Produktionsmaßstäbe der Hauptkonkurrenten der Kernenergie kennen ganz andere Größenordnungen. Weltweit sind mehr als 300.000 Windturbinen installiert, wobei allein im Jahr 2022 mehr als 25.000 hinzukamen. Die Zahl der produzierten Solar-PV-Module (jedes Panel besteht aus mehreren Modulen) beläuft sich auf Hunderte Millionen pro Jahr, und Lerneffekte und Kostensenkungen sind gut dokumentiert.

NuScale, der Anbieter des fortschrittlichsten SMR-Designs in den USA, stellte Anfang November 2023 ein Projekt mit sechs Modulen ein, das für ein Gemeindekonglomerat in Utah vorgesehen gewesen war. Die geschätzten Kosten waren auf 20.000 US-Dollar pro Kilowatt geklettert, ein Wert, der weit über den realen Kosten der teuersten Großreaktoren der letzten Zeit liegt. Trotz massiver staatlicher Subventionen, die auf über vier Milliarden US-Dollar geschätzt wurden, erschienen die prognostizierten Stromkosten für die meisten in Betracht gezogenen Gemeinden zu hoch.

Kostenschätzungstrends bei Kernkraftwerken über die Lebensdauer einer Anlage

Die Bewertung der Stromgestehungskosten (LCOE) umfasst nicht nur die Overnight-Kosten, sondern auch Betriebs- und Wartungskosten, Bauzeiten, Produktivität und Abzinsungssätze⁴, um die durchschnittlichen Kosten pro produzierter Energieeinheit über

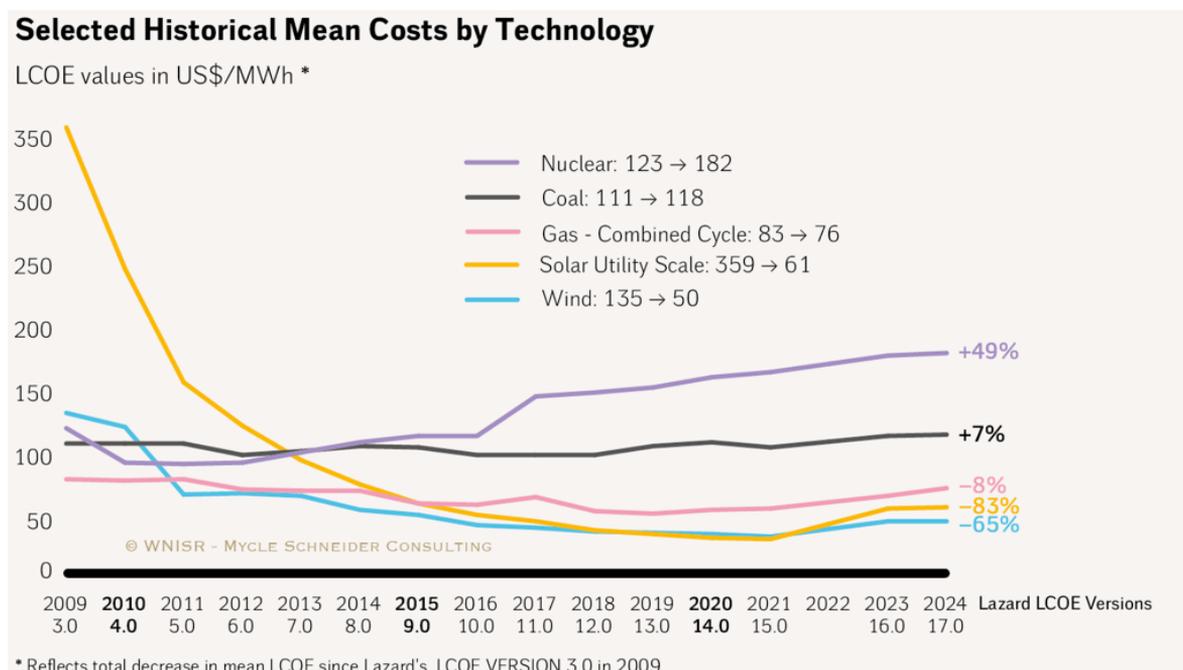
⁴ Der Diskontsatz ist die Mindestrendite, die von einer Investition unter Berücksichtigung ihres spezifischen Risikoprofils erwartet wird. Das heißt, je höher das Investitionsrisiko, desto höher der Diskontsatz.

die Lebensdauer der Anlage hinweg zu ermitteln. Bei steigenden Abzinsungssätzen wird die Kernenergie im Vergleich zu anderen energiepolitischen Optionen immer weniger wettbewerbsfähig.

Zudem decken die LCOE-Schätzungen für Kernkraftwerke eine große Bandbreite ab, selbst wenn derselbe Diskontsatz zugrunde gelegt wird. Der Vermögensverwalter Lazard kam zu dem Schluss, dass abgesehen von mit Erdgas betriebenen „Spitzenlastkraftwerken“ mit Diskontsätzen von 5,4 Prozent oder weniger die Kernenergie auf LCOE-Basis immer die teuerste Energiequelle war. Bei einem Diskontsatz von 7,7 Prozent lagen die Kernenergiekosten bei 182 US-Dollar/MWh gegenüber 50 US-Dollar/MWh für Windenergie und 61 US-Dollar/MWh für Solarenergie. Rechnet man die Kosten für die Speicherung oder andere „Firming costs“, also die Kosten für jene Infrastrukturen, die Solar- und Windkraftwerke so verlässlich machen wie Gas- oder Kernkraftwerke, hinzu, würden die Gesamtkosten für nicht subventionierte Windenergie je nach Strommarkt nur auf 67–177 US-Dollar/MWh bzw. 75–162 US-Dollar/MWh steigen – und das alles unter den durchschnittlichen Kostenschätzungen für neu gebaute Kernkraftwerke.⁵

Abbildung 1: Auswahl der durchschnittlichen historischen Kosten nach Technologie.

Quelle: WNISR mit Lazard LOCE Versions, 2024



⁵ Lazard, „LCOE+ Levelized Cost of Energy+“, Juni 2024.

Nicht berücksichtigte und unterschätzte Kosten

Abgesehen vom Kraftwerk selbst sind auch Beschaffung, Umwandlung, Anreicherung und Baugruppenfertigung bei Kernkraftwerken teurer und komplexer als bei anderen Formen der Stromerzeugung. Die Kosten für die Stilllegung – nicht nur des Kraftwerks, sondern auch der Anlagen der Brennstoffkette – sowie die Kosten für die Abfallentsorgung sollten in die Kostenberechnungen einbezogen werden. Es ist erforderlich, dass zweckgebundene Mittel in ausreichender Höhe bereitgestellt und mit großer Sorgfalt investiert werden, um die festgelegten Ziele zu erreichen.

Die Schätzungen der Stilllegungskosten variieren stark und empirische Daten sind nur begrenzt verfügbar. In den USA beispielsweise liegen die Kostenschätzungen für die Stilllegung von Reaktoren zwischen 510 und 2.148 US-Dollar/kW.⁶ Die Kosten für die Entsorgung von Nuklearabfällen pro Kilowattstunde dürften bei kleinen und mittleren Reaktoren noch höher ausfallen als bei großen.

Darüber hinaus gibt es verschiedene mit dem Kernenergiesektor verbundene Kostenkategorien, die sich nur schwer quantifizieren und zuordnen lassen, wie z. B. Notfallvorsorge- und Reaktionsstrukturen, Wissensmanagement, Studien und Bildung oder Sicherheit und Gefahrenabwehr.

Unzureichende Haftpflichtdeckung für Nuklearunfälle

Unzureichende oder subventionierte Versicherungen zur Deckung von externen Schäden, die durch Reaktorunfälle, Unfälle in Anlagen der Brennstoffkette oder während des Transports verursacht werden, sind weltweit verbreitet. Am Beispiel von Reaktorunfällen werden die Haftungsanforderungen für Schäden außerhalb der Anlage auf nationaler Ebene festgelegt. Ist die Haftungsgrenze des Betreibers erreicht, können zusätzliche Mittel von staatlicher Seite bereitgestellt werden. Eine dritte Deckungsstufe wird durch eine Reihe internationaler Abkommen (Pariser Übereinkommen, Wiener Übereinkommen, verschiedene gemeinsame Protokolle und Zusatzabkommen) sichergestellt. Allerdings liegt die Gesamtdeckung selbst in den USA, die über den weltweit größten Haftungsverbund für Nuklearunfälle verfügen, weit unter den zu erwartenden Schäden auch nur

⁶ Callan Institute, „2023 Nuclear Decommissioning Funding Study“, Dezember 2023.

eines mittelschweren Unfalls. Die von der japanischen Regierung geschätzten Kosten der Unfälle von Fukushima im Jahr 2011 von 223 Milliarden US-Dollar beliefen sich z. B. auf mehr als das 16-Fache des gesamten US-Versicherungspools von 13,6 Milliarden US-Dollar.

Zukünftige neue Marktansprüche

Zu den Aktivitäten, mit denen Schwellenländer die Wirtschaftlichkeit der Kernenergie verbessern sollen, gehören die Wasserstoffproduktion, die Wasserentsalzung, die Versorgung von Industrien mit Hochtemperatur-Prozesswärme und standortferne Anwendungen wie Rechenzentren und Krypto-Mining. Die meisten dieser Dinge werden von kapitalintensiven Unternehmen benötigt, die für einen wirtschaftlichen Betrieb in der Regel auf eine Produktion rund um die Uhr angewiesen sind. Ein Kernkraftwerksbetreiber müsste solchen Nutzern einen festen Prozentsatz der Produktion zusichern, anstatt ihnen zeitweise überschüssige Energie zu verkaufen. Somit würden die alternativen Märkte mit bestehenden Kunden konkurrieren, anstatt sie zu ergänzen.

Insgesamt bleiben die wirtschaftlichen Aussichten für die Kernenergie schwierig. Forschung, Entwicklung und Implementierung sind zum Großteil von staatlichen Geldern, Risikoabsorption und direkter Eigentümerschaft abhängig. Bis zu dem Zeitpunkt, an dem Kostenverbesserungen eintreten könnten, werden technologische Entwicklungen bei konkurrierenden Technologien, Energiespeicherung, Nachfragesteuerung und Energieeffizienz die wirtschaftlichen Kosten anderer Energieformen noch weiter gesenkt haben. Kernkraft dürfte zu teuer bleiben, als dass sie jemals einen bedeutenden Marktanteil gewinnen könnte.

Erstellt: 2024