

Resilienzkosten in der Energieerzeugung

Autoren: Dr. Wolfgang Müller und Prof. Dr. Stefan Bayer

1. Einleitung, Zielsetzung und methodischer Ansatz

Die ökonomische Logik der Globalisierung basiert auf Nutzung komparativer wie auch absoluter Kostenvorteile durch internationale Arbeitsteilung. Unterschiedliche Ressourcenausstattungen und Spezialisierungsmuster ermöglichen es, Produktionskosten zu senken und gesamtwirtschaftliche Wohlfahrtsgewinne zu realisieren. Implizite Annahme dieses Systems ist jedoch die dauerhafte Verfügbarkeit von Ressourcen (zeitlich wie materiell), eine relativ störungsfreie Transportlogistik sowie der verlässliche Zugang zu internationalen Märkten.

Diese Voraussetzungen erweisen sich zunehmend als fragil. Geopolitische Verwerfungen haben in den vergangenen Jahren deutlich gemacht, dass internationale Lieferbeziehungen nicht ausschließlich ökonomischen Rationalitäten folgen, sondern zunehmend politisch instrumentalisiert werden. Damit treten strukturelle Risiken zutage, die in der klassischen marktwirtschaftlichen Preisbildung nicht berücksichtigt werden. Abhängigkeiten von externen Lieferanten erzeugen externe Kosten, die weder von Produzenten noch von Konsumenten vollständig internalisiert werden und daher zu systematischen Fehlanreizen führen.

In funktionierenden Wettbewerbsmärkten unterbleiben Investitionen in strategische Redundanzen oder alternative Versorgungsstrukturen, da diese unter Kostengesichtspunkten regelmäßig nicht refinanzierbar sind. Unternehmen, die entsprechende Vorsorge treffen würden, sähen sich mit Wettbewerbsnachteilen aufgrund höherer Produktionskosten konfrontiert. Die Folge ist eine strukturelle Unterinvestition in Resilienz, obwohl diese gesamtwirtschaftlich wünschenswert wäre. Die Energiekrise zunächst im Zuge des Ukraine-Krieges und aktuell im Zusammenhang mit dem Iran-Krieg hat diese Problematik offengelegt und gezeigt, dass die Kosten fehlender Resilienz erheblich sein können, was sich u. a. in Lieferengpässen, ausstehender Produktion etc. niederschlägt.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Papier das Ziel, einen Bewertungsrahmen zu entwickeln, der Resilienz als eigenständige ökonomische Kategorie berücksichtigt. Im Zentrum steht die Frage, welche Kosten durch die Herstellung und Aufrechterhaltung von Resilienz entstehen und wie diese in die Bewertung von Energieerzeugungsformen integriert werden können. Gleichzeitig wird analysiert, wie sich diese Kosten zwischen verschiedenen Akteuren verteilen und welche internationalen Wettbewerbswirkungen daraus resultieren.

Darüber hinaus soll hinterfragt werden, ob der sukzessive Rückgang fossiler Energieträger tatsächlich zu volkswirtschaftlichen Schäden führt oder ob diese Effekte mittel- bis langfristig durch neue industrielle Wertschöpfungsketten, Beschäftigungseffekte sowie technologische Innovationsdynamiken im Bereich erneuerbarer Energien kompensiert werden können. Während fossile Energieträger primär laufende Importkosten verursachen, könnten Investitionen in erneuerbare Energien überwiegend zu infrastruktureller und industrieller Wertschöpfung innerhalb Deutschlands und Europas führen. Die Energiewende ist damit nicht nur ein energie- und klimapolitisches Projekt, sondern zunehmend auch ein industriepolitischer Modernisierungsprozess.

2. Resilienz als Leitprinzip der Energiepolitik

Resilienz beschreibt für uns die Fähigkeit eines Systems, Schocks und Krisen ohne gravierende unerwünschte Auswirkungen zu absorbieren und so innerhalb eines, gemessen an der Schwere der negativen Einwirkungen und den systemischen Erhaltungserfordernissen,

adäquaten Zeitrahmens eines Zustands zu erreichen, der in wesentlichen Merkmalen weitgehend dem normalen Funktionieren vor dem Schock oder der Krise entspricht. Neben der „Anpassungsfunktion“ (Sprungfeder/Absorptionsfähigkeit) umfasst Resilienz zusätzlich auch eine Resistenzkomponente. Darunter wird die Widerstandsfähigkeit in Gestalt von Schutz- und Abwehrmaßnahmen sowie durch langfristig wirksames und präventives Handeln (Mitigation) verstanden, um möglichst wenig Absorptionsfähigkeit aufbringen und Wiederherstellungsmaßnahmen seltener generieren zu müssen. Resilienz greift also immer dann, wenn die Resistenz versagt oder überwunden wurde. Maßnahmen zur Herstellung einer Resistenz sind daher stets auch als integraler Bestandteil einer umfassenden Resilienzstruktur zu verstehen. Für die vorliegende Analyse wird Resilienz präzisiert als die Fähigkeit eines Energiesystems verstanden, seine technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Funktionsfähigkeit auch unter Krisenbedingungen dauerhaft sicherzustellen und gleichzeitig Anpassungsfähigkeit gegenüber strukturellen Veränderungen zu bewahren. Dies bedeutet insbesondere:

- eine möglichst geringe strukturelle Verwundbarkeit,
- stabile und planbare Kostenstrukturen,
- hohe technologische Anpassungsfähigkeit,
- geringe geopolitische Abhängigkeiten,
- robuste Liefer- und Wertschöpfungsketten sowie
- die Fähigkeit zur schnellen Wiederherstellung nach Störungen.

Eine resilienzorientierte Energiepolitik verschiebt damit den Fokus von kurzfristiger Effizienz hin zu langfristiger Stabilität und macht deutlich, dass scheinbar kostengünstige Lösungen erhebliche versteckte Risiken bergen können.

Zwei Aspekte, die in diesem Zusammenhang relevant sind, werden an dieser Stelle aber nicht in ein angepasstes Bewertungsmodell übernommen. Zum einen der besagte Aspekt der Resistenz. Die Resistenz einer Anlage hängt von verschiedenen Faktoren ab: Zentralität der Anlage (sogenanntes Klumpenrisiko) sowie die Fähigkeit zum Inselbetrieb. Alternative Energieerzeugungsformen besitzen in der Regel eine hohe Dezentralität, wobei die vielen Anlagen geringer Kapazität Total-Ausfälle verhindern. Neben einer hohen digitalen Angriffsfläche durch Fernwartung, Wechselrichter, IoT-Komponenten und Smart-Grid-Integration existieren auch kinetische Risiken (zentralisierte Leitwarten, Konverterstationen, Leitungsübergang von See an Land). Fossile Großkraftwerke sind zentralisiert und stark automatisiert. Sie besitzen meist etablierte industrielle Sicherheitsstrukturen. Besonders verwundbar sind jedoch gasabhängige Systeme durch Pipeline-Steuerung, internationale Netze und Verdichterstationen, im Falle von LNG die Floating Storage (and Regasification) Units. Kernkraftwerke verfügen zwar über sehr hohe physische Sicherheitsstandards und oft teilweise isolierte OT-Systeme („air-gapped“), was oft segmentierte Netzwerke zur Folge hat. Gleichzeitig sind sie hochzentralisierte Single-Point-of-Failure-Systeme: Ein erfolgreicher (digitaler) Angriff oder auch nur der Verdacht darauf kann zur Abschaltung großer Leistungskapazitäten führen. Die geringe Anzahl großer Anlagen reduziert die Redundanz.

Zum anderen der Aspekt, dass Energieerzeugungsanlagen in eine gesamtstaatliche Sicherheitsarchitektur – im Sinne einer Dual-Use-Verwendung – integriert werden könnten. Insbesondere Offshore-Windparks haben das Potenzial, sich in eine maritime Infrastruktur- und Sicherheitsarchitektur integrieren zu lassen. Die für den Betrieb der Anlagen erforderliche Sensorik, Kommunikations- und Überwachungstechnik kann perspektivisch auch zur Beobachtung und Absicherung kritischer Seeräume beitragen. Gleichzeitig muss aber beachtet werden, dass ein veränderter rechtlicher Status-Quo die Folge wäre: ein an sich geschütztes ziviles Objekt (Art. 52 Abs. 1 1. Zusatzprotokoll zu den Genfer Abkommen) würde bei einer Dual-Use-Nutzung zu einem legitimen militärischen Ziel (Art. 52 Abs. 2). Inwieweit ein potenzieller Gegner von Angriffen auf tatsächlich rein zivile Objekte der Energieerzeugung absehen würde, ist vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus

dem russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine zumindest fraglich. Dennoch gewinnt dieser Aspekt – abseits dieser rechtlichen Überlegungen – vor dem Hintergrund zunehmender geopolitischer Spannungen sowie potenzieller Sabotageakte gegen maritime Infrastruktur generell strategisch an Bedeutung.

Diese beiden Aspekte sind in einem umfassenden Bewertungsprozess zwar relevant, sollen in dieser Analyse aber nicht weiter vertieft werden.

3. Identifizierung potenzieller Resilienzkosten für ein Bewertungsmodell

Die Bewertung von Energieerzeugungsformen erfolgt entlang zentraler Resilienzdimensionen, die zugleich in eine ökonomische Kostenlogik überführt werden. Ausgangspunkt ist die Annahme, dass Resilienz nicht kostenfrei bereitgestellt werden kann, sondern mit zusätzlichen Investitions-, Betriebs- und Systemkosten verbunden ist, die in der klassischen Stromgestehungskostenrechnung nicht vollständig abgebildet werden. Daher muss es Ziel sein, die zuvor entwickelten Resilienzdimensionen nicht nur qualitativ zu beschreiben, sondern auch in Form plausibler Kostenbandbreiten zu operationalisieren. Dabei sollen jene Kosten identifiziert werden, die im bestehenden Strommarktdesign nicht oder nur unvollständig in den Stromgestehungskosten enthalten sind und deren Größenordnung für Deutschland näherungsweise zu bestimmen wären.

Die Klima- und Umweltresilienz beschreibt die Fähigkeit eines Energiesystems, langfristige klimabedingte Risiken zu begrenzen. Energieformen mit hohen Emissionen verursachen nicht nur unmittelbare Umweltschäden, sondern auch erhebliche volkswirtschaftliche Folgekosten durch Extremwetterereignisse, Anpassungsmaßnahmen, eine erhöhte Absicherung durch Versicherungen, veränderte Aufwendungen im Bereich der kommunalen Planung und Vorsorge sowie Infrastrukturbelastungen. Diese Kosten sind als externe Effekte zu interpretieren und werden in Marktpreisen typischerweise nicht vollständig berücksichtigt – man denke hier beispielsweise daran, dass davon ausgegangen wird, dass die Rückstellungen für den Rückbau bei sowie die Überweisungen für die Abfalllagerung von den Betreibern ehemaliger Atomkraftwerke nicht annähernd ausreichen werden, um den Kostenaufwand für die gesamte Entsorgung zu decken. Die Differenz stellt ökonomisch betrachtet nicht internalisierte Kosten dar, die letztlich vom Staat und damit von der Allgemeinheit getragen werden (müssen). Analog lassen sich für fossile Energieträger implizite Klimakosten über CO₂-Preise approximieren. Je nach CO₂-Preis pro Tonne ergeben sich beispielsweise für Gaskraftwerke Zusatzkosten, die in vielen historischen Marktphasen nicht vollständig eingepreist waren. Für eine vollständigere volkswirtschaftliche Bewertung müssten neben diesen externen Kosten aber auch noch Resilienz- und Versorgungssicherheitsaspekte hinzugezogen werden.

Diese Kosten lassen sich ökonomisch als Ausdruck von Marktversagen interpretieren. Zum einen können sie als nicht vollständig internalisierte externe Kosten verstanden werden, wenn Risiken, Folgekosten oder Schadenspotenziale nicht oder nur unzureichend in Marktpreisen abgebildet sind. Dies gilt etwa für langfristige Entsorgungs-, Rückbau- oder Klimafolgekosten. Zum anderen weist Resilienz auch Merkmale eines öffentlichen Gutes auf: Investitionen in Versorgungssicherheit, Systemstabilität oder Krisenfestigkeit stiften häufig gesellschaftlichen Nutzen, der von einzelnen Marktakteuren nicht vollständig monetarisiert werden kann. Daher ist aus privatwirtschaftlicher Sicht mit einem zu geringen Angebot an Resilienz zu rechnen. Beide Perspektiven verweisen auf dasselbe Grundproblem: Marktpreise bilden die gesellschaftlich relevanten Kosten und Nutzen nicht vollständig ab.

Die Versorgungssicherheit und Systemstabilität erfassen die Verlässlichkeit und Steuerbarkeit der Stromproduktion sowie die Verfügbarkeit der Energie im System. Technologien mit fluktuierender Einspeisung erfordern zusätzliche Flexibilitätsoptionen wie Speicher, Reservekapazitäten, Lastmanagement oder Netzstabilisierungsmaßnahmen. Diese Maßnahmen erzeugen sowohl investive als auch laufende Zusatzkosten, die integraler Bestandteil eines resilienten Systems sind. Diese Zusatzkosten stammen von den Kosten für Netzengpassmanagement, Redispatch und Einspeisemanagement, die in Deutschland eine Größenordnung von ca. drei bis fünf Milliarden Euro jährlich

haben.¹ Hinzu kommen Kapazitätskosten für konventionelle Backup-Kraftwerke, die trotz geringer Auslastung vorgehalten werden müssen. Für den Fall, dass man an eine Neueinführung bereits aufgegebenen Erzeugungsformen (wie z. B. der Kernkraft) denkt, dann ist zu beachten, wann eine Verfügbarkeit der Energie im System erreicht werden kann. Bei einer notwendigen Umrechnung dieser Kosten auf die Strommenge, ergeben sich zusätzliche systembedingte Kosten, die allerdings nicht einzelnen Technologien zurechenbar, sondern Ausdruck eines zunehmend komplexen und volatileren Energiesystems sind.

Die wirtschaftliche Robustheit umfasst die langfristige Stabilität der Kostenstrukturen, die Abhängigkeit von volatilen Rohstoffmärkten sowie Investitionsrisiken. Sie wird daher maßgeblich durch Preisvolatilität und Absicherungsstrategien beeinflusst. Darüber hinaus spielen Kapazitätsengpässe entlang der Wertschöpfungsketten, etwa bei spezialisierten Produktionsanlagen oder kritischen Dienstleistungen, eine zentrale Rolle, da sie die Kosten erhöhen und die Systemstabilität beeinträchtigen können. Gleichzeitig ist zwischen technologiebedingten und regulatorisch bedingten Kosten zu unterscheiden. Technologiebedingte Kosten entstehen unmittelbar aus den physikalischen und infrastrukturellen Anforderungen eines Energiesystems, etwa durch Speicherbedarf, Netzausbau oder Reservekapazitäten. Regulatorisch bedingte Kosten resultieren hingegen aus Genehmigungsverfahren, Abgaben, Umlagen, Marktregeln, Sicherheitsauflagen oder administrativen Prozessen. Diese Differenzierung ist insbesondere deshalb relevant, weil regulatorisch verursachte Kosten in öffentlichen Debatten häufig den jeweiligen Technologien zugeschrieben werden, obwohl sie primär Ausdruck politischer und administrativer Rahmenbedingungen sind. Die Energiepreisschocks der Jahre 2021 bis 2023 haben gezeigt, dass extreme Preisspitzen volkswirtschaftliche Zusatzkosten verursachen können. Staatliche Entlastungspakete in Deutschland summierten sich in dieser Phase auf über 200 Milliarden Euro². Selbst wenn man nur einen Teil dieser Summe als strukturelle Resilienzkosten interpretiert, ergibt sich eine erhebliche implizite Kostenkomponente, die in normalen Marktphasen nicht sichtbar ist. Auf der Ebene einzelner Unternehmen entstehen zusätzliche Kosten durch Hedging-Strategien, langfristige Lieferverträge oder Diversifizierungsmaßnahmen, die sich je nach Energieform in unterschiedlich hohen Aufschlägen niederschlagen können.

Die geopolitische Resilienz analysiert Importabhängigkeiten und politische Verwundbarkeiten. Energieformen mit hoher Abhängigkeit von internationalen Lieferketten sind anfällig für politische Einflussnahme, Handelskonflikte oder physische Störungen. Diese Risiken schlagen sich entweder in präventiven Diversifizierungskosten oder in ex post entstehenden Krisenkosten nieder. Eine Resilienz in diesem Bereich manifestiert sich insbesondere in der Notwendigkeit zur Diversifizierung von Importquellen und zum Aufbau alternativer Infrastrukturen. Der Aufbau der LNG-Infrastruktur in Deutschland stellt hierfür ein prägnantes Beispiel dar. Die Investitionskosten für Terminals und angeschlossene Infrastruktur belaufen sich auf mehrere Milliarden Euro, wobei ein erheblicher Teil staatlich getragen wird.³ Diese müssten eigentlich auf die importierten Gasmenge umgelegt werden, so dass sie als Preis für reduzierte Abhängigkeit interpretiert werden können.

Die systemische Integrationsfähigkeit schließlich beschreibt die Anforderungen an Netzinfrastuktur, Speicherlösungen und sektorübergreifende Koordination. Insbesondere erneuerbare Energien erfordern einen erheblichen Ausbau der Systeminfrastruktur, wodurch zusätzliche Kosten entstehen, die häufig nicht den einzelnen Erzeugungstechnologien zugerechnet werden, sondern im Gesamtsystem anfallen. Allerdings verursacht die systemische Integrationsfähigkeit

¹ Bundesnetzagentur/SMARD (2024): Netzengpassmanagement im Jahr 2023, 17.05.2024, <https://www.smard.de/page/home/topic-article/444/213590/netzengpassmanagement-im-jahr-2023>, zuletzt aufgerufen am 22.06.2026.

² Beznoska, M. et al. (2023): Auswirkungen der Entlastungspakete in der Energiepreiskrise, Institut der deutschen Wirtschaft Policy Paper Nr. 6 2023.

³ Deutscher Bundestag (2023): Antwort der Bundesregierung auf eine Kleine Anfrage der Fraktion Die Linke, Bundestagsdrucksache 20/6675, 11.05.2023.

insbesondere bei erneuerbaren Energien zusätzliche Kosten durch Netzausbau und Speicherbedarf. Die aktuellen Netzentwicklungspläne für Deutschland gehen von Investitionen in dreistelliger Milliardenhöhe bis 2045 aus. Allein der Stromnetzausbau wird auf über 300 Milliarden Euro geschätzt.⁴ Auch hier müssten sie auf die erwarteten Strommengen umgelegt werden, womit sich langfristige Zusatzkosten ergeben. Hinzu kommen perspektivisch erhebliche Investitionen in Speichertechnologien und sektorübergreifende Infrastruktur, die diese Kosten weiter erhöhen können.

Zunehmend relevant werden die Kosten der Cyber-Resilienz mit Blick auf eine vorhandene digitale Verwundbarkeit. Hierbei verschwimmen die Grenzen zwischen klassischen IT-Systemen und operativen Steuerungssystemen (OT) zunehmend. Die fortschreitende Digitalisierung des Energiesystems – Smart Grids, SCADA, virtuelle Kraftwerke, digitalisierte Netzsteuerung sowie sektorübergreifende Kommunikationssysteme – erhöhen zwar Effizienz und Flexibilität, schaffen gleichzeitig jedoch neue Verwundbarkeiten. Aus diesem Grunde sind in aktuellen Gesetzespakten (z. B. im Net-Zero-Industry Act) Resilienz- und Cybersicherheitskriterien im Rahmen von Ausschreibungsverfahren verankert, um beispielsweise den Einsatz von Wechselrichtern aus Nicht-EU-Staaten auszuschließen zu können. Da Angriffe auf digitale Infrastrukturen im Energiebereich unmittelbare Auswirkungen auf Versorgungssicherheit und Netzstabilität entfalten, spielen IT- und OT-Resilienzkosten eine immer stärkere Rolle. Cyber-Resilienz wird damit zu einem integralen Bestandteil moderner Energieversorgungssysteme.

Fasst man diese Komponenten zusammen, ergibt sich ein erweitertes Kostenbild, das deutlich über den klassischen Stromgestehungskosten liegt. Resilienz ist damit kein marginaler, sondern ein zentraler Kostenfaktor. Eine Zusammenführung dieser Dimensionen macht deutlich, dass Resilienz eine eigenständige Kostenkategorie darstellt. Diese lässt sich analytisch in investive Kosten, laufende Betriebskosten und systemische Kosten differenzieren. Investive Resilienzkosten entstehen durch Infrastrukturaufbau, Redundanzen und technologische Souveränität. Laufende Kosten ergeben sich aus der Vorhaltung von Reservekapazitäten, der Diversifizierung von Lieferketten und dem bewussten Betrieb ineffizienter, aber stabilisierender Strukturen. Systemische Kosten umfassen geopolitische Absicherung, Transformationsprozesse sowie Opportunitätskosten aus der Abkehr von kurzfristig kostengünstigen, aber risikobehafteten Optionen.

Diese Kosten lassen sich formal in einer Erweiterung der Stromgestehungskosten abbilden. Während die klassische LCOE-Formel lediglich Investitions-, Betriebs- und Brennstoffkosten berücksichtigt, integriert eine resilienzadjustierte Variante zusätzliche Kostenkomponenten, die für ein denkbares Resilienzbewertungsmodell konstituierend sein können.

4. Vorschlag für ein Resilienzbewertungsmodell von Energieträgern

Der skizzierte Resilienzansatz kann durch ein Scoring-Modell operationalisiert werden.

Die Bewertung erfolgt in drei Schritten:

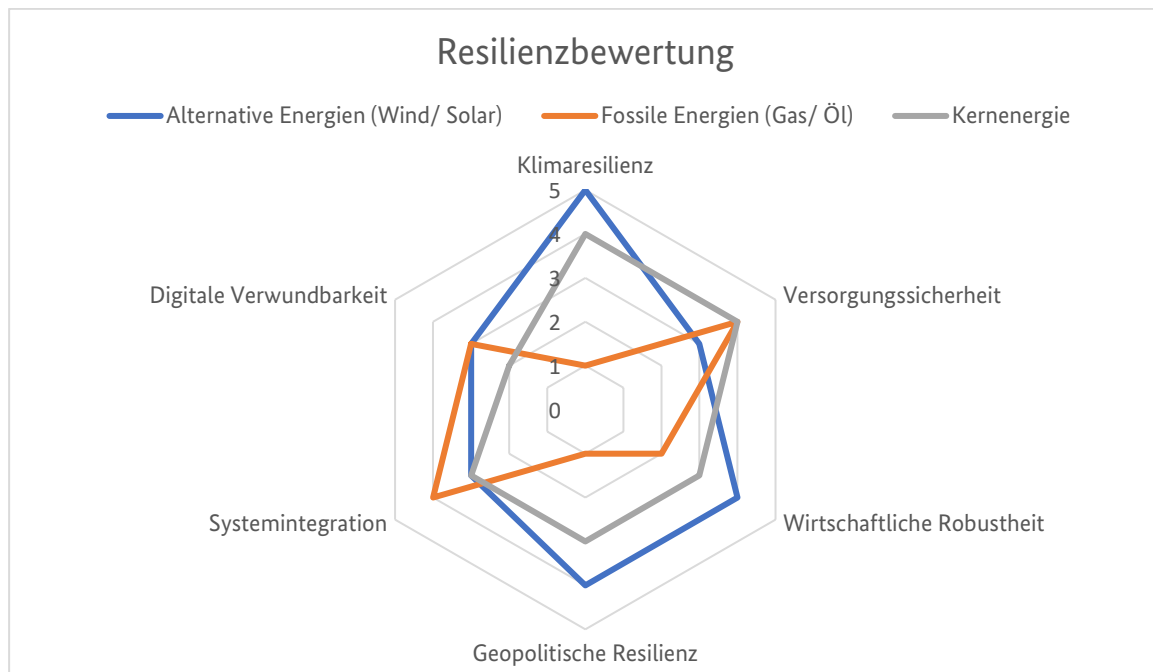
- 1 Definition der Kriterien
- 2 Skalierung der Bewertung
- 3 Aggregation der Ergebnisse

Jede Energieform wird entlang der sechs Resilienzkriterien auf einer Skala von 1 bis 5 bewertet (1: sehr geringe Resilienz bis 5: sehr hohe Resilienz).

Die Bewertung basiert auf plausiblen Systemmerkmalen wie Emissionsintensität, Importabhängigkeit, Cyber-Resilienz, Preisvolatilität oder Infrastrukturbedarf. Daraus ergeben sich folgende Einschätzungen:

⁴ Netzentwicklungsplan: Entwurf des Netzentwicklungsplans Strom 2037/2045, 10.12.2025, https://www.netzentwicklungsplan.de/system/files/statements/2037_2025/anon/vzbv.pdf.

Resilienzkriterium	Alternative Energien (Wind/Solar)	Fossile Energien (Gas/Öl)	Kernenergie
Klimaresilienz	5	1	4
Versorgungssicherheit	3	4	4
Wirtschaftliche Robustheit	4	2	3
Geopolitische Resilienz	4	1	3
Systemintegration	3	4	3
Digital Verwundbarkeit	3	3	2



Die Addition der Bewertungen ergibt folgende Gesamtscores:

Energieform	Gesamtscore
Alternative Energien	22
Kernenergie	19
Fossile Energien	15

Gleichzeitig zeigt sich jedoch, dass die volkswirtschaftliche Betrachtung nicht allein auf kurzfristige Preiswirkungen reduziert werden darf. Sogenannte Zweitrundeneffekte müssen ebenfalls Berücksichtigung finden. So ist beispielsweise bei fossilen Energieträgern tendenziell von höheren dauerhaften Kapitalabflüssen ins Ausland auszugehen, während Investitionen in erneuerbare Energien zu einem größeren Teil inländische Wertschöpfung erzeugen. Zudem würden bereits jetzt vorhandene sekundäre Kosten – beispielsweise der Wegfall der Risikoaufschläge auf die Energiekosten pro Einheit ((Geopolitical) Risk Premiums) durch Verwerfungen in der Lieferkette – wegfallen. Der sukzessive Rückgang fossiler Energieträger bedeutet daher nicht zwangsläufig einen volkswirtschaftlichen Verlust in gleicher Höhe, sondern vielmehr eine strukturelle Verschiebung von Ausgabenströmen hin zu heimischer Infrastruktur, industrieller Produktion, Netzausbau, Dienstleistungen und technologischer Entwicklung.

Mit dieser Bewertung rückt die Frage der Kostenträgerschaft in den Mittelpunkt. In marktwirtschaftlich organisierten Systemen werden Resilienzkosten überwiegend über Preise internalisiert und damit von Unternehmen und Verbrauchern getragen. Dies führt zu steigenden Energiekosten und kann die Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen. Gleichzeitig bestehen für einzelne Marktakteure nur begrenzte Anreize, in Resilienz zu investieren, da die entsprechenden Kosten nicht vollständig refinanzierbar sind. Faktisch können Unternehmen die gesamtwirtschaftlichen Vorteile resilienter Strukturen nur teilweise selbst abschöpfen. Aus rein marktwirtschaftlicher Perspektive bestehen also für Resilienz häufig zu geringe Investitionsanreize. Industriepolitische Maßnahmen wie Subventionen, staatliche Investitionsprogramme oder gezielte Förderungen dienen daher dazu, diese positiven Externalitäten zu internalisieren und Resilienzinvestitionen wirtschaftlich attraktiv zu machen. Resilienz würde damit stärker als gesellschaftlicher Zusatznutzen verstanden und entsprechend gefördert.

Im internationalen Vergleich zeigt sich genau diese strukturelle Divergenz. Vor allem in der Volksrepublik China, aber auch verstärkt in den USA, werden wesentliche Teile der Resilienzkosten durch staatliche Maßnahmen getragen. Investitionen in Infrastruktur, Schlüsseltechnologien und industrielle Kapazitäten werden gezielt subventioniert und nicht primär über Marktpreise refinanziert. Dies führt dazu, dass resilienzbedingte Kosten nicht preiserhöhend wirken, sondern im Gegenteil die internationale Wettbewerbsfähigkeit – im Verständnis von staatlich vorgenommenen resilienzfördernden Investitionen – stärken können.

Das Ausmaß der Diskrepanz ist umso höher, je stärker die anfallenden Resilienzkosten über Marktpreise finanziert werden. In marktwirtschaftlich organisierten Systemen hingegen führt die Internalisierung dieser Kosten über Marktmechanismen zu steigenden Preisen. Es entsteht eine zunehmende Subventionsschere, bei der identische oder sogar höhere gesamtwirtschaftliche Kosten in unterschiedlichen Systemen zu stark divergierenden Marktpreisen führen. Diese asymmetrische Kostenverteilung kann zu Marktverdrängungseffekten führen und die Abhängigkeit von externen Anbietern weiter erhöhen. In der Folge entsteht ein selbstverstärkender Prozess, in dem steigende Abhängigkeiten zusätzliche Resilienzkosten erzeugen.

5. Vergleichende Bewertung der Energieformen

Vor dem Hintergrund dieser erweiterten Perspektive zeigt sich, dass fossile Energieträger zwar kurzfristig eine hohe Versorgungssicherheit und Systemstabilität gewährleisten, jedoch mit erheblichen langfristigen Risiken verbunden sind, die sich aus Emissionen, Preisvolatilität und geopolitischen Abhängigkeiten ergeben. Unter Einbeziehung von Resilienzkosten ergibt sich daher eine deutlich reduzierte strukturelle Attraktivität.

Die Kernenergie weist eine hohe Stabilität in der Stromproduktion und geringe direkte Emissionen auf, ist jedoch durch hohe Investitionskosten, lange Realisierungszeiträume sowie langfristige Entsorgungsfragen gekennzeichnet, die erhebliche wirtschaftliche und systemische Risiken darstellen. Internationale Beispiele wie Flamanville, Olkiluoto oder Hinkley Point C zeigen erhebliche Kostensteigerungen und jahrelange Bauzeitüberschreitungen. Hinzu kommen hohe staatliche Haftungsrisiken, langfristige Entsorgungskosten, erhebliche Sicherheitsanforderungen sowie eine fortbestehende Importabhängigkeit bei Uran und Teilen der nuklearen Brennstoffkette. Die tatsächlichen volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der Kernenergie werden dadurch regelmäßig unterschätzt, da erhebliche Teile der Risiken staatlich abgesichert oder langfristig externalisiert werden.

Erneuerbare Energien zeichnen sich durch geringe Emissionen, eine vergleichsweise niedrige Importabhängigkeit und stabile langfristige Kostenstrukturen aus. Zwar gibt es hier hohe Abhängigkeiten in der Produktion der Netz- und Systemtechnik (z. B. durch kritische Systemkomponenten oder Materialien aus der Volksrepublik China) und durch Engpässe bei der Produktions- und Erreichungskapazität (z. B. Spezialschiffe und -kräne) – diese lassen sich allerdings mittelfristig durch industriepolitische Maßnahmen verringern, während die Energieträgerversorgung bei fossilen Energieformen nicht heimisch sichergestellt werden könnte. Allerdings müssen darüber hinaus

noch notwendigen Investitionen in Netze, Speicher und Systemintegration hinzugerechnet werden. Gleichzeitig erzeugt der Ausbau erneuerbarer Energien erhebliche positive volkswirtschaftliche Effekte. Hierzu zählen insbesondere regionale Wertschöpfung, zusätzliche Gewerbesteuerentnahmen, neue industrielle Produktionskapazitäten, Beschäftigungseffekte sowie technologische Innovationsdynamiken.

Volkswirtschaftlicher Effekt	Fossile Energien	Erneuerbare Energien
Importabhängigkeit	Sehr hoch	Deutlich geringer
Kapitalabfluss	Dauerhaft	Überwiegend investiv
Regionale Wertschöpfung	Gering	Hoch
Beschäftigungseffekte	Begrenzt	Hoch
Langfristige Preisstabilität	Gering	Hoch
Fiskalische Einordnung	Aktuell noch hoch, aber stark degressiv	Aktuell eher eine volkswirtschaftliche Vorinvestition, aber stark dezentrale steuerliche Wertschöpfungseffekte

In der Gesamtheit weisen erneuerbare Energien unter Berücksichtigung aller Resilienzkriterien die günstigste strukturelle Gesamtbewertung auf.

6. Schlussfolgerung

Die Analyse zeigt, dass eine rein kostenbasierte Betrachtung von Energieerzeugungsformen die strukturellen Risiken moderner Energiesysteme systematisch unterschätzt. Erst durch die Integration von Resilienzkosten wird eine vollständige ökonomische Bewertung möglich.

Ein Energiesystem mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien bietet unter diesen Bedingungen die höchste langfristige Resilienz für Deutschland. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Herstellung dieser Resilienz mit erheblichen Kosten verbunden ist, die nicht allein durch Marktmechanismen getragen werden können.

Die Energiewende darf dabei jedoch nicht ausschließlich als zusätzliches Kostenprojekt interpretiert werden. Ein erheblicher Teil der Investitionen ersetzt langfristig fossile Importabhängigkeiten durch heimische Wertschöpfung, technologische Souveränität und infrastrukturelle Stabilität. Die Alternative zur Transformation wäre keine kostenfreie Fortsetzung bestehender Strukturen, sondern die dauerhafte Fortsetzung geopolitischer Abhängigkeiten, externer Klimafolgekosten sowie zunehmender systemischer Verwundbarkeiten.

Die zentrale Herausforderung besteht daher darin, institutionelle Lösungen zu entwickeln, die eine effiziente und wettbewerbsverträgliche Finanzierung dieser Kosten ermöglichen. Ohne eine solche Anpassung besteht die Gefahr struktureller Unterinvestitionen in Resilienz mit langfristig negativen ökonomischen und geopolitischen Konsequenzen. Resilienz wird damit zu einer zentralen wirtschaftspolitischen Kategorie, die weit über die Energiepolitik hinaus in industrie-, sicherheits- und geopolitischen Kategorien Bedeutung besitzt.