



Kampf der Studien – Ein Update

Metaanalyse von Energiesystemstudien zur
Transformation des Deutschen Energiesystems

Andreas Hanel, Sebastian Fendt und
Hartmut Spliethoff

2022/08

Kampf der Studien – Ein Update

Metaanalyse von Energiesystemstudien zur Transformation des deutschen Energiesystems

Andreas Hanel   **Sebastian Fendt** , und **Hartmut Spliethoff** 

Lehrstuhl für Energiesysteme, TUM School of Engineering and Design, Technische Universität München

 andreas.hanel@tum.de

August 2022

Zusammenfassung — Zunehmend häufiger treten Großereignisse ein, die unsere Energieversorgung beeinflussen. Eine Vielzahl an Instituten untersucht das Deutsche Energiesystem, um mögliche Zukunftsszenarien und Transformationswege zur Erreichung des Klimaschutzes zu identifizieren. In dieser Arbeit werden 54 solcher Systemstudien mit Fokus auf den Deutschen Stromsektor analysiert. Verteilt auf diverse Veröffentlichungsjahre beinhaltet die Datengrundlage 192 Szenarien. Um ein vertieftes Verständnis zu schaffen, legt diese Metastudie folgende Schwerpunkte:

- Auswertung der Rahmenbedingungen
- Herausarbeiten allgemeiner Trends in aktuellen Systemstudien
- Vergleich älterer und aktueller Studien hinsichtlich Randbedingungen und Ergebnissen
- Analyse der Szenariendefinitionen und Einfluss wechselnder Randbedingungen

In allen Szenarien wird von einem starken Ausbau der erneuerbaren Energien ausgegangen. Grund hierfür ist insbesondere der steigende Bedarf an elektrischer Energie für die fortschreitende Elektrifizierung und zunehmende Anwendung von Power-to-X Technologien. Trotzdem werden in den meisten Studien konventionelle Kraftwerke als wichtige Flexibilitätsgeber sowohl während der Transformation als auch langfristig mitberücksichtigt. Die größten Abweichungen innerhalb der Studien beruhen auf der Darstellung der Sektoren Wärme, Mobilität und Industrie. Um die Transformation neben dem Stromsektor auch in den weiteren Sektoren auf Basis fundierter Entscheidungen vorantreiben zu können, werden detaillierte Modelle und darauf aufbauende Studien benötigt. Der Bedarf an synthetischen Energieträgern wird dabei sowohl kurz- als auch mittel- und langfristig gesehen. Damit einher geht auch die Erwartung technologischer Durchbrüche und Kostenabnahmen.

Der Einfluss wechselnder Szenariendefinitionen wird anhand einer Reihe verschiedener Faktoren untersucht. Dabei zeigen insbesondere die gesellschaftliche Akzeptanz und das Ambitionsniveau einen starken Einfluss. Geringe Ambition oder gesellschaftlicher Widerstand führen in den meisten Fällen zu einem Mehraufwand bezüglich des Umbaus des Energiesystems und somit zu höheren Kosten, welche letztendlich von der Allgemeinheit getragen werden müssen. Insbesondere der Ausbau an Windenergieanlagen sollte verstärkt in enger Zusammenarbeit mit der Bevölkerung angegangen werden, um die ambitionierten aktuellen Ausbauziele der Bundesregierung einhalten zu können. Darüber hinaus liefert die Anwendung statistischer Methoden, wie die Berechnung von Korrelationsmatrizen, eine Bestätigung zu erwartender Abhängigkeiten.

Der Vergleich mit älteren Studien zeigt, dass in aktuellen Studien extremere Annahmen vermehrt Anwendung finden. Hierzu zählen unter anderem Annahmen bezüglich des technologischen Wandels, wie der Anteil der Elektrifizierung und der Bedarf an synthetischen Energieträgern. Aber auch unerwartete Einzelereignisse, wie ein kurzfristig eintretender Wandel der Rahmenbedingungen durch politische Entscheidungen oder technologische Durchbrüche, werden vermehrt berücksichtigt. Die Spannweite der Ergebnisse steigt mit der Zunahme an extremen Annahmen, was Interpretation und Vergleichbarkeit erschwert.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Inhalt und Gliederung der Studie	1
2	Theorie	2
2.1	Aufbau und Methodik szenarienbasierter Systemstudien	2
2.2	Aktuelle Verwendung szenarienbasierter Energiesystemstudien	2
2.3	Bestehende Metastudien	3
2.4	Grundbegriffe der Statistik	3
3	Vorstellung der betrachteten Studien	5
4	Übergeordnete Auswertung und Randbedingungen	8
4.1	Rahmenbedingungen der verwendeten Studien	8
4.1.1	Auftraggeber	8
4.1.2	Grundlage der Modellierung	9
4.2	Definition der Szenarien und weitere Parameter	11
4.2.1	Szenarien-Kategorien	11
4.2.2	Weitere Charakteristika	12
5	Diskussion der Studienergebnisse	16
5.1	Vorstellung allgemeiner Trends	16
5.1.1	Nachfrage und Emissionen	16
5.1.2	Erneuerbare Energien	19
5.1.3	Flexibilität und Speichersysteme	22
5.1.4	Kostenentwicklungen	24
5.2	Nachhaltige Energieträger	26
5.2.1	Wasserstoff	26
5.2.2	Wärme, Verkehr und Industrie	28
5.3	Konventionelle Kraftwerkstechnologien	30
5.4	Bewertung von Studienergebnissen älterer Studien	32
5.4.1	Prognosegüte alter Studien	32
5.4.2	Vergleich alter mit aktuellen Studien	34
5.5	Einfluss der Szenariengrundlage	38
5.5.1	Auswertung der Parametereinteilung	38
5.5.2	Analyse der Kriterieneinflüsse	39
5.5.3	Weitere Beobachtungen zum Kohleausstieg und Trendszenarien	45
5.6	Korrelationsanalyse	47
5.7	Diskussion und Limitationen der Betrachtung	50
6	Zusammenfassung und Ausblick	51
	Literatur	53
	Zusatzinformationen und Anhang zur Metastudie	I

Abbildungsverzeichnis

1	Verteilung der Veröffentlichungsjahre der verwendeten Studien (A), sowie die Verteilung der Szenarienzahl je Studie (B).	8
2	Kategorisierung der Auftraggeber (A) und Anteil der Modellierungsgrundlage (B) der betrachteten Energiesystemstudien.	9
3	Darstellung der Veröffentlichungsjahre der Systemstudien sowie Kennzeichnung politischer Entscheidungen mit besonderer Relevanz für Systemstudien.	10
4	Einteilung der Szenarien in eindeutige Kategorien.	12
5	Anzahl der Szenarien mit Berücksichtigung des (Stein-) Kohleausstiegs (A), Atomausstiegs (B) und der Einhaltung der 80 %-igen Treibhausgasreduktion (C) beziehungsweise 95 %-igen Treibhausgasreduktion (D) bis 2050.	13
6	Entwicklung des Bruttostromverbrauchs inklusive des historischen Verlaufs.	17
7	Relative Reduktion der Treibhausgasemissionen bezogen auf das Jahr 1990 inklusive dem historischen Verlauf.	18
8	Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft inklusive dem historischen Verlauf.	18
9	Preisentwicklung der CO ₂ -Zertifikate inklusive dem historischen Verlauf.	19
10	Entwicklung der installierten Leistung an erneuerbaren Energien inklusive dem historischen Verlauf.	19
11	Entwicklung der installierten Photovoltaikleistung inklusive dem historischen Verlauf. Einzelne Studien sind separat farblich gekennzeichnet.	20
12	Installierte Windenergieanlagen Leistung in Summe inklusive dem historischen Verlauf (A), nur Onshore Windenergieanlage (B) und nur Windenergieanlage Offshore (C).	21
13	Jährlicher Strom-Importsaldo Deutschlands inklusive dem historischen Verlauf (positive Werte Import, negative Werte Export).	23
14	Entwicklung der Investitionskosten von PV _{Dach} (A), PV _{frei} (B), WEA _{on} (C) und WEA _{off} (D).	25
15	Erwartete Entwicklung der installierten Elektrolysekapazitäten und Markierung der angestrebten Kapazitäten aus der nationalen Wasserstoffstrategie.	26
16	Vergleich der installierten Kapazitäten an erneuerbaren Energien ohne (A) und mit (B) expliziter Berücksichtigung der Wasserstoffbereitstellung.	27
17	Erwartete Entwicklung der Stromerzeugung aus Erdgas-betriebenen konventionellen Kraftwerke aus [30] (bearbeitet).	30
18	Erwartete Entwicklung der Stromerzeugung aus Erdgas- (A) und Synthetisches Erdgas (SNG)-betriebenen (B) konventionellen Kraftwerke aus [30] (bearbeitet).	31
19	Historischer Verlauf der Treibhausgasemissionen Deutschlands mit den Erwartungen beziehungsweise Vorgaben älterer Systemstudien für den Zielzeitraum 2010 bis 2020.	32
20	Historischer Verlauf der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit den Erwartungen beziehungsweise Vorgaben älterer Systemstudien für den Zielzeitraum 2010 bis 2020.	33
21	Historischer Verlauf der Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen mit den Erwartungen beziehungsweise Vorgaben älterer Systemstudien für den Zielzeitraum 2010 bis 2020.	33
22	Erwarteter Bruttostromverbrauch in älteren (A) und neueren (B) Studien.	34
23	Erwartete installierte Photovoltaik Kapazitäten in älteren (A) und neueren (B) Studien.	35
24	Erwartete installierte Windenergie Kapazitäten in älteren (A) und neueren (B) Studien.	36
25	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit des Ambitionsniveaus des Szenarios.	40
26	Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit des Ambitionsniveaus des Szenarios.	40
27	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der gesellschaftlichen Akzeptanz.	41

28	Entwicklung der installierten Kapazitäten an erneuerbaren Energien und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der gesellschaftlichen Akzeptanz.	42
29	Entwicklung des WEA Anteils an der Bruttostromerzeugung und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Offenheit des Modells.	43
30	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Offenheit des Modells.	44
31	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Umsetzungsgeschwindigkeit innerhalb des Modellierten Zeitraums.	44
32	Entwicklung der installierten EE-Leistung und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Modellierung eines Kohleausstiegs.	45
33	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Modellierung eines Kohleausstiegs.	46
34	Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Modellierung als Trendszenario.	46
35	Korrelation zwischen installierte EE Kapazität und bereitgestelltem EE Strom (A), sowie Abhängigkeit der THG Emissionen vom Anteil der konventionellen Kraftwerke an der Gesamtkapazität (B) in 2050.	47
36	Zusammenhang zwischen konventionellen Stromerzeugung und Anteil an EE an der Gesamtstromerzeugung in 2020.	48
37	Abhängigkeit der installierten DSM Kapazität vom Anteil der EE an der Gesamtkapazität (A) und Abhängigkeit der Speicherkapazität von der Biomassenutzung zur Stromerzeugung (B) in 2020	49

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht über bestehende Metastudien.	4
2	Liste der betrachteten Systemstudien und Zuweisung der im Folgenden verwendeten Kurzbezeichnungen.	5
3	Übersicht und Definition der verwendeten Szenarien-Charakteristika mit Aufteilung in starke, mittlere und schwache Ausprägung.	14
4	Berechnete Volllaststunden der Windenergieanlagen Onshore und Offshore, basierend auf dem Median der installierten Kapazitäten und der bereitgestellten elektrischen Energie.	22
5	Median der erwarteten installierten Leistungen an Wasserkraft und Biomasse-basierter Stromerzeugung, sowie Geothermie.	22
6	Bedarf an Speicherleistung in Abhängigkeit der installierten EE Leistung, sowie die erwartete Anzahl an BEVs und die damit verbundene Speicherkapazität.	24
7	Erwartete Entwicklung (Median der Studien) der Investitionskosten oder Brennstoffkosten für ausgewählte Beispiele.	25
8	Erwarteter Wasserstoffbedarf aus der Metaanalyse und Annahmen der Bundesregierung aus der nationalen Wasserstoffstrategie [29].	27
9	Mediane der installierten Leistung an erneuerbaren Energien, sowie jährlicher Zubaubedarf in Abhängigkeit der Berücksichtigung eines Wasserstoffbedarfs.	28
10	Erwartete Entwicklung des Gesamtwärmebedarfs in Deutschland.	28
11	Median und Mittelwert der durchschnittlichen Volllaststunden und installierten Kapazitäten an gasbetriebenen Kraftwerken basierend auf [30] und eigenen Berechnungen.	31
12	Installierte Leistung an Gaskraftwerken in Abhängigkeit der Technologieoffenheit des Energiesystemmodells aus [30].	31
13	Mediane der erwarteten installierten WEA Kapazitäten in älteren und neueren Studien, aufgeteilt in Onshore und Offshore Anlagen.	36
14	Mediane und Maxima der erwarteten Entwicklung der THG-Emissionen in älteren und neueren Studien.	37
15	Aufteilung der hohen, mittleren und niedrigen Ausprägungen der Kriterien auf die betrachteten Szenarien.	38
16	Einfluss der Kriterien auf Energiesystemvariablen. Höhere Ausprägung des Kriteriums führt zu höherer (+), niedriger (-) oder gleichbleibender (o) Ausprägung der jeweiligen Energiesystemvariablen.	39

Abkürzungsverzeichnis

AEL	alkalischen Elektrolyse
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BEV	Batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
BSV	Bruttostromverbrauch
CCS	Carbon Capture and Storage
DSM	Demand Side Management
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz)
FFF	Fridays for Future
GIS	Geoinformationssystem
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
NG	Natürliches Erdgas
PSKW	Pumpspeicherkraftwerke
PV	Photovoltaik
SNG	Synthetisches Erdgas
THG	Treibhausgas
WEA	Windenergieanlage

1 Einleitung

Allein mit Blick auf die letzten zwei Jahre wird der Einfluss von Großereignissen auf Energiesysteme deutlich. Die Maßnahmen zur Eindämmung der COVID-19 Pandemie führten zu einer starken Abnahme des Energiebedarfs, insbesondere in den Bereichen der Mobilität, des Transports und der Industrie [1]. Bereits Schätzungen aus dem Sommer 2021 zeigten, dass mit Zurücknahme der Einschränkungen die Treibhausgasemissionen zunächst die prepandemischen Werte deutlich übersteigen werden [2]. Mit dem Krieg in der Ukraine folgt nun ein weiterer nicht erwarteter Einfluss auf die Entwicklung der Energiesysteme, insbesondere durch die stark schwankenden Kosten für fossile Energieträger. So liegt der Börsenstrompreis bei sonst unauffälligem Lastverlauf deutlich über den letzten Jahren mit zusätzlich erkennbar stärkeren Schwankungen [3].

Um Versorgungssicherheit, Preisstabilität und Klimaschutz in Einklang zu gewährleisten, werden Entscheidungen bezüglich politischer Vorgaben und Investitionen oft auf Basis von Energiesystemstudien getroffen. Diese Studien nutzen abstrahierte Abbildungen des Energiesystems, um über variierende Randbedingungen und Annahmen mögliche Zukunftsentwicklungen abzuschätzen. Das Ziel ist dabei nicht eine exakte Prognose des zukünftigen Systems darzustellen, sondern viel mehr mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen. Die vielen und sich regelmäßig ändernden politischen und sozialen Randbedingungen, genauso wie technische Weiterentwicklungen führen zu einer großen Bandbreite an Annahmen sowie Ergebnissen und damit einer Vielzahl an betrachteten Zukunftsszenarien, zum Beispiel des deutschen Energiesystems. Die Vergleichbarkeit ist meist nur bedingt gegeben und wird meist dem Lesenden überlassen. Mit der Erstellung von Metastudien, das heißt dem systematischen Vergleich mehrerer Studien, wurde unter anderem in [4] begonnen die Interpretierbarkeit von Systemstudien zu vereinfachen. Ziel der vorliegenden Metastudie ist die Erweiterung der Datenbasis und die Aktualisierung auf aktuelle Studien. Aufbauend darauf soll das Update dazu dienen aktuelle Trends in Energiesystemstudien aufzuzeigen.

1.1 Inhalt und Gliederung der Studie

Nach der Vorstellung der Grundlagen zur Energiesystemoptimierung und zu Systemstudien (Abschnitt 2) sowie der verwendeten Datenbasis (Abschnitt 3), erfolgt zunächst eine Inhalts-unabhängige Evaluierung der Studien (Abschnitt 4). Hier wird insbesondere auf die Rahmenbedingung der Studien sowie die Szenariendefinition und Charakterisierung eingegangen. Der inhaltliche Vergleich folgt in Abschnitt 5 beginnend mit allgemeinen Trends in Unterabschnitt 5.1. Darauf folgt eine Evaluierung der Betrachtung nachhaltiger Energieträger (Unterabschnitt 5.2) sowie eine Auswertung des Bedarfs an konventionellen Kraftwerken während der Energiewende in Deutschland (Unterabschnitt 5.3). Die Kombination aus älteren und neueren Studien ermöglicht über die inhaltliche Auswertung hinaus eine Analyse der Vorhersagegenauigkeit früherer Systemstudien (Unterabschnitt 5.4). Ebenso wird über den Vergleich der Wandel der Annahmen diskutiert. Der Einfluss der Szenariendefinition auf die Ergebnisse von Energiesystemstudien erfolgt über eine kriterien-basierte Analyse (Unterabschnitt 5.5). Als letztes folgt eine Korrelationsanalyse von Energiesystemparametern (Unterabschnitt 5.6). Abschließend werden die Kernergebnisse in Abschnitt 6 zusammengefasst.

2 Theorie

2.1 Aufbau und Methodik szenarienbasierter Systemstudien

Energiesystemstudien sind Untersuchungen zum Verhalten der Energieversorgung einer definierten Region. Das Zusammenspiel der Versorgung durch Strom, Wärme und Energieträger wird als Energiesystem bezeichnet. Der allgemeine Aufbau von Energiesystemstudien ist unter anderem in der Vorgängerstudie von Buttler und Spliethoff ausführlich beschrieben [4]. Genauso gibt es bereits detaillierte Review Veröffentlichungen zur Modellierung und Simulation von Energiesystemen, beispielsweise von Subramanian et al. [5]. Eine detaillierte Beschreibung kann der genannten Literatur entnommen werden.

Zusammenfassend bestehen die meisten Energiesystemstudien aus einer Auswahl an Szenarien, die jeweils unter wechselnden Randbedingungen die Lösung eines Optimierungsproblems darstellen. Das Energiesystem wird dabei stark abstrahiert als Satz an Energie- und Massenbilanzen mit entsprechenden Randbedingungen dargestellt. Die drei Hauptbestandteile sind dabei die eingehenden Energie- und Stoffströme, die Technologien zur Energiewandlung und -transport sowie der jeweilige Bedarf an Energie der jeweils betrachteten Sektoren. Hierzu zählen insbesondere Potenziallimitierungen, Kosten und technologische Parameter wie Wirkungsgrad und Teillastverhalten. Als Sektoren kommen dabei Strom, Wärme/Kälte, Mobilität/Transport und Industrie in Frage. Die Energie- und Massenbilanzen werden dann in Kombination mit den Randbedingungen auf eine Zielgröße hin optimiert, im klassischen Fall das Vollkostenminimum. Ausgehend von einem Szenario, meist als Referenz- oder Basisszenario bezeichnet, wird anhand der Abweichungen weiterer Szenarien das zukünftige Energiesystem und dessen Transformationspfad diskutiert. Die Unterschiede zwischen den Szenarien innerhalb einer Studie sind dabei meist geringer als die Unterschiede der Grundannahmen zwischen verschiedenen Energiesystemstudien. [4, 5]

2.2 Aktuelle Verwendung szenarienbasierter Energiesystemstudien

Grundsätzlich ist die Vorhersage zukünftiger Ereignisse und somit auch die Entwicklung eines Energiesystems nicht möglich. Die weit verbreitete Annahme, dass Entscheidungen auf Grundlage eines perfekten Zukunftsszenarios getroffen werden können ist durch deren Nichtexistenz nicht zutreffend [6]. Vielmehr sind einzelne Szenarien stets ausschließlich unter den jeweils genutzten Randbedingungen aussagekräftig.

Oft werden aus einigen wenigen Szenarien bestehende Studien von Entscheidungsträgern genutzt, um langfristige Entscheidungen sowohl in wirtschaftlicher als auch politischer Sicht zu treffen. So basieren zum Beispiel die Empfehlungen der Kohlekommission¹ in deren Abschlussbericht [7] unter anderem auf Studien wie der dena-Leitstudie [8] und einer vom BDI² in Auftrag gegebenen Studie [9]. Ebenso werden von Interessengemeinschaften innerhalb der Gesellschaft, wie beispielsweise dem WWF³ oder dem BUND⁴, Studien beauftragt, um deren Standpunkte zu unterstreichen [10, 11]. Auch werden mit wirtschaftlichen Hintergedanken von Konzernen wie der E.ON SE Systemstudien in Auftrag gegeben [14]. Grunwald weist hier jedoch darauf hin, dass jede alleinstehende Studie immer in gewisser Weise die Ansichten der Autoren widerspiegelt [6]. Zusätzlich beeinflusst die Fragestellung des Auftraggebers in gewisser Weise bereits gewisse Aspekte der Betrachtung. Aus diesem Grund empfiehlt Grunwald für die Entscheidungs-unterstützende Informationsbereitstellung stets auf mehrere Studien zurückzugreifen, um einen breiteren Überblick zu erhalten. Der mit Anzahl der Studien steigende Informationsgehalt kann durch Metastudien strukturiert und auf ein leicht verständliches Maß reduziert werden, wobei zusätzlich Hintergrundinformationen, wie Studienauftraggeber, Art der Modellierung oder ausführende Institution, vergleichend zu Verfügung gestellt werden können.

¹Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“

²Bundesverband der Deutschen Industrie

³World Wide Fund for Nature

⁴Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland

2.3 Bestehende Metastudien

Neben der Vorgängerarbeit dieser Studie von Butter et al. [4], wurden in den letzten Jahren eine Reihe weiterer Metastudien erstellt. Hier unterscheidet sich zum einen die Zielsetzung der jeweiligen Studie. So gibt es Studien die sich explizit mit der Nutzung von Biomasse im Rahmen der Dekarbonisierung auseinandersetzen [12]. Weitere Themenschwerpunkte sind beispielsweise Sektorkopplung [13, 14, 15] oder De- und Zentralität des Energiesystems [16]. Ebenso gibt es auf die Zusammenfassung länderspezifischer Systemstudien fokussierte Metaanalysen, die genutzt werden können, um beispielsweise die Abbildung der Nachbarregion Deutschlands in aktuellen Systemanalysen zu verbessern, beziehungsweise zu vereinheitlichen [17]. Weiter werden aktuelle Themen wie die Nutzung von Wasserstoff für die Entwicklung des Energiesystems betrachtet [18].

Zum anderen unterscheiden sich Metastudien bezüglich des Ansatzes des Szenarienvergleichs. So gibt es Analysen mit wenigen Studien, beziehungsweise wenigen Szenarien als Datengrundlage sowie Studien die auf eine breite Datenbasis abzielen:

- a) Grobe oder keine Einteilung nach Szenariendefinition
- b) Detaillierte Kategorisierung nach Szenariendefinition

Erstere nutzen alle Ergebnisse aus allen Szenarien in einer oder wenigen Gruppen, wobei auf eine möglichst große Datengrundlage abgezielt wird. Die derart bestimmten Spektren unterliegen meist einer breiteren Streuung. Jedoch können auf diesem Weg mit vergleichsweise geringem Aufwand Aussagen bezüglich allgemeiner Trends abgeleitet werden. Zusätzlich lassen sich Aussagen über die Extremszenarien (obere und untere Grenzen der Spektren) ableiten.

Im Gegensatz dazu ist der Vorteil einer kleinstufigeren Szenarienkategorisierung die Möglichkeit tiefer auf ausgewählte Fragestellungen einzugehen. So werden meist nur einzelne Szenarien aus Studien genutzt und mit möglichst ähnlichen Szenarien⁵ aus anderen Studien verglichen. Dies geht jedoch mit einem deutlich größerem Zeitaufwand bezüglich der Kategorisierung auf Aufarbeitung einzelner Szenarien einher.

Als Ergebnisse unterscheidet sich so der Umfang der Datenbasis und die Detailtiefe einzelner Themenschwerpunkte in Metastudien zum Teil stark. In Tabelle 1 ist eine vergleichende Übersicht vorhandene Metastudien zu finden. Die Vorliegende Arbeit nutzt beide Ansätze. Der gesamte, umfangreiche Datensatz wird genutzt, um allgemeine Trends bezüglich der zukünftigen Entwicklung des deutschen Energiesystems zu treffen. Im Anschluss wird ein Teildatensatz genutzt, um mit einer detaillierten Szenarienkategorisierung explizit auf die Einflüsse einzelner Randbedingungen und Einflussfaktoren einzugehen.

2.4 Grundbegriffe der Statistik

In diesem Absatz sollen die wichtigsten Begriffe für ein besseres Verständnis der folgenden Analyse definiert werden.

Median Der Median oder Zentralwert ist nach [22] definiert als der an der $\frac{n}{2}$ -ten Stelle stehende Wert der n sortierten Einträge. Im Falle einer geraden Anzahl von Einträgen wird (analog Gleichung 1) der Mittelwerte des $\frac{n}{2}$ -ten und $(\frac{n}{2} + 1)$ -ten Eintrages verwendet.

$$\text{Median}(\mathbf{x}) = \begin{cases} x_{\frac{n}{2}} & \text{für } n \text{ ungerade} \\ \frac{1}{2}(x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}) & \text{für } n \text{ gerade} \end{cases} \quad (1)$$

⁵Vergleichbar bezüglich Annahmen, Randbedingungen, Szenariendefinition, Fragestellung

Tabelle 1 Übersicht über bestehende Metastudien.

Ref.	Jahr	N _{Stud.}	#Szn.	Qual.	Quant.	Fragestellung
[18]	2021	8/12	-		X	Wasserstoff und Syntheseprodukte
[12]	2020	66	189	X		Biomasse-Nutzung zur Dekarbonisierung
[16]	2020	4/5	9/13	X	(X)	Zentralität und Dezentralität
[19]	2019	3	8		X	Handlungsempfehlungen für Energiewende
[20]	2019	7	17		X	Energiewende in der Industrie
[17]	2019	34	126	X	(X)	Europaweiter Überblick
[21]	2018	10	21/24	X		Methodik Vergleich & Gas zur Sektorkopplung
[15]	2017	6	6	X		Sektorkopplung
[13]	2017	32*	-		X	Sektorkopplung; Power-to-Heat für Flexibilität
[4]	2016	12	17		X	Kon. Kraftwerke und Speichertechnologien
[14]	2016	27	-	X		Sektorkopplung, Dekarbonisierung, Infrastruktur
Diese Studie		54	192	X	X	Einfluss und Wandel von Randbedingungen

*Mehrere Quellentypen: Studien, Interviews, Stellungnahmen

Korrelation nach Spearman Unter Korrelation wird der funktional nachweisbare Zusammenhang zweier oder mehrerer Variablen verstanden. Da nicht zwangsweise ein linearer Zusammenhang zwischen den Energiesystemvariablen in dieser Arbeit vorliegen muss und aufgrund der Robustheit gegenüber einzelnen Ausreißern wird die Korrelation nach Spearman verwendet. Als Ergebnis ergibt sich der Index Spearman- ρ oder auch r-Wert, welcher zwischen -1 und +1 liegt. Die Spannweite beschreibt dabei den Bereich von perfekt gegenläufigen ($\rho = -1$) bis perfekt gleichläufigen ($\rho = +1$) Verhalten, wobei $\rho = 0$ keiner messbaren Korrelation entspricht. Als Grenzwerte für die Angabe einer Korrelation wird oft der Bereich $\rho > 0,8$ und $\rho < 0,8$ verwendet. [23]

Lineare Regression Um die Trends der Korrelation grafisch darzustellen wird eine lineare Regression verwendet. Das Vorgehen minimiert den mittleren Abstand der Datenpunkte zu einer Geraden der Form:

$$y = a \cdot x + b \quad (2)$$

Für alle Berechnungen wird Python 3.7 verwendet sowie die frei zugänglichen Pakete *numpy*⁶, *scipy*⁷, *matplotlib*⁸ und *seaborn*⁹. Die Anwendung, sowie eine detaillierte Beschreibung der Methodik und Implementierung ist in der jeweiligen Dokumentation gegeben.

⁶**numpy**: <https://numpy.org/doc/>

⁷**scipy**: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/>

⁸**matplotlib**: <https://matplotlib.org/stable/users/index.html>

⁹**seaborn**: <https://seaborn.pydata.org/>

3 Vorstellung der betrachteten Studien

Die Auswahl der für diese Metaanalyse genutzten Systemstudien erfolgt anhand eines Kriterienkatalogs. Die Minimalanforderungen an die Studien sind im Folgenden aufgelistet. Die Studien können dabei grundsätzlich in zwei Gruppen eingeteilt werden. Der Großteil der Studien soll möglichst aktuell sein, um basierend auf aktuellen Entwicklungen studienübergreifende Trends identifizieren zu können. Die zweite Gruppe soll im Gegensatz dazu zu früheren Zeitpunkten erstellt und veröffentlicht sein, um einen Vergleich der erwarteten Entwicklungen des Systems mit den tatsächlichen historischen Werten vergleichen zu können. Die Gruppen werden im Folgenden als „Alt“ und „Neu“ bezeichnet.

- **Zeitlicher Bezug:** Für die Gruppe „Neu“ soll der betrachtete Zeitraum mindestens das Jahr 2030 abdecken, im besten Fall bis 2050. Für die Gruppe „Alt“ reicht das Abdecken der vergangenen Jahre, im besten Fall mit Vergleichbaren Zeiträumen, wie bei den aktuellen Studien.
- **Aktualität:** Das Veröffentlichungsdatum soll 2017 oder neuer sein für die Gruppe „Neu“, keine Beschränkung gilt für die Gruppe „Alt“.
- **Bezugsraum:** Betrachtet werden nur Studien, die die Entwicklung des deutschen Energiesystems betrachten, ausgeschlossen werden dabei auch Studien, die nur einen Teil Deutschlands abbilden.
- **Thema:** Thematisch sollen die Studien mindestens den Stromsektor abdecken. Allgemeine Systemparameter wie Treibhausgasemissionen, Energiebedarfsentwicklungen, sowie Analysen der Sektorenkopplung sind gewünscht.
- **Studienart:** Für die Analysen werden nur Studien mit quantitativen Ergebnissen berücksichtigt, rein qualitative Beschreibungen der Systementwicklungen werden nicht berücksichtigt

Tabelle 2 zeigt die Liste der 54 betrachteten Studien, sowie jeweils eine Kurzbezeichnung zur vereinfachten Referenzierung im weiteren Verlauf der Arbeit. Eine ausführlichere Beschreibung der einzelnen Studien ist in den Zusatzinformationen zu finden.

Tabelle 2 Liste der betrachteten Systemstudien und Zuweisung der im Folgenden verwendeten Kurzbezeichnungen.

Kürzel	Titel
EnerH2(2021)	Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa
BMWi(2021)	Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050
Con(2021)	Strommarkt und Klimaschutz: Transformation der Stromerzeugung bis 2050
Agora(2021)	Klimaneutrales Deutschland 2045
NEP(2021)	Netzentwicklungsplan Strom 2035
BEE(2021)	Das „BEE-Szenario 2030“
dena(2021)	dena-Leitstudie: Aufbruch Klimaneutralität*
Agora(2020)	Klimaneutrales Deutschland
RWE(2020)	Strommarktentwicklung und Braunkohlebedarf unter der Prämisse des Braunkohleausstiegspfads
ISE(2020)	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem
UBA-Pol(2020)	Politiksznarien VIII
ENSURE(2020)	Transformation des Energiesystems bis zum Jahr 2030
Jülich(2020)	Wege für die Energiewende: Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050
umlaut(2020)	Wasserstoff-Studie: Chancen, Potentiale & Herausforderungen im globalen Energiesystem.

EWI(2019)	Auswirkungen einer Beendigung der Kohleverstromung bis 2038 auf den Strommarkt, CO ₂ -Emissionen und ausgewählte Industrien
BMU(2019)	Projektionsbericht der Bundesregierung 2019
WWF(2019)	Zukunft Stromsystem II: Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung
Öko(2019)	Modellbasierte Szenarienuntersuchung der Entwicklungen im deutschen Stromsystem unter Berücksichtigung des europäischen Kontexts bis 2050
BEE(2019)	Das „BEE-Szenario 2030“
Nitsch(2019)	Noch ist erfolgreicher Klimaschutz möglich
BMWi(2019)	Analyse von Strukturoptionen zur Integration erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit
SET-Nav(2019)	Energy systems: Demand perspective (WP5 Summary report)
energies(2019)	Pathways for Germany's Low-Carbon Energy Transformation Towards 2050
DBFZ(2019)	Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials
RESCUE(2019)	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität
NEP(2019)	Netzentwicklungsplan Strom 2030
DIW(2019)	Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor
BMWi(2018)	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland
dena(2018)	dena-Leitstudie: Integrierte Energiewende
BDI(2018)	Klimapfade für Deutschland
HBS(2018)	Innovation Energiespeicher: Chancen der deutschen Industrie
BMBF(2018)	Szenarien für den Strommix zukünftiger, flexibler Verbraucher am Beispiel von P2X-Technologien
UBA-Pol(2018)	Politiksznarien für den Klimaschutz VII: Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2035
TUM(2018)	The Role of Hydrogen, Battery-electric Vehicles and Heat as Flexibility Option in Future Energy Systems
EWI(2017)	Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO ₂ -Minderung
ESYS(2017)	Sektorkopplung: Optionen für die nächste Phase der Energiewende
UBA(2017)	Klimaschutz im Stromsektor 2030: Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung
Shell(2017)	Shell Energieszenarien für Deutschland
WWF(2017)	Zukunft Stromsystem: Kohleaustieg 2035
EnerGas(2017)	Erneuerbare Gase: ein Systemupdate der Energiewende
ISE(2015)	Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050
BMU(2015)	Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht
BMWi(2015)	Modellgestützte Bewertung von Netzausbau im europäischen Netzverbund und Flexibilitätsoptionen im deutschen Stromsystem im Zeitraum 2020–2050
UBA-Pol(2013)	Politiksznarien für den Klimaschutz VI: Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030
UBA(2013)	Modellierung einer vollständigen auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen
BMU(2011)	Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: BMU Leitstudie 2011
SRU(2011)	Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung
EU (2011)	Energiefahrplan 2050
UBA(2010)	Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen

WWF(2009)	Modell Deutschland: Klimaschutz bis 2050
UBA-Pol(2009)	Politiksznarien für den Klimaschutz V: auf dem Weg zum Strukturwandel
BMU(2008)	Weiterentwicklung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas - Leitstudie 2008
UBA-Pol(2008)	Politiksznarien für den Klimaschutz IV: Szenarien bis 2030
UBA-Pol(2004)	Politiksznarien für den Klimaschutz Langfristszenarien und Handlungsempfehlungen ab 2012 (Politiksznarien III)

4 Übergeordnete Auswertung und Randbedingungen

Im folgenden Abschnitt werden die in Abschnitt 3 vorgestellten Studien anhand übergeordneter Parameter verglichen. Dazu wird zunächst auf allgemeine Eigenschaften zur Studiengrundlage eingegangen. Anschließend folgt eine Analyse der Szenariendefinitionen und eine Einteilung nach vordefinierten Charakteristika.

4.1 Rahmenbedingungen der verwendeten Studien

Die für diese Metaanalyse verwendeten Studien stammen aus den Jahren von 2004 bis 2021. Gerade in den letzten Jahren ist ein Trend bezüglich der Erstellung von Systemstudien zu beobachten. Mit stetig ambitionierteren Zielen bezüglich des Klimaschutzes, sowohl von Seiten der Politik zur Einhaltung der internationalen Klimaziele, als auch von Seiten der Bevölkerung. Dies, zusammen mit dem Fokus dieser Analyse auf aktuelle Studienergebnisse führt zu der in Abbildung 1-A zu sehenden Verteilung der Veröffentlichungszeitpunkte. Unabhängig vom Veröffentlichungsjahr liegt die Anzahl an betrachteten Szenarien meist zwischen 2 und 4, wobei in Einzelfällen bis zu 10 Szenarien für die jeweilige Analyse genutzt werden (vergleiche Abbildung 1-B). In Summe beinhaltet die Datengrundlage 192 Szenarien. Auf die Szenariendefinition wird in Abschnitt 4.2 genauer eingegangen.

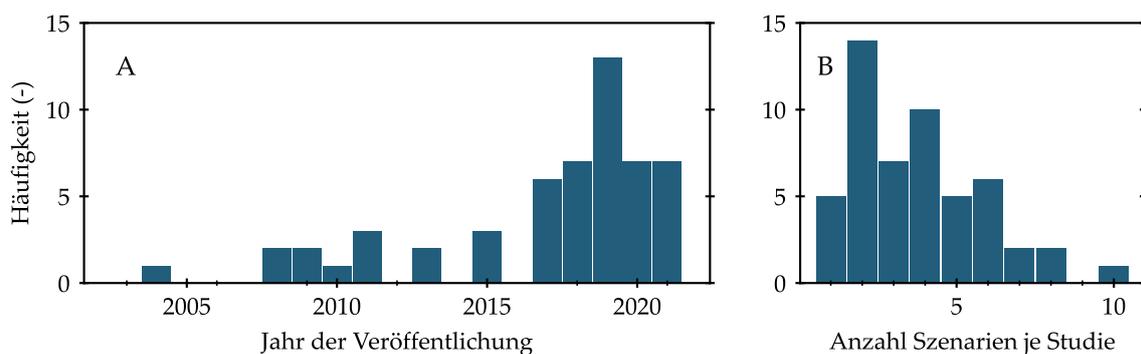


Abbildung 1 Verteilung der Veröffentlichungsjahre der verwendeten Studien (A), sowie die Verteilung der Szenarienzahl je Studie (B).

4.1.1 Auftraggeber

Energiesystemstudien werden, wie in Unterabschnitt 2.2 dargelegt, zur Unterstützung für verschiedene Entscheidungsprozesse genutzt. Je nach Auftraggeber können dabei allein durch die Fragestellung der Studie bereits implizit Annahmen getroffen werden, die die Ergebnisse beeinflussen können. Diese Annahmen können zum Beispiel aus Positionspapieren von Interessenverbänden entstammen oder aktuellen politischen Vorgaben entsprechen. Die Auftraggeber der Studien, die in dieser Analyse betrachtet werden, lassen sich in die folgenden Gruppen einteilen:

- Staatlich (z.B. BMWi, BMBF, UBA, BNetzA)
- Forschungseinrichtung (z.B. Fraunhofer, Agora, Universitäten)
- Interessensverband (z.B. WWF, BDI, BEE)
- Industrie (z.B. RWE, Shell)
- Privatperson (z.B. Nitsch)
- Partei (z.B. Bündnis 90/Die Grünen)

- Beratungsgremium (z.B. Sachverständigenrat für Umweltfragen)

Die Anteile der jeweiligen Gruppen als Auftraggeber sind in Abbildung 2-A abgebildet. Es zeigt sich, dass die Finanzierung der meisten Studien (über 80 %) durch staatliche Einrichtungen, Forschungsinstitute oder Interessenverbände erfolgt.

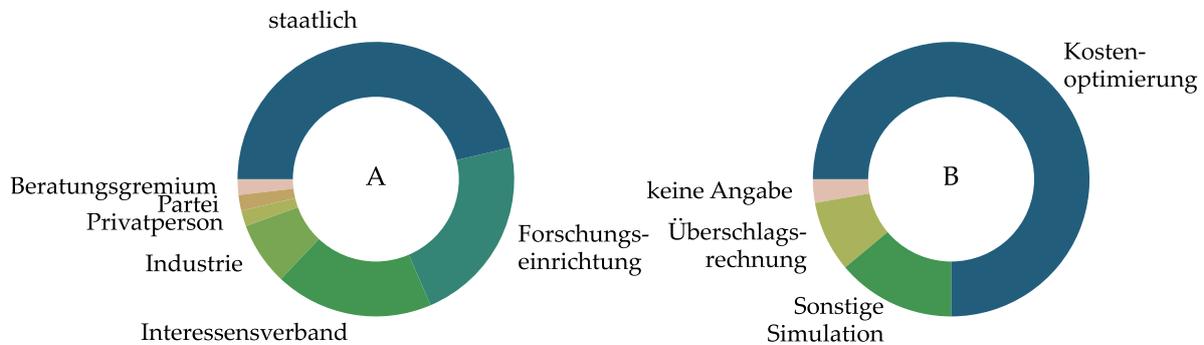


Abbildung 2 Kategorisierung der Auftraggeber (A) und Anteil der Modellierungsgrundlage (B) der betrachteten Energiesystemstudien.

4.1.2 Grundlage der Modellierung

Unabhängig vom jeweiligen Auftraggeber werden in den meisten Studien die Gesamtkosten des betrachteten Energiesystems als Optimierungsgrundlage genutzt. In Abbildung 2-B ist die Auswertung der Modellgrundlagen für einen Teildatensatz (Veröffentlichungsjahr ab 2017) abgebildet. Zu sehen ist, dass 75 % der betrachteten Studien den Ansatz der Kostenoptimierung wählen. Grund hierfür ist die Annahme, dass sich die zukünftige Entwicklung des Energiesystems stets auf marktwirtschaftliche Parameter zurückführen lässt. Die kosteneffizientesten Technologien werden sich durchsetzen. Gleiches gilt für den Teil der Studien, der unter *Sonstige Simulation* zusammengefasst ist. So basieren einzelne Simulation vereinfacht auf dem Merit-Order Prinzip. Weitere Ansätze sind Überschlagsrechnung, beispielsweise Input-Output Analysen auf Basis von Treibhausgas (THG) Emissionszielen.

Der weit verbreitete Ansatz der Kostenminimierung steht jedoch im Widerspruch zu Lund et al. die den simulativen Ansatz für demokratische Entscheidungsfindung bezüglich der zukünftigen Entwicklung von Energiesystemen als geeigneter einschätzen [24]. Hier sollte stets die Fragestellung der jeweiligen Studie berücksichtigt werden.

Eine detaillierte Analyse der jeweiligen Energiesystemmodelle und verwendeten Datenbanken beziehungsweise Softwarepakete ist nicht Teil dieser Metaanalyse. Grund hierfür ist unter anderem die sich stark unterscheidende Veröffentlichungspolitik der ausführenden Institute, die von nahezu keiner Information bis hin zur Veröffentlichung der Softwarepakete als Open Source reichen.

Zeithorizonte und zeitliche Auflösung Eine Gemeinsamkeit von nahezu allen Studien und somit allen Szenarien sind die betrachteten Stützjahre, das heißt die Jahre, für die die Entwicklung des Energiesystems bestimmt wird. Diese orientieren sich meist an den angestrebten Klimaschutzzielen der Bundesregierung. Die Jahre 2030 und 2050 sind somit die am meisten betrachteten Zeitpunkte. Zusätzlich verkürzen einige Studien die Abstände zwischen den Zieljahren auf fünf- oder zehnjährige Schritte. Unabhängig der verkürzten Entwicklungszeitschiene rücken die Jahre 2040 und 2045 vermehrt in den Fokus. Grund hierfür sind die kontinuierlich nach vorne verlegten Klimaschutzziele.

Die Stützjahre an sich werden meist, insbesondere bei den Optimierungs- und Simulationsansätzen, über einen Jahresverlauf betrachtet. Dabei ist eine gängige Zeitauflösung eine Stunde.

Zielvorgaben und Randbedingungen Neben der Abbildung der Technologien spielen insbesondere die Randbedingungen eine wichtige Rolle bei der Energiesystemsimulation oder -optimierung. Die Grenze zwischen Annahmen/Vorgaben und Ergebnissen ist dabei in Energiesystemstudien stellenweise nicht offensichtlich erkennbar. So kann die Vorgabe eines Treibhausgasemissionsziels in Form eines Limits fälschlicherweise als Ergebnis der Berechnung interpretiert werden.

Klassische Randbedingungen sind beispielsweise die Potenziale bezüglich des Ausbaus der erneuerbaren Energien, Verfügbarkeit von Biomasse, die Kosten von CO₂-Zertifikaten oder Emissionsziele. Gerade die häufigen Aktualisierungen des Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz) (EEG) bezüglich der Emissionsziele und der Ausbauziele der Erneuerbaren erfordern regelmäßige Updates von Energiesystemstudien, beziehungsweise erschweren den direkten Vergleich.

Ein Überblick über eine Auswahl an politischen Entscheidungen mit Einfluss auf Energiesystemstudien ist in Abbildung 3 dargestellt. Zusätzlich ist die Verteilung der Veröffentlichungsjahre der betrachteten Systemstudien abgebildet. Neben dem EEG und seinen Novellen haben insbesondere die Entscheidung zum Ausstieg aus der Atomkraft (13. Novelle des Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz) (AtG)), der Klimaschutzplan als Antwort auf das Pariser Abkommen und der Beschluss zur Beendigung der Kohleverstromung (Kohleausstiegsgesetz¹⁰). Eine Analyse der Umsetzungsgeschwindigkeit¹¹ von (politischen) Randbedingungen folgt in Abschnitt 4.2.

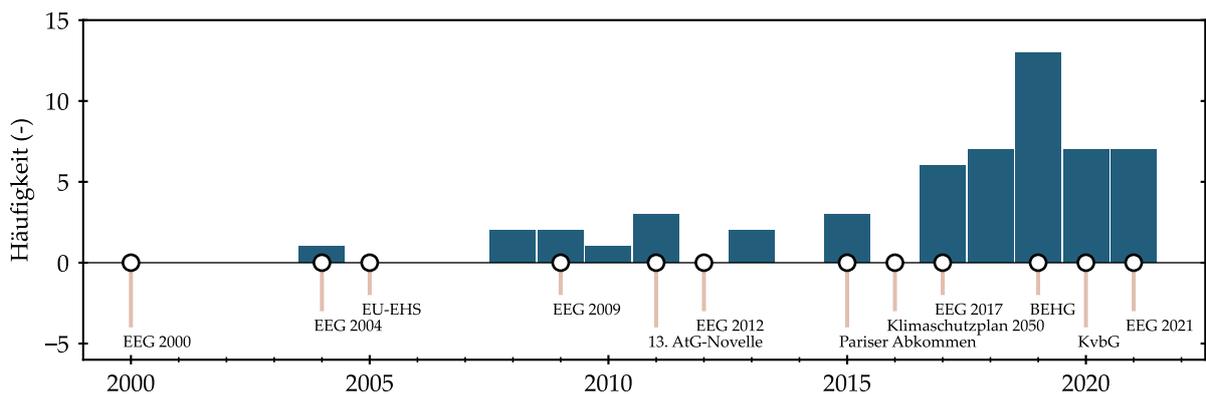


Abbildung 3 Darstellung der Veröffentlichungsjahre der Systemstudien sowie Kennzeichnung politischer Entscheidungen mit besonderer Relevanz für Systemstudien.

Grenzen der Simulation Wie in [5] dargelegt, muss bei der Simulation und Modellierung von Energiesystemen stets zwischen dem Detailgrad, sowie der Größe des Systems und den Anforderungen an die Simulationshardware und damit Rechenzeiten abgewogen werden.

Zu den am weitesten verbreiteten Annahmen beziehungsweise Vereinfachungen in Energiesystemmodellen zählen:

- **Kupferplatte**

Unter dem Begriff der Kupferplatte wird die Reduktion des Stromnetzes auf eine deutschlandweite, verlustfreie Übertragung von elektrischem Strom verstanden. Mittlerweile werden bereits Netzengstellen, beispielsweise das Nord-Süd-Gefälle, mit betrachtet. Eine detaillierte Abbildung des Stromnetzes an sich erfolgt jedoch wenn dann meist separat.

¹⁰Beinhaltet unter anderem das Kohleverstromungsbeendigungsgesetz – KvbG.

¹¹Zeit zwischen Bekanntwerden, beziehungsweise Inkrafttreten von politischen Entscheidungen und Anwendung als Randbedingung in Systemstudien.

- **Basisjahr**

Gerade der Einfluss des gewählten Basisjahres der Datengrundlage wird selten diskutiert. Bedarfskurven und Wetterfluktuationen sind jedoch starke Stellgrößen des Energiesystems, insbesondere mit Blick auf die Versorgungssicherheit in Dunkelflauten.

- **Ökobilanzierung**

Eine detaillierte Ökobilanzierung ist in nahezu keiner Studie enthalten. Die dafür benötigte Datengrundlage, sowie die Wechselwirkung zwischen dem übergeordnetem Energiesystem und Technologie-spezifischen Emissionen sind zum Teil nicht vorhanden oder sind nicht mit angemessenem Aufwand umsetzbar.

4.2 Definition der Szenarien und weitere Parameter

Der folgende Absatz dient der Auswertung der verwendeten Definitionen der Szenarien, sowie der eindeutigen Zuteilung aller Szenarien in Kategorien und die Verwendung weiterer Charakteristika zur späteren Beurteilung einzelnen Einflussgrößen.

4.2.1 Szenarien-Kategorien

Ein Vergleich mehrerer Systemstudien offenbart das weit verbreitete Vorgehen bezüglich des Studienaufbaus, stets ein Referenz- beziehungsweise Trend-Szenario als Basis zu verwenden. Von diesem Szenario abweichend können dann wechselnde Randbedingungen diskutiert werden. Basierend auf dieser Erkenntnis, werden fünf Szenariokategorien definiert. Die Einteilung zu einem der im Folgenden definierten Kategorien ist eindeutig und wird für alle Szenarien vergeben.

- **Trend:**

Trend Szenarien basieren auf der Fortschreibung aktueller politischer und rechtlicher Maßnahmen in die Zukunft. Es werden daher weder zusätzliche Ausbauziele noch sonstige weiterführende Randbedingungen auf das Modell aufgeprägt. „Aktuell“ definiert hier meist die Maßnahmen, die zum Zeitpunkt der Erstellung der Studie aktuell gelten.

- **Referenz:**

Der Begriff Referenzszenario wird allgemein zur Beschreibung von Szenarien verwendet, die als Basis eines weiterführenden Vergleichs verwendet werden. Oft werden moderate Entwicklungen für die Zukunft angenommen, wodurch Trend Szenarien meist als Referenz verwendet werden.¹²

- **Ambitioniert:**

Mit ambitionierten Szenarien sind Szenarien gemeint, die über die derzeit geltenden politischen Maßnahmen hinausgehen. In den meisten Fällen sind das eine schnellere beziehungsweise stärkere Reduktion von Treibhausgasemissionen oder ein beschleunigter Zubau von erneuerbaren Energien. Damit können aber auch gesellschaftliche Aspekte gemeint sein, wie ein Wertewandel hin zu energiesparenden Verhaltensweisen.

- **Gering ambitioniert:**

Gering ambitionierte Szenarien stellen im Vergleich zu den ambitionierten genau das Gegenteil dar. Klimaschutzziele werden insgesamt niedrig priorisiert. Es werden beispielsweise die geltenden Klimaschutzmaßnahmen fallengelassen beziehungsweise verfehlt. Auch wird hier mögliche gesellschaftliche Inakzeptanz gegenüber Sparmaßnahmen oder einzelnen Technologien betrachtet.

¹²Ist eine Zuteilung sowohl zu Trend als auch zu Referenz möglich, wird die Trendkategorie verwendet.

- **Sonstige:**

Falls ein Szenario keiner der vier genannten Kategorien zugeschrieben werden kann, wird es als sonstiges Szenario eingestuft.

Die Einteilung der Szenarien entsprechend der definierten Kategorien ergibt die in Abbildung 4 gezeigte Verteilung. Hier spiegelt sich die mittlere Anzahl an Szenarien je Studie wieder. So wird etwa ein Viertel bis ein Drittel den Trend- und Referenzszenarien zugeordnet und drei Viertel bis zwei Drittel sonstigen Kategorien.

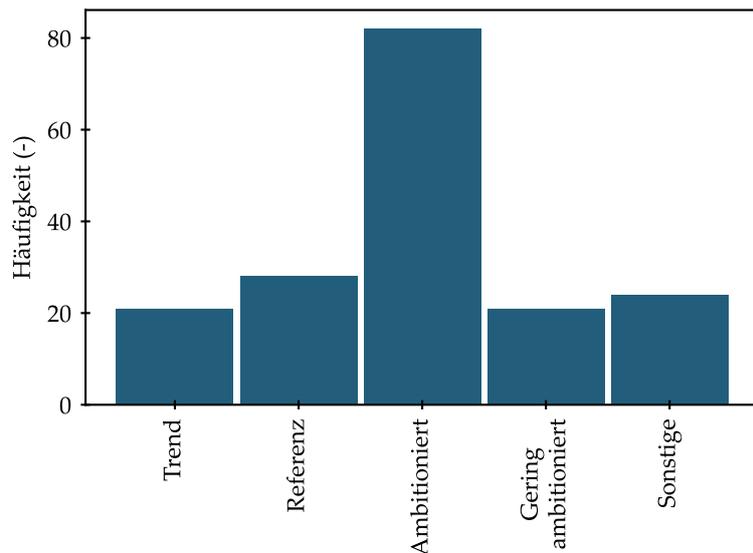


Abbildung 4 Einteilung der Szenarien in eindeutige Kategorien.

4.2.2 Weitere Charakteristika

Im Gegensatz zu den oben vorgestellten Szenariokategorien, ist die Zuteilung von weiteren Charakteristika nicht zwingend, ebenso ist eine mehrfach Zuteilung möglich und auch gewünscht. Unterscheiden lässt sich die Zuteilung der Charakteristika in zwei Gruppen. Erstere fasst alle Charakteristika zusammen, welche durch das Zutreffen oder Nicht-Zutreffen der jeweiligen Eigenschaft erfolgt. Zweitere verfügen über eine dreistufige Einteilung, in schwache, mittlere und starke Ausprägung.

Zur ersten Gruppe zählt die Betrachtung des Kohleausstiegs bis 2038, die grundsätzliche Berücksichtigung von Kernkraft sowie das explizite Einhalten der Treibhausgasemissionsziele nach dem Klimaschutzplan 2050, aufgeteilt in mindestens 80 % beziehungsweise mindestens 95 % Reduktion gegenüber den Emissionen in 1990. In Abbildung 5 ist der kumulative Verlauf der Berücksichtigung einzelner politischer Randbedingungen dargestellt. Während die explizite Betrachtung des Kohleausstiegs (Abbildung 5-A) erst in neueren Studien berücksichtigt wird, bei diesen jedoch nahezu vollständig, ist die Betrachtung möglicher Nukleartechnik im zukünftigen deutschen Energiesystem bereits seit einiger Zeit ausgeschlossen (Abbildung 5-B). Bezüglich des Zielkorridors der Treibhausgasemissionsreduktion nach dem Klimaschutzplan 2050 (80 % bis 95 %) zeigt sich, dass die Berücksichtigung des Minimalziels von 80 % in den letzten Jahren nahezu vollständig umgesetzt wurde, die obere Grenze des Korridors, beziehungsweise 100 % Treibhausgasneutralität erst seit zwei Jahren Anwendung findet. Dies zeigt die zeitversetzte Anwendung der in folge politischer Entscheidungen veränderten Randbedingungen. Auch wenn bereits seit Längerem Studien zur vollständigen Treibhausgasneutralität des deutschen Energiesystems vorliegen, so werden die aktuellen Anpassungen erst in naher Zukunft vollständig als Referenz in der Studienlandschaft umgesetzt sein.

Bezüglich der zweiten, dreistufigen Charakterisierung ist grundsätzlich die Verwendung einer Vielzahl an Charakteristika zur Beschreibung der Szenarien in Energiesystemstudien möglich. Im

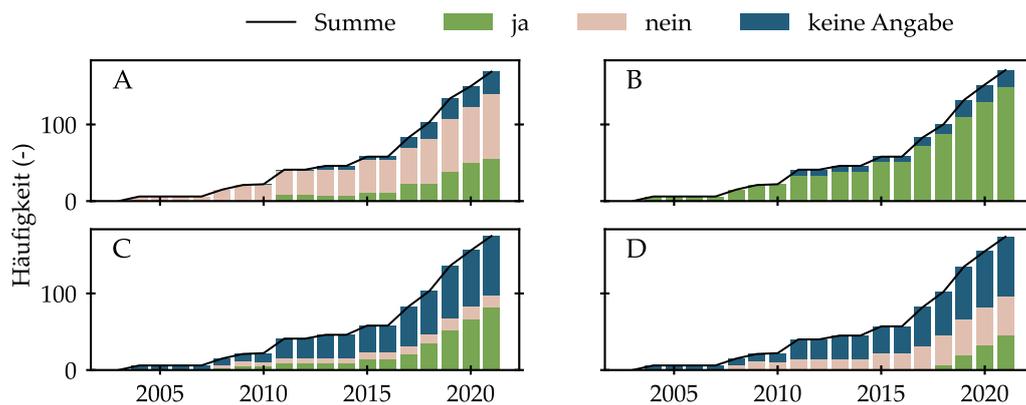


Abbildung 5 Anzahl der Szenarien mit Berücksichtigung des (Stein-) Kohleausstiegs (A), Atomausstiegs (B) und der Einhaltung der 80 %-igen Treibhausgasreduktion (C) beziehungsweise 95 %-igen Treibhausgasreduktion (D) bis 2050.

Rahmen dieser Arbeit wird ein Satz an Charakteristika genutzt, der nach erster Sichtung der Studien zu einer guten Datengrundlage führt und damit eine möglichst eindeutige Zuteilung der jeweiligen Ausprägung ermöglicht. Folgende Auflistung zeigt die Auswahl der Charakteristika:

- **Gesellschaft:** Gesellschaftliche Akzeptanz und Unterstützung
- **Ambition:** Ambitionsniveau der Klimaschutzmaßnahmen
- **Sicherheit:** Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Annahmen
- **Netz:** Flexibilität der inländischen Übertragung
- **Handel:** Rolle von EU-weitem Import/Export
- **Offenheit:** Grad der Vorherbestimmtheit des zukünftigen Energiesystems
- **Sektorenkopplung:** Grad der Elektrifizierung im Wärme- und Mobilitätssektor
- **Geschwindigkeit:** Umsetzungsgeschwindigkeit der energiepolitischen Maßnahmen

Jedes Studien-erstellende Institut verfasst die Beschreibung ihrer jeweiligen Szenarien im eigenen Wortlaut, folglich ist keine einheitliche Szenariendefinition studienübergreifend vorhanden. Für die Einteilung ist somit eine detaillierte Herausarbeitung aller Szenariendefinitionen nötig, mit abschließendem Abgleich bezüglich Definition und Ausprägung der Charakteristika. In Tabelle 3 ist eine erweiterte Übersicht über die Charakteristika so wie die Definitionen der jeweiligen Ausprägungen gegeben. Die Aufteilung wird aufgrund des erhöhten Arbeitsaufwandes nur für einen Teildatensatz durchgeführt, wobei die Ergebnisse der Einteilung in den separat veröffentlichten Zusatzinformationen zu finden sind. Die in Unterabschnitt 5.5 gezeigten Auswertungen basieren folglich nur auf einem Teil der zuvor präsentierten Studien.

Tabelle 3 Übersicht und Definition der verwendeten Szenarien-Charakteristika mit Aufteilung in starke, mittlere und schwache Ausprägung.

	stark (+)	mittel (o)	schwach (-)
Ambition	Erhöhtes Ambitionsniveau; Klimaziele werden übertroffen oder früher erreicht als politisch gewünscht	politische Mindestvorgaben zur THG Reduktion gerade erfüllt, keine Ambition darüber hinaus (Reduktion um 55 % bis 2030; 80 % bis 95 % bis 2050)	Fortschreibung der Energiewirtschaft ohne (politische) Klimaschutzmaßnahmen; THG Reduktion bleibt hinter Zielvorgaben zurück
Gesellschaft	Verhaltensänderung hin zu stärkerem Klimaschutz; sparsamer Energieverbrauch und Suffizienz; aktive Unterstützung der Energiewende (auch im privaten Bereich)	Gesellschaftliche Akzeptanz der Maßnahmen, kein Widerstand gegen Ausbau von Erneuerbare Energien (EE); Technologieentwicklungen werden nicht behindert; passive Unterstützung der Energiewende	Gesellschaftlicher Widerstand ggü. Ausbau von EE Infrastrukturen; technisches Potential kann nicht ausgenutzt werden; NIMBY-Effekt ¹³
Sicherheit	Annahmen eher konservativ, bauen auf bereits zu erkennenden Trends auf; Wirkung und Durchsetzung der Technologien theoretisch untermauert; Innovativität eher gering	Angenommene technologische Entwicklungen ohne explizite theoretische oder bereits jetzt absehbare Basis; Erreichung der Klimaziele basiert auf relativ hohen angenommenen Fortschritten	Wirkung oder Durchsetzbarkeit einer bestimmten Maßnahme (in der Theorie) kritisiert oder umstritten, bspw. Carbon Capture and Storage (CCS); geht einher mit hoher angenommener Innovativität
Netz	ideal ausgebautes inländisches Stromnetz, unabhängig von Übertragungsrestriktionen (engpassfrei); endogen bestimmter Netzausbau	Ausbau nach Netzentwicklungsplan; hoher, aber exogen beschränkter Netzausbau	beschränktes innerdeutsches Stromnetz; geringer Netzausbau
Handel	hoher Ausbau von Kuppelkapazitäten zu Nachbarländern/hohe Handelsaustauschmengen	moderater Ausbau der europäischen Kuppelkapazitäten (nach ENTSO-E o.ä.)	geringe Vernetzung mit europäischem Ausland; kein Ausbau der Handelskapazitäten
Offenheit	Entwicklung sämtlicher Technologien und Energieträger offen, modellendogene Berechnung	Einzelne Maßnahmen (wie synthetisch erzeugte Energieträger) ausgeschlossen oder eingeschränkt, Gesamtsystem dabei offen	strenge Ausbauvorgaben, Zusammensetzung des Strommixes stark vorherbestimmt (exogene Vorgabe)

¹³NIMBY: not in my backyard

Geschwindigkeit	hohe Umsetzungsgeschwindigkeit; früheres Erreichen der Ziele zum Klimaschutz, weitere Reduktion der kumulierten THG Emissionen	moderate Umsetzungsgeschwindigkeit	spätes Einsetzen der Maßnahmen; gegebenenfalls Verfehlen der Klimaziele in früheren Dekaden
Sektorenkopplung	starke Elektrifizierung sowohl des Wärme- als auch des Mobilitätssektors; effiziente Power-to-X Technologien, viele neue Stromverbraucher (direkte Stromnutzung)	schwache Sektorenkopplung; geringe Elektrifizierung und/oder Fokus auf einen der beiden Sektoren (Wärme/Mobilität); ineffiziente Sektorenkopplung (wenig direkte Stromnutzung)	keine oder stark eingeschränkte Elektrifizierung des Wärme- oder Mobilitätssektors, Vernachlässigung von Power-to-X

5 Diskussion der Studienergebnisse

Im Folgenden werden nun die Ergebnisse der Metaanalyse dargestellt. Dazu werden zunächst in Unterabschnitt 5.1 die erwarteten Trends klassischer Energiesystemparameter sowie die Nutzung erneuerbarer Energien und Flexibilitätsoptionen vorgestellt. Unterabschnitt 5.2 und Unterabschnitt 5.3 beschäftigen sich darauf folgend mit der Nutzung nachhaltiger Energieträger beziehungsweise der Nutzung konventioneller Kraftwerke während der Energiewende. Um die Aussagekraft von Energiesystemstudien zu bewerten werden in Unterabschnitt 5.4 ältere Studien den tatsächlichen historischen Verläufen, sowie neueren Studien gegenübergestellt. Das Kapitel schließt mit einer zusammenfassenden Diskussion zum Einfluss von Szenariendefinitionen und Randbedingungen in Unterabschnitt 5.5 und einer Korrelationsanalyse in Unterabschnitt 5.6.

Wenn nicht anders gekennzeichnet, entstammen die verwendeten historischen Werte in den in diesem Kapitel gezeigten Grafiken [3, 25, 26]. Für die Auswertungen in den Abschnitten 5.1, 5.2 und 5.3 werden wenn nicht anders gekennzeichnet nur Studien ab 2017 verwendet. Zur Grafischen Darstellung wird die Gesamtheit der zu Verfügung stehenden Daten als schattierte Fläche (Spannweite der Datengrundlage) abgebildet. Zusätzlich wird der Median der Daten und das Interquartil¹⁴ verwendet, um die Trends der Studien zu veranschaulichen.

5.1 Vorstellung allgemeiner Trends

Der Abschnitt zu den Allgemeinen Trends bezüglich der erwarteten Entwicklungen des deutschen Energiesystems ist untergliedert in die Themenabschnitte:

1. Nachfrage und Emissionen
2. Erneuerbare Energien
3. Flexibilität und Speichersysteme
4. Kostenentwicklungen

5.1.1 Nachfrage und Emissionen

Für die Beschreibung des allgemeinen Verhaltens des Energiesystems während der Energiewende im betrachteten Zeitraum von 2020 bis 2050 werden zunächst die Parameter Bruttostromverbrauch (BSV) und THG betrachtet.

Bruttostromverbrauch Gerade mit Bezug auf den Energiesektor wird meist zunächst der Stromsektor genannt. Mit Hinblick auf die Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Mobilität, sowie der Zunahme an Strom-basierten Syntheserouten in der chemischen Industrie und Elektrifizierung weiterer Industrieanwendungen ist eine wachsende Nachfrage an elektrischer Energie zwangsweise gegeben. Die Berücksichtigung des entsprechend größeren BSV in Deutschland wird von den untersuchten Studien in unterschiedlichem Maße berücksichtigt. In Abbildung 6 ist der historische Verlauf des BSV, sowie die Spannweite der in den Studien erwarteten Entwicklung dessen abgebildet. Während in jüngeren Jahre nach 2020 noch teilweise ein Rückgang des BSV angenommen wird, zeigt sich spätestens ab 2030/2040, dass die Elektrifizierung zu einem enormen Zuwachs des Strombedarfs führen wird. Während der Median, insbesondere aufgrund konservativer Studien, lediglich auf etwa 700 TWh in 2050 ansteigt, gehen Szenarien mit hoher Elektrifizierung beziehungsweise hoher inländischer Power-to-X Produktion von 1000 TWh und mehr aus. Neuere Schätzungen des BMWK¹⁵ berücksichtigen die erwarteten Trends und liegen für 2030 bereits im oberen Viertel der Datenwolke.

¹⁴Bereich zwischen dem oberen und unteren Quartil. Das heißt die inneren 50 % der vorhanden Daten.

¹⁵Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch BMWi.

Die große Spreizung der Werte gerade im Bereich 2040 bis 2050 liegt insbesondere daran, dass einzelne Studien nur den konventionellen Strombedarf berücksichtigen. Hierunter fallen alltägliche Anwendungen wie Licht, Kommunikation und IT. Ebenfalls ist in einzelnen Studien der aktuelle Strombedarf für den öffentlichen, rein elektrischen Schienenverkehr bereits enthalten. Szenarien, die im Gegensatz dazu eine fortschreitende/vollständige Elektrifizierung und/oder großskalige inländische Power-to-X Anwendungen annehmen, fordern entsprechend einen deutlich höheren zu deckenden Bedarf an elektrischer Energie.

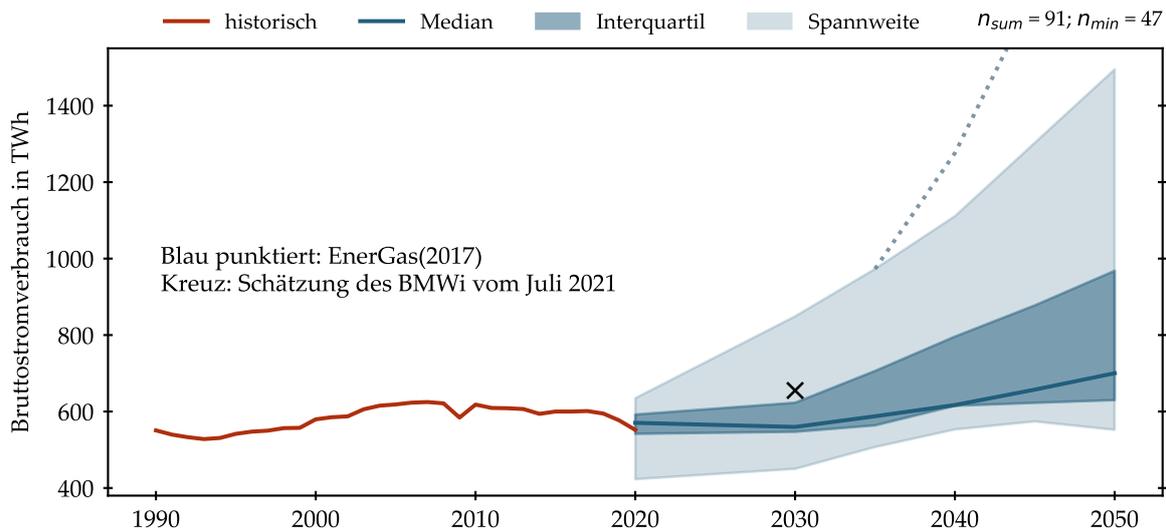


Abbildung 6 Entwicklung des Bruttostromverbrauchs inklusive des historischen Verlaufs.

Treibhausgasemissionen Übergeordnetes Ziel der meisten Studien ist und bleibt der Klimaschutz und damit die Reduktion der THG. Die angestrebten Ziele der Bundesregierung wurden in den letzten Jahren mehrfach verschärft und liegen aktuell nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)¹⁶ bei einer angestrebten Netto THG Neutralität bis 2045 und negative THG Emissionen bis 2050. In Abbildung 7 sind im Vergleich dazu die THG Emissionen Deutschlands im historischen Verlauf, sowie die erwartete Entwicklung bis 2050 aufgetragen. Da die Großzahl der Studien vor dem neuesten Beschluss der Bundesregierung erstellt und veröffentlicht wurden, muss die Grafik entsprechend dem bis dahin geltenden Zielkorridor von 80 % bis 95 % Emissionsreduktion in 2050 bewertet werden. Mehr als die Hälfte der Studien erreicht dabei bereits das Ziel der 95 % Reduktion. Das untere Viertel der Spannweite ist auf Trend und gering ambitionierte Szenarien zurückzuführen. Unter den ambitionierten Szenarien erreichen die ersten bereits 2045 die THG Neutralität und negative Emissionen bis 2050, wobei es sich hierbei um ein Klimaneutralitätsszenario handelt, welches explizit die aktuellen Ziele der Bundesregierung einschließt.

Gerade bei den THG muss hierbei noch darauf hingewiesen werden, dass die Emissionen oft als Ziel der Simulation oder Optimierung vorgegeben werden. Die Fragestellung der Studien ist daher nicht die Machbarkeit an sich, sondern welcher Technologiemitmix für das Erreichen der Ziele benötigt wird. Ein weiteres Vorgehen ist die Vorgabe von beispielsweise CO₂-Preisen, um zu bestimmen, wie sich die THG Emissionen unter einem Satz an angenommenen Randbedingungen entwickeln könnten. Die Auswertung zeigt daher eine Mischung aus beiden Ansätzen. Eine ausführliche Betrachtung des Einflusses wechselnder Randbedingungen folgt in Unterabschnitt 5.5.

Mit Blick auf die Energiewirtschaft (Abbildung 8) zeigt sich, das bekannte Bild, dass die größten Schwierigkeiten einer klimaneutralen Volkswirtschaft nicht in der THG neutralen Stromerzeugung

¹⁶Stand Juni 2021

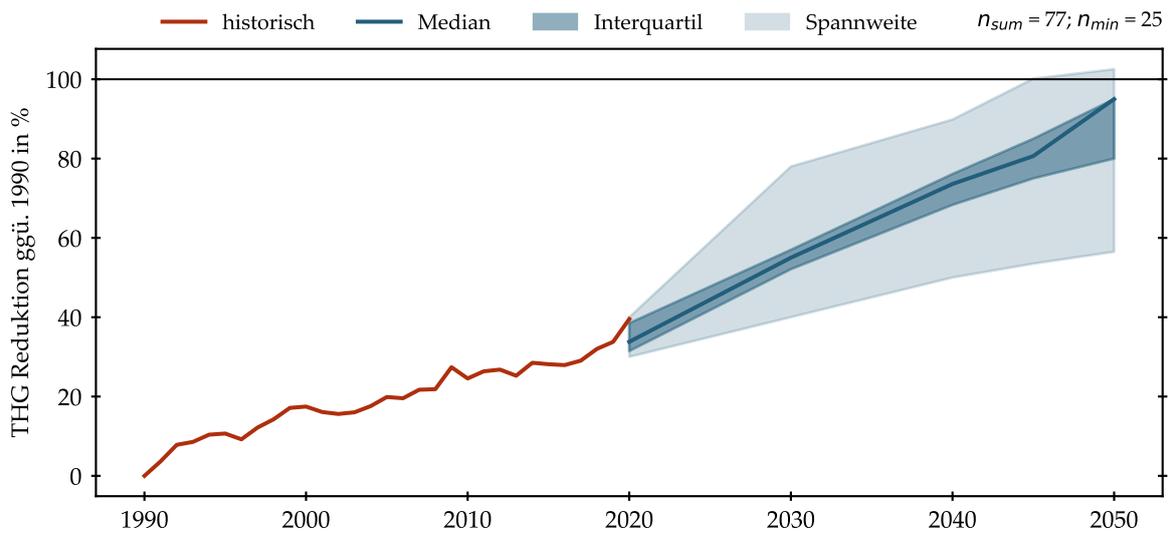


Abbildung 7 Relative Reduktion der Treibhausgasemissionen bezogen auf das Jahr 1990 inklusive dem historischen Verlauf.

liegen, sondern in den Sektoren Wärme, Mobilität und Industrie. Den nicht repräsentativen Wert in 2020 ausgeschlossen, deckt sich der Trend der letzten Jahre ab etwa 2015 mit dem erwarteten Verlauf nach 2020 aus den Systemstudien. Erste Szenarien gehen bereits für 2035 von einer THG-neutralen Energiewirtschaft aus und nahezu alle ambitionierten Szenarien (etwa 50 %) erwarten dies bis spätestens 2050.

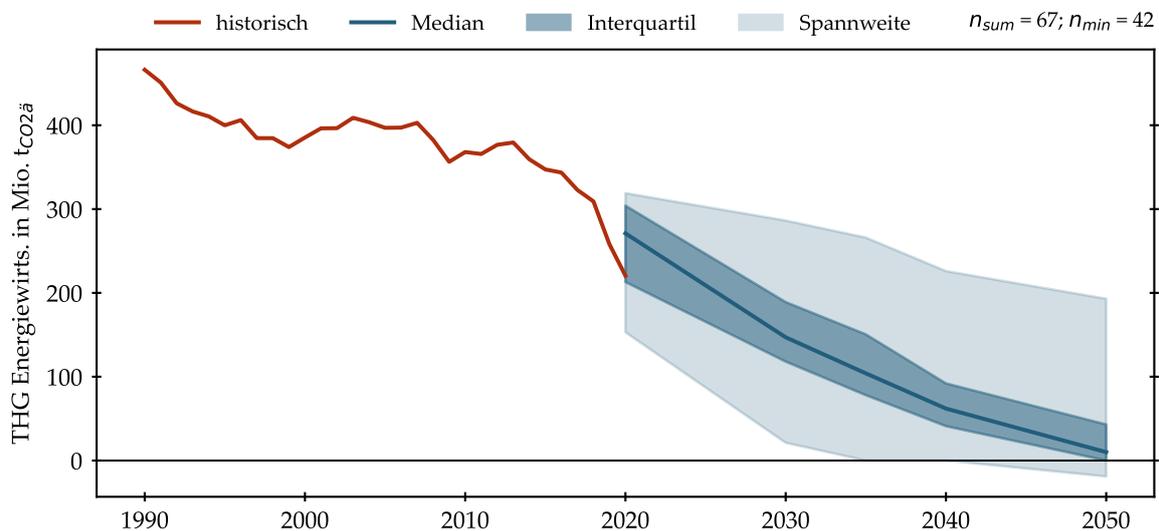


Abbildung 8 Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft inklusive dem historischen Verlauf.

Als eine der größten Stellschrauben für eine Reduktion der THG Emissionen wird der Einsatz von CO₂-Zertifikaten gesehen. Marktwirtschaftlich getriebene Energiesysteme werden stets auf hohe Kosten mit alternativen Technologien reagieren. In Abbildung 9 ist daher der angenommene Verlauf der CO₂-Zertifikatspreise gezeigt. Nach einem langsamen Anlaufen der Preisentwicklung zu Beginn des Handelssystems zeigen sich nun in den letzten Jahren die ersten kostenerhöhenden Effekte. Insbesondere im Frühjahr 2022 wurden die Zertifikate deutlich über den erwarteten Preisen gehandelt.

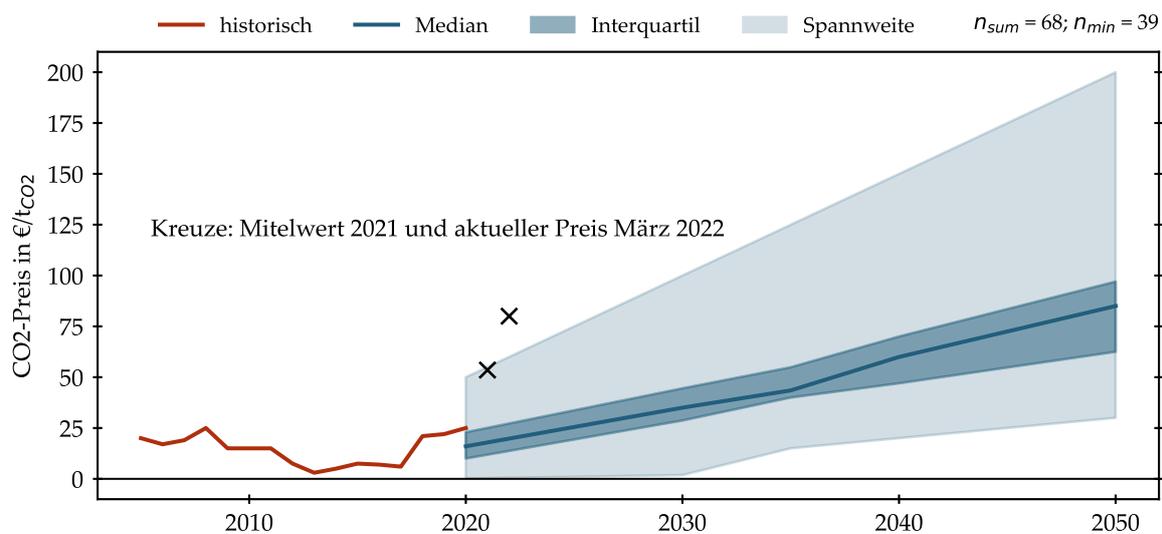


Abbildung 9 Preisentwicklung der CO₂-Zertifikate inklusive dem historischen Verlauf.

5.1.2 Erneuerbare Energien

Die Stromerzeugung der EEs wird zum größten Teil aus Photovoltaik (PV) und Onshore beziehungsweise Offshore Windenergieanlage (WEA) bereitgestellt. Zusätzlich verfügt das deutsche Energiesystem über Wasserkraftanlagen und Biomasse-basierte Technologien, sowie geringe Leistungen an Geothermiekraftwerken. In Abbildung 10 ist die historische, sowie die in den Studien erwartete Entwicklung der installierten Leistung an erneuerbaren Energien abgebildet. Auf die einzelnen Technologien wird im Folgenden eingegangen.

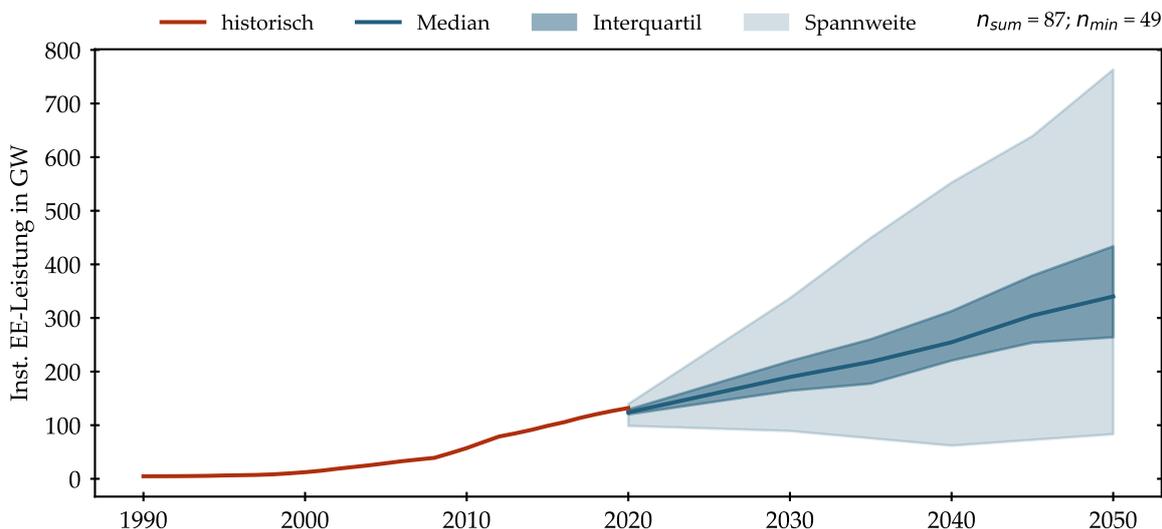


Abbildung 10 Entwicklung der installierten Leistung an erneuerbaren Energien inklusive dem historischen Verlauf.

Photovoltaik Abbildung 11 zeigt den historischen Anstieg der installierten PV Leistung in Deutschland sowie die Spannweite der in den Studien erwarteten Entwicklung. Zunächst fällt auf, dass das Interquartil gegenüber der gesamten Spannweite nur einen vergleichsweise kleinen Korridor abdeckt.

So wird von der Hälfte aller Szenarien eine PV-Leistung in 2050 zwischen 100 und 200 GW erwartet, während das Maximum über 600 GW liegt. Nicht abgebildet sind die Szenarien aus EnerGas(2017). Zielsetzung in dieser Studie ist eine maximale Elektrifizierung, beziehungsweise eine eins zu eins Ersetzung fossiler Einsatzstoffe durch Power-to-X Produkte, was zu installierten PV Kapazitäten von 810 beziehungsweise 1056 GW in 2050 führt. Neben EnerGas(2017) zeigen auch weitere Studien mit hoher Elektrifizierung oder hohem Anteil an innerdeutscher Power-to-X Anwendung und Selbstversorgung einen großen Bedarf an erneuerbaren Energien, beziehungsweise PV Kapazität im speziellen. Dargestellt in Abbildung 11 sind dazu Szenarien aus den Studien ISE(2020), Agora(2020) und WWF(2019). Während letztere nur einzelne Szenarien mit überdurchschnittlichem Ausbaubedarf beinhalten, liegen alle Szenarien aus ISE(2020) im oberen Viertel der Spannweite. Die höchsten Bedarfe entstammen dabei den Szenarien mit geringster Ambition, beziehungsweise dem größten Gesellschaftlichen Widerstands gegenüber neuen Technologien, großen Infrastrukturprojekten oder Energiesparmaßnahmen. Gleiche Klimaziele, hier repräsentiert durch das Einhalten der CO₂ Emissionsziele, führen zu größerem Bedarf an zu installierenden Leistungen und damit zu höheren Kosten. Das andere Extrem geringer PV Kapazitäten in 2050 basiert auf Szenarien wie dem Referenz oder restriktionsarmen Szenario aus BMWi(2018). Hier werden keine oder nur minimale Klimaziele vorgegeben. Als Ergebnis wird kostenoptimal und ohne Rücksicht auf mögliche Emissionen der Ausbau an erneuerbaren Energien nur bedingt genutzt und weiter auf fossile Technologien gesetzt. Mit Blick auf die Pläne der aktuellen Bundesregierung bezüglich des neuen Ausbauplans der erneuerbaren Energien zeigt sich, dass der Median, sowie das ganze Interquartil noch unterhalb der ambitionierten Ziele aus [27] liegt. Hier werden allein bis Ende 2030 über 100 GW an weiterer PV Leistung angestrebt.

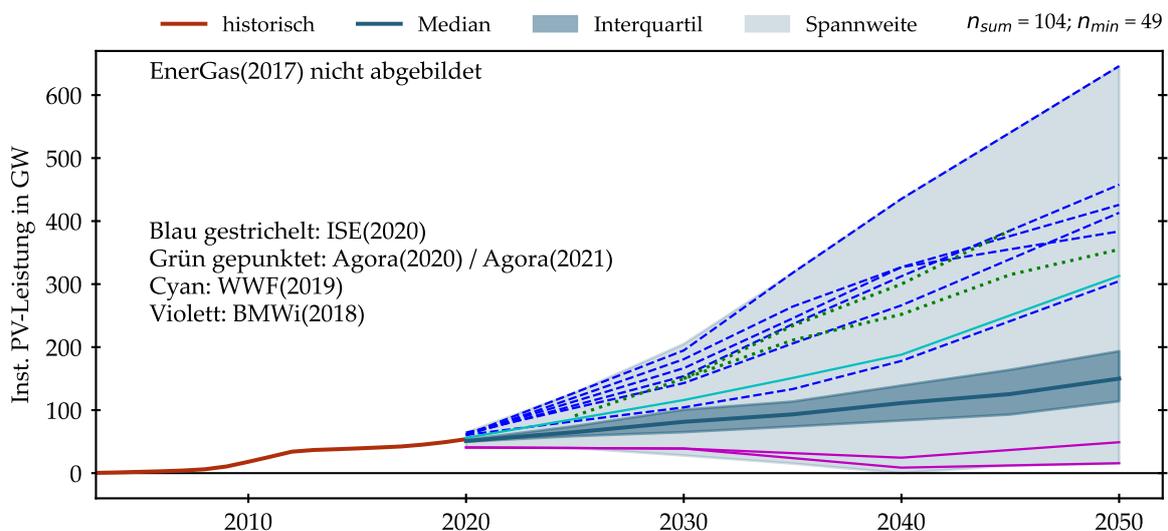


Abbildung 11 Entwicklung der installierten Photovoltaikleistung inklusive dem historischen Verlauf. Einzelne Studien sind separat farblich gekennzeichnet.

Windenergie Abbildung 12 zeigt neben dem historischen Verlauf der installierten WEA-Leistung in Deutschland auch den erwarteten summierten Zubau an WEA (12-A), sowie aufgeteilt den Zubau Onshore (12-B) und Offshore (12-C). Der bekannt stagnierende Ausbau der letzten Jahre wird in den meisten Studien als IST-Zustand für 2020 verwendet, die gesamte Spannweite zeigt im Vergleich zum PV Ausbau einen deutlich schmaleren Verlauf, wobei den Extremwerten die gleichen Studien zugrunde liegen.

Verglichen mit den neuen Ausbauzielen zeigt insbesondere das Jahr 2030 das Ambitionsniveau der Bundesregierung [27]. So sollen bis 2030 30 GW und bis 2045 70 GW an Offshore WEA installiert sein, wohingegen innerhalb der Systemstudien im Median nur 15 GW, beziehungsweise 55 GW erwartet

werden. Für 2045 liegt das Ausbauziel sogar außerhalb der gesamten Spannweite. Der abfallende Trend innerhalb des Offshore Zubaus ab 2045 ist auf die Studie Con(2021) zurückzuführen. Die Kostenannahmen führen dazu, dass ausschließlich Onshore WEA und PV genutzt werden, wodurch neun von zehn Szenarien keine Offshore Kapazitäten in 2050 aufweisen. Auch für die Onshore WEA sind die neuen Ausbauziele im oberen Viertel der durch die Studien erwarteten Spannweite anzuordnen. Der geplante jährliche Zubau von bis zu 10 GW a^{-1} bis 2035 steht hier im starken Kontrast zu einem mittleren erwarteten Zubau von 2 bis 3 GW a^{-1} , basierend auf dem Median der Studien.

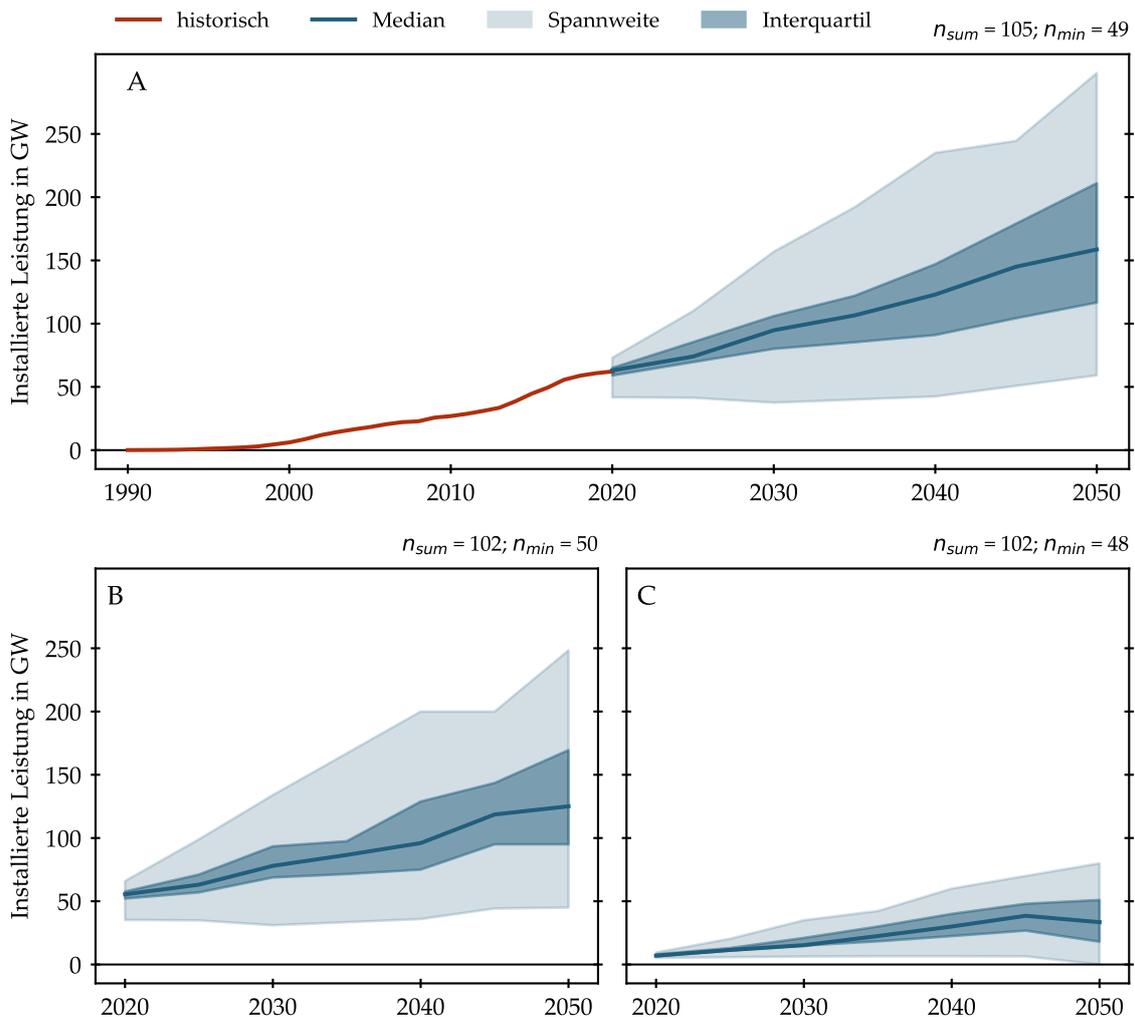


Abbildung 12 Installierte Windenergieanlagen Leistung in Summe inklusive dem historischen Verlauf (A), nur Onshore Windenergieanlage (B) und nur Windenergieanlage Offshore (C).

Bezüglich der Weiterentwicklung der Windkrafttechnologien, wird in nahezu allen Studien von einer Zunahme der Volllaststunden sowohl an Land, als auch auf See ausgegangen (Tabelle 4). So soll im Mittel durch den Einsatz von Schwachwindanlagen die Ausbeute an Land von etwa 1900 h a^{-1} in 2020 auf etwa 2300 h a^{-1} in 2050 zunehmen. Auch bei den Offshore WEA wird eine Steigerung der Volllaststunden von 3875 h a^{-1} in 2020 auf über 4200 h a^{-1} in 2050 erwartet.

Gerade die geringsten installierten Kapazitäten an WEA entstammen Szenarien, in welchen der gesellschaftliche Widerstand gegen den WEA Ausbau, beziehungsweise allgemein gegen Baumaßnahmen in der eigenen Umgebung, stark ausgeprägt ist. Die Akzeptanz von WEA wird in einigen Studien gegenüber derer für PV als deutlich geringer eingestuft, was den nötigen politischen Aufwand mit Blick auf die Einbeziehung der Bevölkerung verdeutlicht. Allein politisch vorgegebene

Tabelle 4 Berechnete Volllaststunden der Windenergieanlagen Onshore und Offshore, basierend auf dem Median der installierten Kapazitäten und der bereitgestellten elektrischen Energie.

	Einheit	2020	2030	2040	2050
WEA Onshore	h a ⁻¹	1904	2100	2303	2297
WEA Offshore	h a ⁻¹	3875	4133	4275	4225

Ziele werden nicht ausreichen, um die Klimaziele zu erfüllen. Der Wandel muss verstärkt durch die Bevölkerung mitgetragen werden.

Sonstige Erneuerbare Im Vergleich zu den installierten Kapazitäten an PV und WEA sind die Kapazitäten von Biomasse¹⁷ und Wasserkraft deutlich geringer. Die Mediane der erwarteten Leistungen der beiden Technologien sind in Tabelle 5 aufgelistet. In beiden Fällen wird von einem konstanten Trend ausgegangen. Grund hierfür ist zum einen, dass der weitere Ausbau an Wasserkraftanlagen, sowohl Fließwasser- als auch Stauwasserkraftwerke, durch den benötigten Eingriff in die Natur mit dem Naturschutz konkurriert. Aus diesem Grund wird in den Studien meist nur von einem technologischen Update ausgegangen, jedoch von keinen Neubauten. Im Fall der Biomasse ist insbesondere die Konkurrenz zu anderen Anwendungsfeldern Grund für die Annahme keiner weiteren nennenswerten Leistungszunahme, beziehungsweise der Abnahme an elektrischer Leistung basierend auf biogenen Einsatzstoffen. Die nicht weiter aufgeführte Nutzung von Geothermie liegt an der limitierten Eignung¹⁸ zur großtechnischen Stromerzeugung. Die geothermischen Potenziale in Deutschland werden in erster Linie zu Wärmebereitstellung verwendet.

Tabelle 5 Median der erwarteten installierten Leistungen an Wasserkraft und Biomasse-basierter Stromerzeugung, sowie Geothermie.

		[3, 28]	Studien			
	Einheit	IST- Zustand 2020	2020	2030	2040	2050
Wasserkraft	GW	5,3	5,0	5,0	5,6	4,9
Biomasse	GW	8,0	8,7	6,6	6,0	6,0
Geothermie*	MW	47	-	-	-	-

*Ausschließlich Geothermiekapazitäten zur Stromerzeugung.

5.1.3 Flexibilität und Speichersysteme

Gerade durch die Reduktion der installierten konventionellen Kraftwerksleistung wird dem deutschen Energiesystem einiges an flexibler Leistung genommen. Neben dem Betrieb von Gaskraftwerken (dazu mehr in Unterabschnitt 5.3) und Technologien zur Sektorkopplung, sind insbesondere Speichertechnologien und die Möglichkeit des Im- und Exports von Strom wichtige Mechanismen. Aktuell exportiert Deutschland bilanziell mehr Strom als es importiert (Abbildung 13). Der Trend hin zu einem Netto-Import-Land in der Transformationsphase zwischen 2030 und 2040 wird von mehr als der Hälfte der Studien erwartet. Dabei bewegt sich der Saldo nicht nur ins positive (Netto Import), sondern auch der Betrag steigt in einigen Studien weit über das Mittel der letzten Jahre. Ab 2040 divergiert die Spannweite, woraus sich schließen lässt, dass je nach Szenarienannahmen Deutschland sowohl als Netto Stromimporteur als auch als Netto Stromexporteur das Ziel der Klimaneutralität erreichen kann. Gerade Szenarien die auf eine 100 %-ige Selbstversorgung abzielen stehen in Konkurrenz mit Szenarien, die den Import von Energie aus Regionen mit hohem EE-Potenzial bevorzugen.

¹⁷Summe aller Biomasse-basierter Anlagen.

¹⁸Aufgrund der geringen Vorlauftemperaturen.

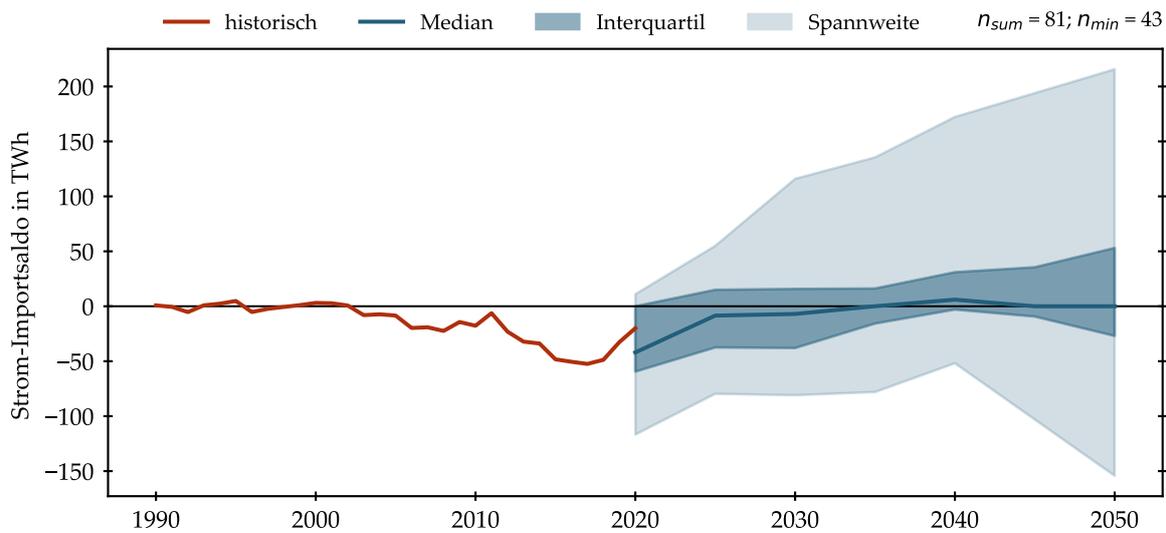


Abbildung 13 Jährlicher Strom-Importsaldo Deutschlands inklusive dem historischen Verlauf (positive Werte Import, negative Werte Export).

Neben der Stromnetzflexibilität durch Im- und Export wird auch innerdeutsche flexible Leistung benötigt werden. Hier wird zwischen klassischen Stromspeichertechnologien¹⁹, Power-to-X Anwendungen und flexiblen sonstigen Technologien unterschieden. Der folgende Abschnitt dient der Auswertung des Einsatzes klassischer Stromspeichertechnologien. Auf den Einsatz von Power-to-X Technologien und konventionellen Kraftwerken zur Bereitstellung von Flexibilität wird in Unterabschnitt 5.2 und Unterabschnitt 5.3 genauer eingegangen.

Die aktuell zu Verfügung stehende Leistung durch Pumpspeicherkraftwerke (PSKW) in Deutschland wird in nahezu allen Studien berücksichtigt. Ähnlich der Fließwasser- und Stauwasserkraftwerke wird auch für PSKW davon ausgegangen, dass es in Zukunft zu keinem weiteren nennenswerten Ausbau an Leistung kommen wird. Unterschieden werden kann lediglich, ob PSKW in angrenzenden Energiesystemen als direkt nutzbar mitberücksichtigt werden oder nicht. So schwankt der Median der angenommenen installierten Leistung zwischen 2020 und 2050 zwischen 7,7 GW und 10,5 GW.

Der Bedarf an Batteriespeichern wird in den Studien in stark unterschiedlichem Detailgrad betrachtet. So schwanken die Angaben von einem allgemeinen Speicherbedarf bis hin zur Differenzierung zwischen Hausspeicher, bidirektionalem Laden von Batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen (BEVs) und Batteriegroßspeichern. Des Weiteren ist die Berücksichtigung weiterer Sektoren neben dem Stromsektor (Wärme, Mobilität und Industrie) nicht gleichmäßig verteilt und die jeweilige Sektorenkopplung unterschiedlich ausgeprägt. Aufgrund des erschwerten direkten Vergleichs, basiert der Bedarf an Speichertechnologien in Tabelle 6 auf einem deutlich reduziertem Datensatz²⁰.

Anhand des Verhältnisses zwischen installierter Leistung an erneuerbaren Energien und der jeweils benötigten Speicherleistung, beziehungsweise -kapazität lässt sich eine erste Abschätzung des Speicherbedarfs ableiten. Basierend auf dem reduzierten, vergleichbaren Datensatz ergibt sich ein Bereich von 4,4 bis 5,1 % der installierten Leistung an EE, der als direkter Stromspeicher zu Verfügung stehen muss. Aufgrund des gleichbleibenden Wertes über die Jahre 2030 bis 2050 kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf unabhängig der absolut installierten Leistung ist. Dies gilt stets nur unter der Annahme, dass die weiteren Flexibilitätsmaßnahmen entsprechend der jeweiligen Systemstudie nutzbar sind. Im Gegensatz zur Speicherleistung wird der Bedarf an Speicherkapazität mit zunehmenden EE-Anteil größer und verdoppelte sich von 2030 auf 2040, sowie von 2040 auf 2050.

¹⁹Beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke und Batteriespeicher

²⁰Verwendet werden einzelne Szenarien aus BMWi(2021), Agora(2020), ISE(2020), ENSURE(2020), Nitsch(2019), RES-CUE(2019), WWF(2019), BDI(2018), dena(2018), EWI(2017), BMU(2011), SRU(2011)

Zunehmend wird der Mobilitätssektor und damit die Nutzung von E-Mobilität als Transportmedium in Energiesystemstudien betrachtet. Mit der Zunahme an BEVs wird auch die absolut vorhandene Speicherkapazität an Batterien stark zunehmen. Über intelligentes oder sogar bidirektionales Laden ergeben sich für das übergeordnete Energiesystem weitere Flexibilitätsmöglichkeiten. Unter der Annahme von einer mittleren Speicherkapazität von etwa 60 kWh je BEV ergeben sich basierend auf den erwarteten BEV Fahrzeugflotten in 2030 etwa 750 GWh und 2050 über 180 GWh an Speicherkapazität.

Tabelle 6 Bedarf an Speicherleistung in Abhängigkeit der installierten EE Leistung, sowie die erwartete Anzahl an BEVs und die damit verbundene Speicherkapazität.

	Einheit	2030	2040	2050
Speicherleistung	%*	4,4	5,1	4,6
BEV	Mio.	12,6	17,0	30,2
	GWh**	756	1020	1812

*Elektrische Speicherleistung je installierter Leistung an EE.

**Eigene Berechnung.

Die Bewertung allein basierend auf BEV oder einem fiktiven Speicherbedarf ist nur begrenzt aussagekräftig. Insbesondere die stark zunehmende Kopplung der Sektoren ermöglicht eine Verschiebung von erneuerbarem Strom zwischen Erzeugung und Nutzung über kurze und lange Zeiträume. Die Ergebnisse dieses Abschnittes zeigen daher lediglich den Stand basierend auf Annahmen zu einem Zeitpunkt, an dem die großflächige Sektorenkopplung erst begonnen hat. Die aktuelle Version des Ausbauplans [27] in Kombination mit der nationalen Wasserstoffstrategie [29] macht eine neue Generation an Systemstudien nötig, die stark gekoppelte Varianten des Energiesystems untersucht.

5.1.4 Kostenentwicklungen

Da die meisten Studien auf Kostenoptimierungen basieren, lassen sich die Ergebnisse stark durch die Annahmen bezüglich der Kostenentwicklungen beeinflussen. Rückblickend zeigt insbesondere die schnelle Abnahme der PV Investitionskosten einen unerwarteten Ausbau an PV Leistung in Deutschland. Die weitere Entwicklung der PV Kosten wird in aktuellen Studien weiter ambitioniert gesehen. Im Median wird sowohl für Freiflächen-PV (PV_{frei}) als auch für Aufdach Installationen (PV_{Dach}) eine weitere Halbierung der Investitionskosten zwischen 2020 und 2050 angenommen (Abbildung 14). Ebenfalls eine Abnahme, wenn auch nicht im gleichen Umfang wird für Windturbinen erwartet. Die Streuung der Werte, insbesondere bei Onshore WEA (WEA_{on}), liegt unter anderem an der geringeren Datengrundlage.

Beispielhaft sind in Tabelle 7 weitere Kostenannahmen aufgelistet. Wie auch bei den Investitionskosten der erneuerbaren Erzeugereinheiten wird auch bei Technologien wie der alkalischen Elektrolyse (AEL) oder Batteriespeichern eine zum Teil starke Reduktion der Kosten erwartet. So wird im Median davon ausgegangen, dass sich die Installationskosten von AEL zwischen 2020 und 2050 um etwa 33 % reduzieren. Für Batteriespeicher, hier am Beispiel mobiler Systeme, wird sogar eine Abnahme auf ein Drittel der aktuellen Kosten angesetzt.

Neben den Technologiekosten spielen insbesondere Brennstoffkosten eine weitere große Rolle unter den Annahmen. Als Beispiel sind ebenfalls in Tabelle 7 die Mediane der Öl- und Erdgaspreise aufgelistet. Im Vergleich zu den starken Schwankungen und Anstiegen des Erdgaspreises im Frühjahr 2022 zeigt sich, dass diese sogar außerhalb der Maximalwerte der Studien ²¹ liegen.

²¹EEX European Gas Spot Index am 24.05.22: Gaspreis > 80 € MW⁻¹

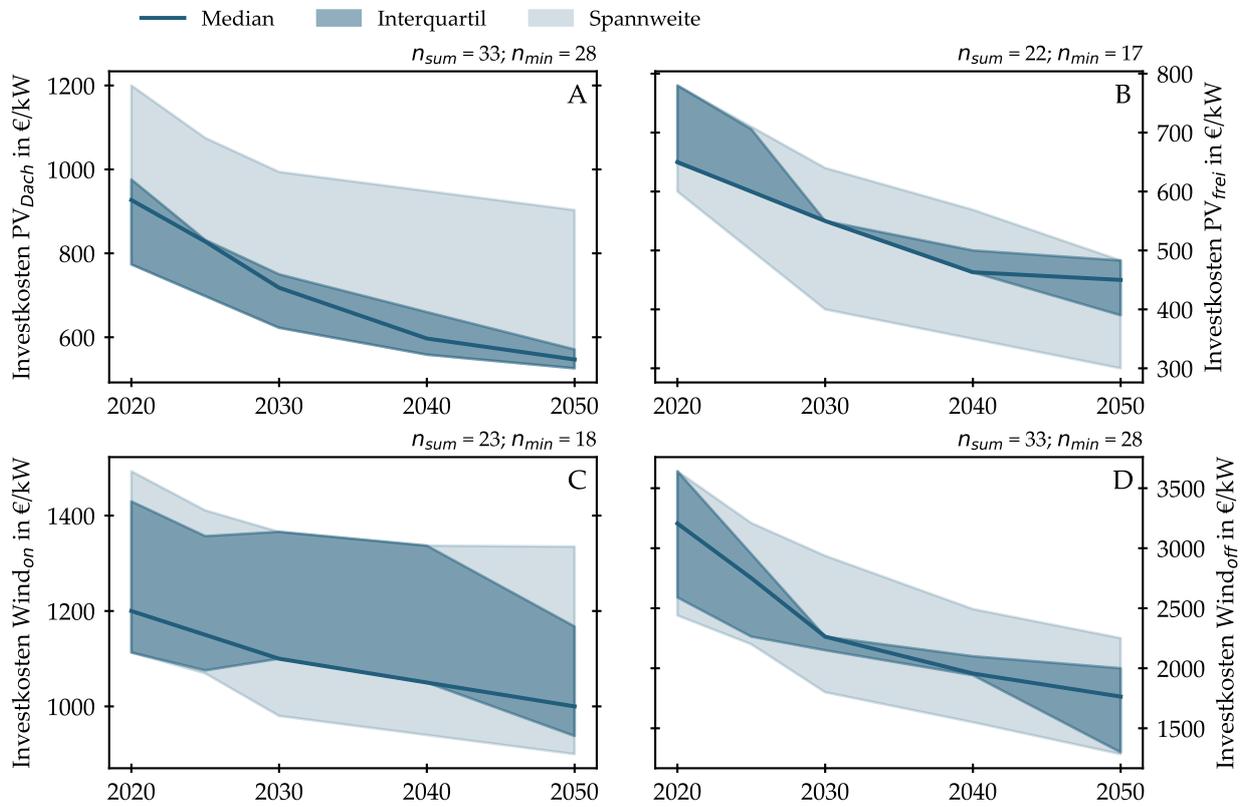


Abbildung 14 Entwicklung der Investitionskosten von PV_{Dach} (A), PV_{frei} (B), WEA_{on} (C) und WEA_{off} (D).

Tabelle 7 Erwartete Entwicklung (Median der Studien) der Investitionskosten oder Brennstoffkosten für ausgewählte Beispiele.

	Einheit	2020	2030	2040	2050
Alkalische Elektrolyse	€ kW ⁻¹	738	613	554	500
Mobile Batteriespeicher	€ kW ⁻¹	167	101	-	51
Erdgaspreis	€ MWh ⁻¹	19	24	27	26
Ölpreis	€ MWh ⁻¹	62	79	75	73

5.2 Nachhaltige Energieträger

Im aktuellen Kontext wird der Bereich der nachhaltigen Energieträger oft mit dem Bedarf an Wasserstoff gleichgesetzt. Dies kann allein aufgrund der leichteren Verständlichkeit für die Öffentlichkeit helfen, um Entscheidung bezüglich der Energiewende zu kommunizieren. Letztendlich bildet Wasserstoff jedoch neben dessen direkten Anwendungen insbesondere die Basis für die Synthese verschiedener synthetischer Energieträger und Basischemikalien. In diesem Kapitel soll daher zunächst die Wasserstoffbereitstellung, sowie die damit verbundenen Auswirkungen auf das Energiesystem diskutiert werden. Anschließend folgen die bislang noch reduzierten Ansätze der Abbildung des stofflichen Sektors in Energiesystemstudien.

5.2.1 Wasserstoff

Mit der nationalen Wasserstoffstrategie hat die Bundesregierung Deutschlands konkrete Ziele und Maßnahmen benannt, um das deutsche Energiesystem mit Wasserstoff als Speichermedium und auch zur Sektorenkopplung für die kommenden Jahre der Energiewende zu stärken [29]. In dem veröffentlichtem Papier wird von 5 GW an Elektrolyseleistung bis 2030 und insgesamt 10 GW bis spätestens 2040 gesprochen. In Abbildung 15 sind die nationalen Ziele gemeinsam mit den erwarteten Entwicklungen aus den untersuchten Studien abgebildet. Aufgrund der bislang nur als Randthema aufgetretenen Wasserstoffthematik ist die Datengrundlage deutlich reduziert. Aktuelle Studien greifen das Thema nun jedoch vermehrt auf.

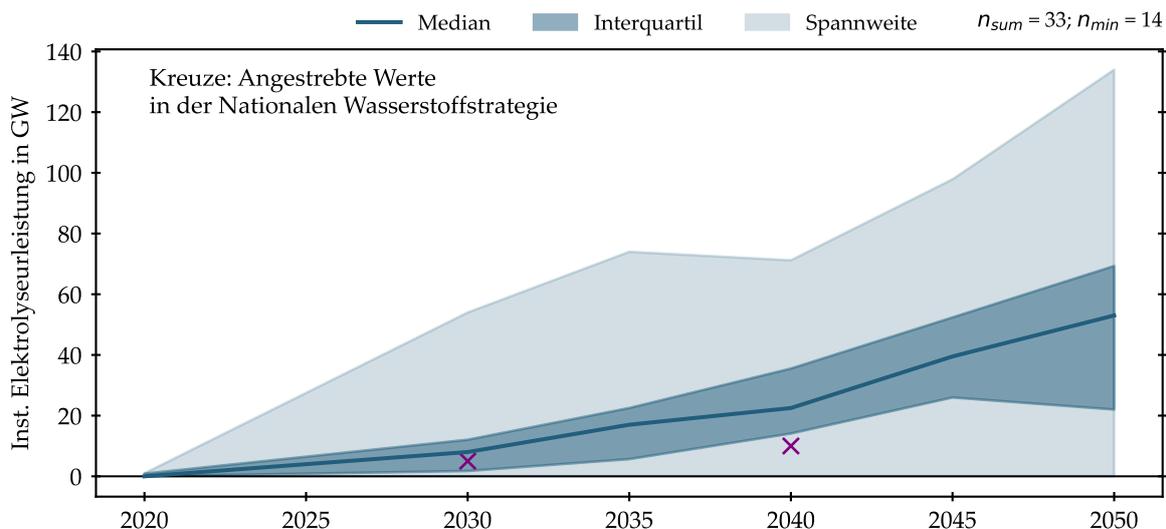


Abbildung 15 Erwartete Entwicklung der installierten Elektrolysekapazitäten und Markierung der angestrebten Kapazitäten aus der nationalen Wasserstoffstrategie.

Unabhängig der Wasserstoffstrategie zeigt sich im Median eine dreigeteilte Zubaurate (Abbildung 15). Zunächst werden bis 2030 etwa $0,8 \text{ GW a}^{-1}$ an neuer Elektrolyseleistung erwartet. Die Zubauraten erhöhen sich im Zeitraum 2030 bis 2040 auf $1,5 \text{ GW a}^{-1}$ und 2040 bis 2050 auf $3,0 \text{ GW a}^{-1}$. Diese Werte liegen deutlich oberhalb des Strategiepapiers. Die in Abbildung 15 zu sehende untere Grenze (kein Elektrolysebedarf) kommt aus Studien, die einen Vergleich mit und ohne lokaler Wasserstoffherzeugung betrachten. Der gesamte Bedarf an Wasserstoff wird von den Studien mit im Median 149 TWh und maximal 450 TWh in 2050 angegeben. Wie in Tabelle 8 zu sehen, spiegelt sich die stufenweise zunehmende Ausbaugeschwindigkeit der Elektrolyseleistung auch im Wasserstoffbedarf wieder. So gehen einzelne Szenarien von keinem Wasserstoffbedarf bis einschließlich 2030 aus. Die Annahmen der Bundesregierung sind mit 90 bis 110 TWh in 2030 eher im oberen Bereich angesiedelt [29]. Sowohl in einigen Studien als auch im Strategiepapier der Bundesregierung wird davon

ausgegangen, dass zunächst nur ein geringer Teil des grünen Wasserstoffbedarfs innerhalb Deutschlands bereitgestellt werden kann. Der überwiegende Teil wird aus Importen stammen, wobei auf den folgenden Abschnitt zu synthetischen Energieträgern verwiesen sei.

Tabelle 8 Erwarteter Wasserstoffbedarf aus der Metaanalyse und Annahmen der Bundesregierung aus der nationalen Wasserstoffstrategie [29].

	Einheit	2020	2030	2040	2050
Median	TWh	4,5	46,0	111,5	149,0
Minimum	TWh	0,0	0,0	11,4	22,5
Maximum	TWh	16,4	115,0	265,0	450,0
Wasserstoffstrategie		90 - 110 TWh bis 2030			

Aufgrund des hohen Strombedarfs der Wasserelektrolyse sind insbesondere die Auswirkungen auf das übergeordnete Energiesystem von Interesse. So wird langfristig eine rein grüne Wasserstoffherzeugung angestrebt, was letztendlich mit einem deutlich höheren Bedarf an erneuerbarer Stromerzeugung einhergeht. Dieser Effekt kann in Abbildung 16 beobachtet werden, in dem die erwarteten EE-Kapazitäten als Entwicklung in Abhängigkeit der Berücksichtigung der Wasserstoffherzeugung aufgeteilt sind. Der deutlich steiler ansteigende Median der Szenarien mit Wasserstoffberücksichtigung zeigt im Vergleich mit keiner Wasserstoffberücksichtigung etwa 40 GW mehr EE in 2030 und über 70 GW mehr in 2050.

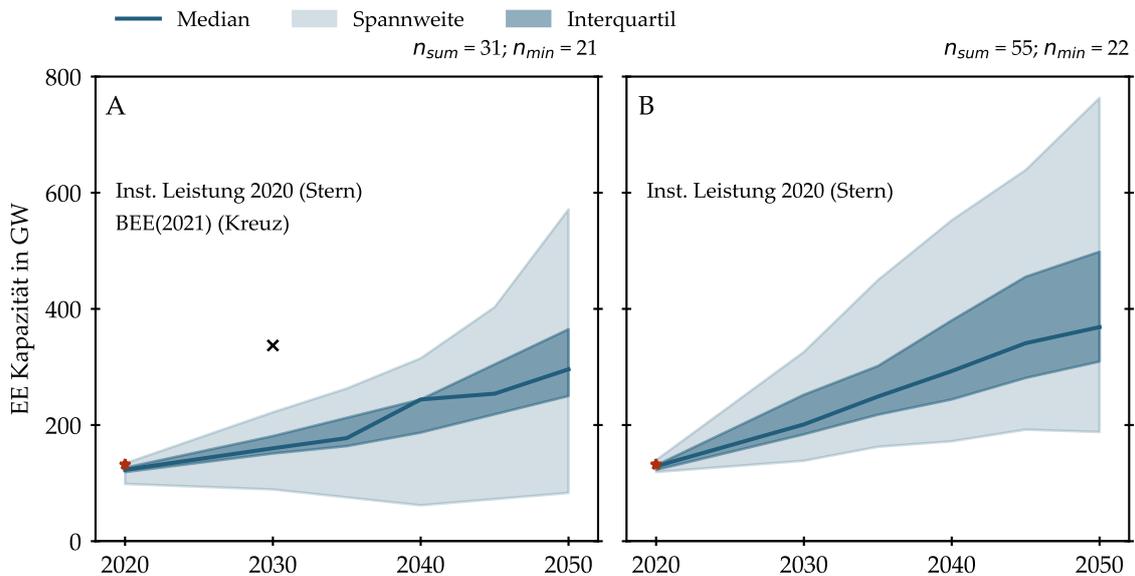


Abbildung 16 Vergleich der installierten Kapazitäten an erneuerbaren Energien ohne (A) und mit (B) expliziter Berücksichtigung der Wasserstoffbereitstellung.

In Tabelle 9 sind die durchschnittlichen jährlichen Zubauraten an EE-Kapazitäten aufgelistet. Im Mittel werden etwa 2 GW pro Jahr an zusätzlicher Leistung aus erneuerbaren Energien erwartet, um die inländische Wasserstoffbereitstellung abzudecken. Im Gegensatz dazu werden im Referentenentwurf zur EEG-Novelle 2022 [27] bis 2035 Zubauraten von bis zu 20 GW a⁻¹ an PV und bis zu 14 GW a⁻¹ an WEA²² angestrebt.

²²Onshore bis zu 10 GW a⁻¹ und Offshore bis zu 9 GW a⁻¹ in 2030, dann 4 GW a⁻¹

Tabelle 9 Mediane der installierten Leistung an erneuerbaren Energien, sowie jährlicher Zubaubedarf in Abhängigkeit der Berücksichtigung eines Wasserstoffbedarfs.

Jahr	Ohne H ₂ -Bezug		Mit H ₂ -Bezug	
	Inst. Leistung in GW	Δ in GW a ⁻¹	Inst. Leistung in GW	Δ in GW a ⁻¹
2020	123,0		129,0	
2030	160,0	3,7	201,1	7,2
2035	177,5	3,5	249,0	9,6
2040	244,0	13,3	292,9	8,8
2045	254,0	2,0	341,0	9,6
2050	296,0	8,4	368,6	5,5
Mittelwert		6,2		8,1

5.2.2 Wärme, Verkehr und Industrie

Energiesystemstudien fokussierten sich lange auf die reine Abbildung des Stromsektors und die damit verbundenen Fragestellungen bezüglich des Ausbaus der EE und Speicher-, beziehungsweise Flexibilitätsbedarfe. In neueren Studien werden zunehmend die Sektoren Wärme, Mobilität und Industrie betrachtet, wobei diese Themen noch in deutlich unterschiedlichem Detailgrad abgebildet werden. So reicht die Bandbreite beispielsweise im Wärmesektor von keiner Abbildung bis hin zu Geoinformationssystem (GIS)-basierten Auswertungen wie in [11]. Bezüglich der Mobilität wird oft die Betrachtung rein auf den Strombedarf im Verkehrssektor beschränkt. Die Sektoren Wärme und Mobilität und insbesondere auch die Industrie werden jedoch mittel- und auch langfristig nicht ohne synthetische Energieträger auskommen. Die folgenden Abschnitte befassen sich daher in einem Exkurs mit der Abbildung der weiteren Sektoren in aktuellen Energiesystemstudien. Eine rein quantitative Auswertung ist hier jedoch aufgrund der geringen Datengrundlage und insbesondere der stark schwankenden Detaillierung nur abschnittsweise möglich.

Wärmesektor Bei der Abbildung des Stromsektors wird oft die Annahme eines perfekten Stromnetzes²³ genutzt, um den Modellierungsaufwand zu reduzieren. Der Fehler bezüglich der limitierten Verteilung ist dabei im Gegensatz zum Wärmesektor vergleichsweise gering. Die Bereitstellung von Wärme erfolgt heutzutage meist dezentral gebäudespezifisch. Fern- und Nahwärmenetze sind nur in einzelnen Region vertreten. Die Abbildung der Wärmeversorgung ist aufgrund der verschiedenen benötigten Temperaturniveaus²⁴ und der Komplexität der Fernwärmenetzplanung deutlich aufwendiger als die Verteilung elektrischer Energie. Allein die betrachtete Spannweite des Wärmebedarfs der vorliegenden Studien in Tabelle 10 zeigt, wie unterschiedlich die Abbildung und Berücksichtigung von Teilsektoren vorgenommen wurde. Beispielsweise ist in Con(2021) die Nutzung von Wärmepumpen, beziehungsweise allgemein die Nutzung von Power-to-Heat exogen vorgegeben. Im Gegensatz dazu ist in EWI(2017) eine vereinfachte Modellierung der Wärmeinfrastruktur separat für Prozesswärme und Wärmenetze für Raumwärme und Brauchwasser vorhanden.

Tabelle 10 Erwartete Entwicklung des Gesamtwärmebedarfs in Deutschland.

	Einheit	2030	2040	2050
Minimum	TWh a ⁻¹	138	123	90
Median	TWh a ⁻¹	144	147	140
Mittelwert	TWh a ⁻¹	233	220	195
Maximum	TWh a ⁻¹	1127	1053	969

²³Oft bezeichnet als Kupferplatte.

²⁴Raumwärme, Brauchwasser und Prozesswärme in der Industrie.

Einigkeit herrscht insbesondere dahingehend, dass die zukünftige Wärmeversorgung auf mehreren Technologien beruhen wird. Fernwärme wird von einigen Studien als Schlüssel zur Erhöhung der Effizienz der städtischen Wärmeversorgung gesehen. Unabhängig ob fernwärmegebunden oder gebäudespezifisch wird der Einsatz von sowohl Strom-basierten Technologien²⁵, Biomasse, Solarthermie und Geothermie, aber auch Power-to-X Produkte eine wichtige Rolle spielen. Unter anderem wird in BEE(2021) dem Einsatz von Power-to-X eine vergleichbar große Rolle wie der Geothermie in der Wärmeversorgung von 2030 zugesprochen. Im Szenario *Optimiertes System* aus EnerGas(2017) nehmen erneuerbare Energieträger sogar ein Drittel der Wärmebereitstellung ein, was laut Studie gegenüber einer maximalen Elektrifizierung aller Sektoren aus volkswirtschaftlicher Sicht kostengünstiger ist.

Industriesektor Gerade die Industrie wird als der Sektor betrachtet, in dem die Transformation hin zur Klimaneutralität mit am schwierigsten sein wird. Sowohl Hochtemperaturprozesse als auch chemische Verfahren könne nur bedingt elektrifiziert werden. BMWi(2021) erwartet beispielsweise Szenario-unabhängig, dass die Stahl- und Zementindustrie von aktuell etwa 39 % Anteil an den THG Emissionen auf über 60 % bis zu 75 % steigen werden. Während die Stahlindustrie gerade durch den Einsatz von grünem Wasserstoff ein großes THG Reduktionspotenzial besitzt, sind die Emissionen der Zementindustrie prozessbedingt fest. In Agora(2021) werden zur Erreichung der Klimaneutralität für die Industrie die Elektrifizierung der Prozesse und die CO₂-Abscheidung vorgesehen. Nicht vermeidbare Emissionen sollen hier anschließend durch Verfahren wie Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)²⁶ kompensiert werden.

Erste Studien befassen sich daher bereits explizit mit den Herausforderungen und Chancen der deutschen Industrie während der Transformation des Energiesystems: EnerH2(2021), EWI(2019) und HBS(2018). Auf eine detaillierte Analyse des Industriesektors wird daher in dieser Arbeit verzichtet.

Verkehrssektor Die geringste Datengrundlage bezüglich der Nutzung von synthetischen Energieträgern herrscht im Verkehrssektor. Hier liegt insbesondere aufgrund des politischen Interesses der Fokus auf der Elektromobilität. Basierend auf den vorliegenden Studien wird im Median von etwa 10 Mio. BEV in 2030 und etwa 30 Mio. BEV in 2050 ausgegangen. In neueren Studien wie Agora(2021) wird der Bedarf an Mobilität genauer betrachtet. Hier wird von einem Bedarf an Wasserstoff mit 39 TWh und Power-to-Liquids Produkten in Höhe von 17 TWh für den Verkehrssektor²⁷ zusätzlich zur Elektromobilität mit 175 TWh in 2045 ausgegangen. Im Klimaschutzszenario aus BMWi(2021) wird der Anteil an erneuerbaren Energieträgern im Verkehrssektor deutlich höher angenommen. Neben kleineren Mengen an biogenen Einsatzstoffen wird erwartet, dass etwa zwei Drittel des klimaneutralen Verkehrs elektrifiziert sein wird und etwa ein Drittel über Power-to-X Produkte angetrieben wird.

Sektorübergreifend Die Nachfrage nach synthetischen Energieträgern wird nicht nur durch den Bedarf in Kraftwerken, sondern auch durch andere Anwendungen wie Mobilität und Industrie steigen. Da die zukünftigen Energiesysteme höchstwahrscheinlich vollständig auf erneuerbarer Stromerzeugung durch PV und WEA basieren werden, wird davon ausgegangen, dass Power-to-X Technologien einen großen Teil dieses Bedarfs decken werden. Legt man den Median der Studien zugrunde, so wird ein Anstieg der Power-to-Gas Nachfrage in Deutschland von 2,5 GW im Jahr 2030 auf über 40 GW im Jahr 2050 angenommen. Der entsprechende Strombedarf für alle Power-to-X Anwendungen summiert sich auf über 200 TWh im Jahr 2050. Damit wird aber auch der Gesamtbedarf an Power-to-X Produkten voraussichtlich nicht gedeckt, was zu einem zusätzlichen Nettoimport von synthetischen Energieträgern von etwa 20 TWh im Jahr 2030 und über 350 TWh im Jahr 2050 führt.

²⁵Wärmepumpe und Heizstäbe

²⁶Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung

²⁷Ohne Flugverkehr.

5.3 Konventionelle Kraftwerkstechnologien

Eine ausführliche Evaluierung des Bedarfs an konventionellen Kraftwerk während der Energiewende im deutschen Energiesystem ist von den Autoren in [30] veröffentlicht. Die im Folgenden präsentierten Inhalte basieren zum größten Teil auf dieser Veröffentlichung.

Konventionelle Kraftwerke lassen sich in Kohle-, Natürliches Erdgas (NG) und Kernkraftwerke unterteilen, die alle sowohl als reine Kraftwerke als auch in Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden können. Im deutschen Energiesystem sollen Kohle- und Kernkraftwerke spätestens bis 2038 bzw. bis Ende 2022 abgeschaltet werden. Während das AtG mit Sicherheitsbedenken begründet wird, ist der Kohleausstieg rein auf die Treibhausgasemissionen zurückzuführen. Allerdings wird die Nettostromerzeugung im Jahr 2021 zu mehr als 40% durch fossile und zu mehr als 10% durch atomare Kraftwerke gedeckt. [30]

Hanel et al. nutzen die Bruttostromerzeugung aus mit gasförmigen Energieträgern befeuerten Großkraftwerken, um deren mittel- und langfristigen Bedarf abzuschätzen. Zunächst fällt bei dem Vergleich der historischen Entwicklung bis einschließlich 2020 im Vergleich zu den Studienergebnissen ab 2020 auf, dass bereits an der Schnittstelle im Jahr 2020 die Studien im Median weit unter den tatsächlichen historischen Werten liegen. Dieser höhere Anteil von NG am deutschen Energiemix spiegelt die verfehlte Übereinstimmung mit den angestrebten Klimazielen vor 2020 wider. Das letztendliche Erreichen der Emissionsziele im Jahr 2020 ist nicht auf energiepolitische Entscheidungen zurückzuführen, sondern auf die Kombination aus einem milden Winter und anschließender Pandemiesituation. [30]

Mit Blick auf die Systemstudien lässt sich eine Spitze des Erdgasverbrauchs zwischen 2030 und 2040 feststellen (Abbildung 17). Die meisten Szenarien erwarten einen Erdgasbedarf bis mindestens 2040, wobei mehr als die Hälfte der betrachteten Szenarien die Null-Emissionsziele Deutschlands im Jahr 2050 einhalten. Zusammenfassend zeigt sich insbesondere die Definition des jeweiligen Szenarios als ausschlaggebend für die Länge der Erdgasabhängigkeit. Während der Erdgasbedarf im Mittel bis 2050 wegfällt, wird von mehr als 75% der evaluierten Szenarien davon ausgegangen, dass der grundlegende Bedarf an Großkraftwerken auch bis weit über 2050 bestehen bleibt. Ab 2040 wird ein vermehrter Bedarf an synthetischen Energieträger nachgefragt werden (Abbildung 18). [30]

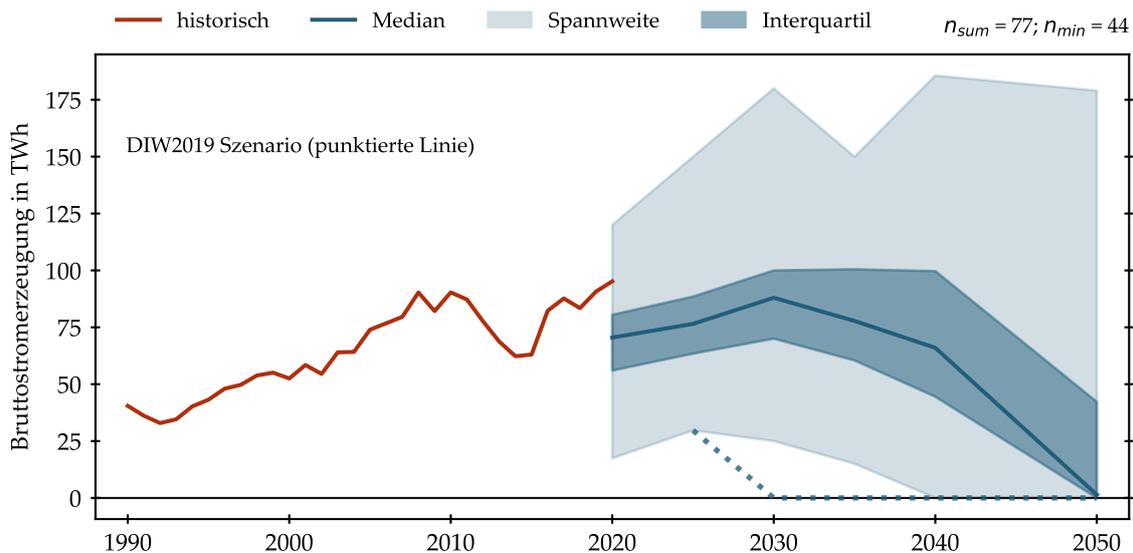


Abbildung 17 Erwartete Entwicklung der Stromerzeugung aus Erdgas-betriebenen konventionellen Kraftwerke aus [30] (bearbeitet).

Um die tatsächliche Auslastung der Kraftwerke zu bewerten, werden die jeweiligen Volllaststunden genutzt. Basierend auf den Medianen der installierten Leistungen der Entwicklungen aus den

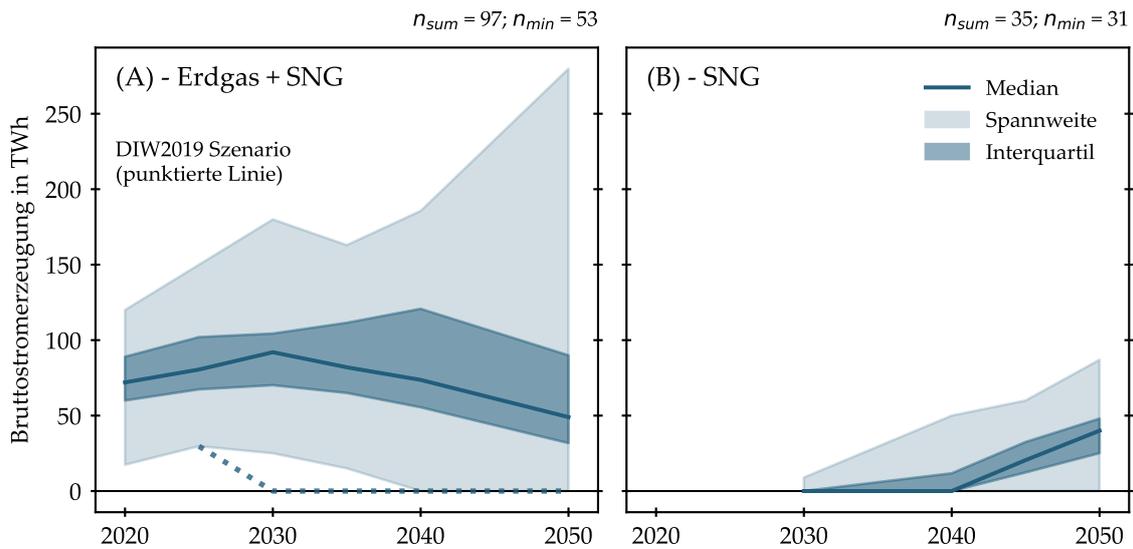


Abbildung 18 Erwartete Entwicklung der Stromerzeugung aus Erdgas- (A) und Synthetisches Erdgas (SNG)-betriebenen (B) konventionellen Kraftwerke aus [30] (bearbeitet).

Studien sowie den jeweils bereitgestellten Energiemengen ergeben sich für die Zeitspanne von 2020 bis 2050 maximal etwa 3000 h a^{-1} . Mit abnehmender Stromerzeugung und gleichzeitig unveränderten installierten Kapazitäten sinkt die Auslastung bis 2050 im Median auf etwa 1200 h a^{-1} (Tabelle 11). Während einzelne Kraftwerke zu Mittel- oder Grundlast Bereitstellung genutzt werden können, wird der Großteil jedoch deutlich weniger Betriebsstunden haben. Die Haupteinsatzfelder werden die Spitzenlastabdeckung oder Back-up für beispielsweise Schwarzstart-Ereignisse sein. [30]

Tabelle 11 Median und Mittelwert der durchschnittlichen Volllaststunden und installierten Kapazitäten an gasbetriebenen Kraftwerken basierend auf [30] und eigenen Berechnungen.

Jahr	Volllaststunden in h a^{-1}		Inst. Leistung in GW	
	Median	Mittelwert	Median	Mittelwert
2020	2770	2720	26	28
2030	3030	2690	35	38
2040	2180	2080	42	47
2050	1230	1370	40	47

Hanel et al. nehmen weiter eine Differenzierung zwischen verschiedenen Szenariodefinitionen an, eingeschränkte und nicht eingeschränkte Technologieportfolios. Während beide Gruppen dem erwähnten Trend während der Energiewende folgen, der seinen Höhepunkt im Jahr 2030/2040 erreicht, unterscheiden sich die tatsächlichen Mediane der installierten Kapazitäten (Tabelle 12). Die Mediane der Technologie-offenen Szenarien liegt deutlich über dem der restriktiven Szenarien. Dies lässt darauf schließen, dass die Nutzung konventioneller Kraftwerkstechnik unter bestimmten Randbedingungen zu geringeren Vollkosten der jeweiligen Energiesysteme führen können. [30]

Tabelle 12 Installierte Leistung an Gaskraftwerken in Abhängigkeit der Technologieoffenheit des Energiesystemmodells aus [30].

		2020	2030	2040	2050
Technologieoffen	Ja	29 GW	41 GW	53 GW	52 GW
	Nein	26 GW	31 GW	39 GW	33 GW

5.4 Bewertung von Studienergebnissen älterer Studien

Dieser Abschnitt dient der Analyse der Ergebnisse älterer Studien²⁸. Ziel ist hierbei die Beantwortung der Frage, in wie weit sich die Ergebnisse und Annahmen älterer Studien von aktuellen unterscheiden, sowie ob und in welchem Umfang der tatsächliche Verlauf klassischer Energiesystemvariablen prognostiziert werden konnte.

5.4.1 Prognosegüte alter Studien

Die Unterscheidung zwischen Ergebnissen und Annahmen in Energiesystemstudien ist stellenweise nicht eindeutig markiert oder schwer trennbar. Da die Ergebnisse jedoch auch ohne Differenzierung als Basis für Entscheidungen genutzt werden, soll in diesem Kapitel kurz die Abweichung der Ergebnisse, beziehungsweise der präsentierten Werte von älteren Studien mit dem jeweils tatsächlich eingetretenen Verlauf untersucht werden.

Treibhausgasemissionen Eine klassische Variable, die in vielen Szenarien als Zielwert vorgegeben ist, sind die THG Emissionen. Hier unterscheiden sich die Szenarien zum größten Teil in Szenarien mit festen Emissionszielen und solchen, welche zum Beispiel durch eine Variation der CO₂-Zertifikatskosten die Ziele erreichen wollen. In Abbildung 19 ist der historische Verlauf der THG Emissionen Deutschlands von 1990 bis 2020, sowie die erwartete Entwicklung aus Szenarien älterer Studien abgebildet. Gerade der Median deckt sich in etwa mit den damaligen Emissionszielen der Bundesregierung. Das Erreichen der Ziele in 2020 und der entsprechende Abfall der Emissionen von 2019 auf 2020 ist den Covid-19 Pandemie-bedingten Maßnahmen und einem milden Winter 2019/2020 zuzuschreiben. Mit Blick auf die Emissionen im Jahr 2021 (+33 Mio. tCO₂ gegenüber 2020 [31]) zeigt sich, dass der erwartete Rebound Effekt eingetreten ist und das Einhalten der Klimaziele in den kommenden Jahren wieder stärker verfolgt werden muss. Allein diese kurze Periode zeigt, dass alleinstehende Aussagen zu den kommenden THG Emissionen eines Energiesystems auf Basis einer Studien nicht aussagekräftig sind. Viel mehr sollten die Studienergebnisse genutzt werden, um aufzuzeigen, unter welchen Randbedingungen Klimaschutzziele eingehalten werden können. Hierzu zählen sowohl politische Vorgaben und Förderungen, aber auch technologische Entwicklungen, Mitwirken der Gesellschaft und der Bedarf an Investitionen.

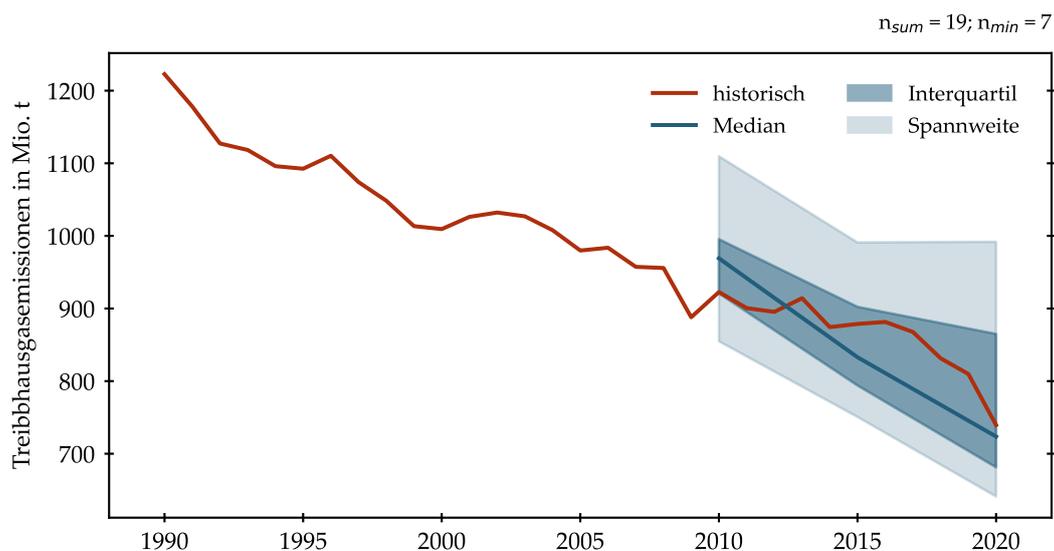


Abbildung 19 Historischer Verlauf der Treibhausgasemissionen Deutschlands mit den Erwartungen beziehungsweise Vorgaben älterer Systemstudien für den Zielzeitraum 2010 bis 2020.

²⁸Wie zu Beginn definiert als Studien mit Veröffentlichung vor 2017.

Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien Während bei den Treibhausgasemissionen allgemeine Ziele des Energiesystems betrachtet werden und somit oft eine Vorgabe der Werte vorliegt, ist die Zusammensetzung der Bruttostromerzeugung zum meist Teil der Ergebnisse der jeweils den Studien zugrundeliegenden Energiesystemsimulationen- beziehungsweise Optimierungen. In Abbildung 20 ist der historische Verlauf und die erwartete Entwicklung der Stromerzeugung aus EE zwischen 2010 und 2020 abgebildet. Bis auf ein Szenario in 2010 wurde in allen der 30 vorliegenden Szenarien der Anteil zum Teil stark unterschätzt. Zwar sind explizit konservative Szenarien enthalten, aber auch ambitionierte auf Nachhaltigkeit ausgerichtete Szenarien haben die Entwicklung nicht beschreiben können. Da der BSV mit im Mittel 570 TWh über den Zeitraum 2010 bis 2020 über alle Szenarien nahezu konstant ist, kann die Bedarfsseite als Grund für die Studienergebnisse ausgeschlossen werden. Mit Blick auf die in Abbildung 21 dargestellte Stromerzeugung aus PV zeigt sich der Hauptgrund für die stark unterschätzte erneuerbare Stromerzeugung. Die Preisabnahme für PV Systeme in den 2010er Jahren hat zu einer nicht erwarteten Zunahme der installierten Leistung geführt, was durch die zu hoch angenommenen Kosten in den Energiesystemmodellen nicht wiederzufinden ist. Im Gegensatz dazu sind die installierten Leistungen an konventionellen Kraftwerken nahezu immer im Median identisch mit den tatsächlichen Verläufen. Dieses eine Beispiel alleine zeigt bereits, wie der Preissturz einer einzelnen Technologie die Ergebnisse stark beeinflussen kann.

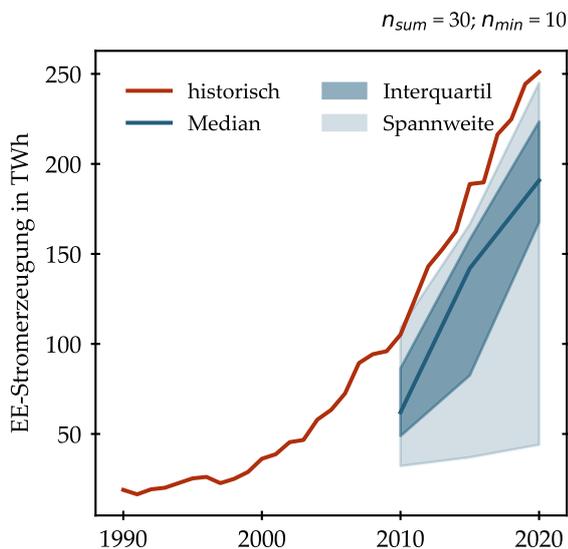


Abbildung 20 Historischer Verlauf der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien mit den Erwartungen beziehungsweise Vorgaben älterer Systemstudien für den Zielzeitraum 2010 bis 2020.

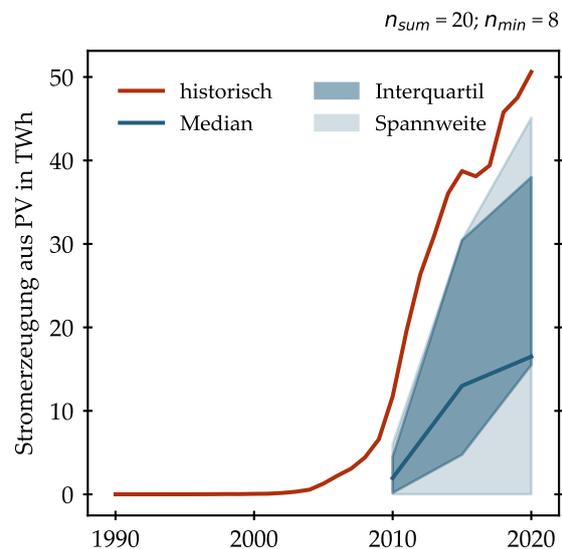


Abbildung 21 Historischer Verlauf der Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen mit den Erwartungen beziehungsweise Vorgaben älterer Systemstudien für den Zielzeitraum 2010 bis 2020.

Zusammenfassung Gerade mit Blick auf die Interpretation von in Energiesystemstudien veröffentlichten Werten, muss stets darauf geachtet werden, ob es sich hierbei um vordefinierte Zielwerte handelt oder tatsächliche Berechnungen. Ebenso im zweiten Schritt muss die Szenariendefinition selbst berücksichtigt werden, um die Basis auf derer die Ergebnisse berechnet wurden mit in die Interpretation einfließen lassen zu können. So ist es grundsätzlich möglich (wie in den älteren Studien gesehen) den zukünftigen Verlauf einzelner Energiesystemvariablen mit einer gewissen Unsicherheit vorherzubestimmen, wenn beispielsweise von Seiten der Politik harte Ziele definiert werden und etwaige Mehrkosten zum Erreichen der Ziele über Förderungen ausgeglichen werden. Im Gegensatz dazu können einzelne Ereignisse dazu führen, dass erwartete Entwicklungen stark von den tatsächlichen Werten abweichen. Grund hierfür können sowohl Wetterereignisse aber auch Kriege

und pandemische Situationen sein. Zusätzlich müssen bezüglich der Definition der Szenarien Ereignisse wie „Preissturz“ (z.B. technologische Entwicklungen oder unerwartete Marktentwicklungen) und „Preisexplosion“ (z.B. Brennstoffkosten steigen unerwartet) berücksichtigt werden.

5.4.2 Vergleich alter mit aktuellen Studien

Technologische Entwicklungen, verändertes Verhalten der Bevölkerung und auch politische Entscheidungen haben jeweils für sich und insbesondere in Kombination einen großen Einfluss auf Energiesysteme. In diesem Kapitel soll anhand eines Vergleichs der Ergebnisse aus älteren und neueren Studien der Wandel der Randbedingungen in den letzten Jahren aufgezeigt werden.

Bruttostromverbrauch In Abbildung 22 ist hierfür zunächst die jeweils erwartete Entwicklung des BSV zwischen 2020 und 2050 dargestellt. Die Mediane der älteren und neueren Studien starten im Jahr 2020 beide bei etwa 570 TWh, lediglich die untere Grenze der Spannweite der neueren Studien zeigt leicht geringere Bedarfe von bis zu unter 500 TWh. Im Verlauf bis 2050 zeigt sich bereits der in neueren Studien vermehrt berücksichtigte zusätzliche Strombedarf, beispielsweise durch die Elektrifizierung des Mobilitätssektors, mit einem um etwa 80 TWh größeren Anstieg in 2050. Am auffälligsten ist jedoch die deutlich größere Spannweite sowie das deutlich breitere Interquartil der neueren Studien. Während der Minimalwert, das untere Perzentil und der Median in einem Bereich von 150 TWh liegen, erstreckt sich das obere Perzentil bis fast 1000 TWh und das Maximum bis über 2000 TWh. Grund hierfür ist unter anderem die Berücksichtigung von weiteren Sektoren wie dem Wärmebedarf, Mobilität und teilweise die Berücksichtigung der Industrie. So werden in neueren Studien vermehrt extreme Szenarien betrachtet, wie beispielsweise ISE(2020) - „Beharrung“ mit 1447 TWh in 2050, in welchem davon ausgegangen wird, dass sich die Bevölkerung stark gegenüber neuen, energiesparenden Entwicklungen wehrt. Ein weiteres Beispiel ist EnerGas(2017) - „Maximale Elektrifizierung“, in welchem knapp 2000 TWh in 2050 nachgefragt werden. Grund ist die Annahme einer vollständigen Elektrifizierung aller bislang fossilen Anwendungen.

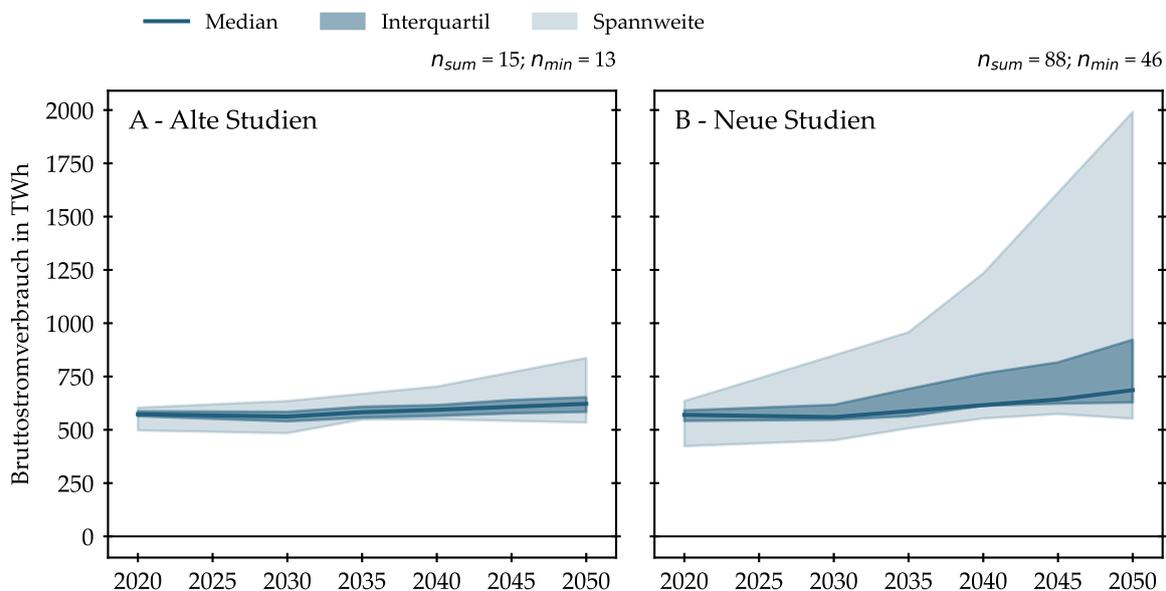


Abbildung 22 Erwarteter Bruttostromverbrauch in älteren (A) und neueren (B) Studien.

Installierte Photovoltaikleistung Entsprechend der größeren Bandbreiten an erwarteten Strombedarfen, sowie der Berücksichtigung der neueren Klimaschutzziele zeigt sich auch in der installierten Leistung an PV und WEA ein deutlicher Unterschied zwischen älteren und neueren Studien. Wie in Abbildung 23 zu sehen, wird in älteren Studien ein nahezu konstanter Verlauf der installierten PV Leistung erwartet. Es wird lediglich ein Anstieg von 52 GW in 2020 auf etwa 62 GW in 2045 erwartet, mit einem Sprung auf etwa 100 GW in den letzten Jahren bis 2050. Demgegenüber steigt der Median des jährlichen Zubaus an PV Leistung in neueren Studien von $2,8 \text{ GW a}^{-1}$ in den 2020er Jahren auf 5 GW a^{-1} in den 2040er Jahren. Auch in den Extremwerten der Bandbreite der erwarteten PV Leistung spiegeln sich die extremen Szenarios wieder. So werden über 800 GW in EnerGas(2017) - „Maximale Elektrifizierung“ benötigt, um die vollständige Elektrifizierung umzusetzen. Ein weiteres Beispiel ist ISE(2020) - „Inakzeptanz“ mit 646 GW, in dem ein starker Widerstand gegenüber dem Ausbau an Infrastruktur angenommen wird.

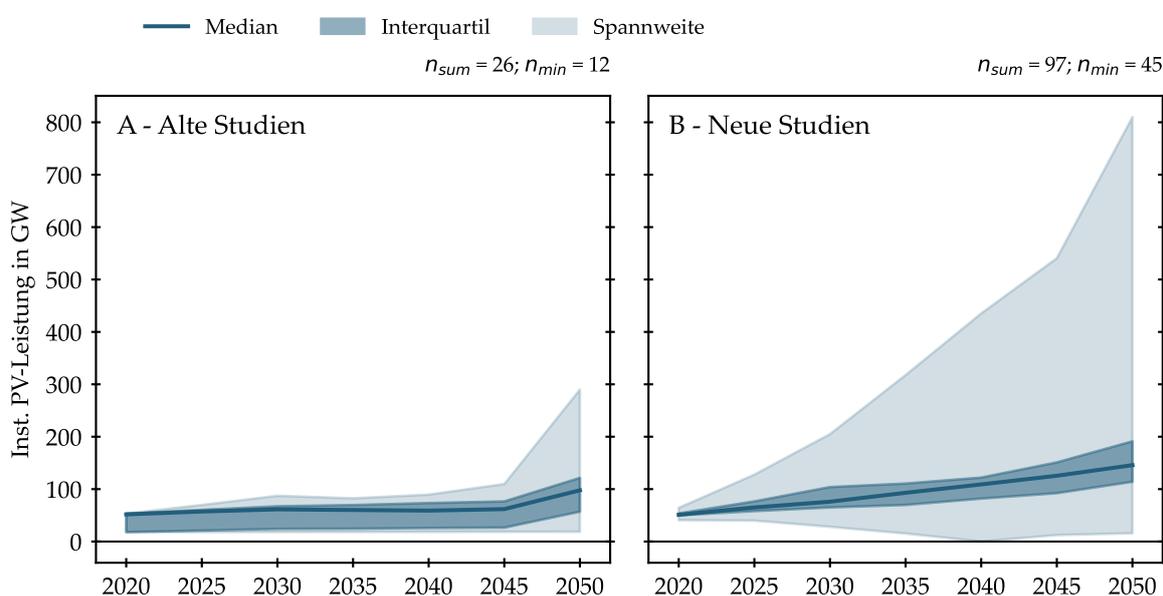


Abbildung 23 Erwartete installierte Photovoltaik Kapazitäten in älteren (A) und neueren (B) Studien.

Installierte Windenergieanlagenleistung Weniger extreme Unterschiede zeigen sich im Ausbau der WEA (Abbildung 24). Auch hier liegt der Median und das Interquartil der neueren Studien stets über dem der älteren. Jedoch ist die relative Differenz bei den Extremwerten deutlich geringer als bei den installierten PV Kapazitäten. Deutlich interessanter sind die erwarteten Entwicklungen bei einer getrennten Betrachtung der Onshore und Offshore WEA (Tabelle 13). Während in älteren Studien insbesondere bei der Onshore Leistung ein nahezu konstanter Verlauf zwischen 40 und 50 GW zu beobachten ist, wird insbesondere eine Zunahme der Offshore Kapazitäten erwartet. So nähern sich die Mediane mit einer Differenz von 29 GW in 2020 auf 7 GW in 2050 an. In neueren Studien hingegen wird insbesondere die Onshore Kapazität stark ausgebaut. Grund hierfür ist wieder der in neueren Studien erwartete Anstieg des Strombedarfs. Vorgegebene Ausbaupotenziale schränken die Nutzung von Offshore WEA trotz den höheren zu erwartenden Volllaststunden gegenüber den Onshore WEA ein. Um die für 2050 hohen erwarteten Strombedarf zu decken, müssen folglich alle Potenziale, von PV bis On- und Offshore WEA, ausgenutzt werden. Durch die in den letzten Jahren vermehrt auftretende Inakzeptanz gegenüber Onshore WEA, sind auch in neueren Studien Szenarien enthalten, welche diese Infrastrukturmaßnahmen bewusst reduzieren. Aus diesem Grund finden sich auch Szenarien mit wenig bis keiner genutzten Windkraft und, wie oben bereits angesprochen, vermehrter Nutzung von Solarstrahlung über PV.

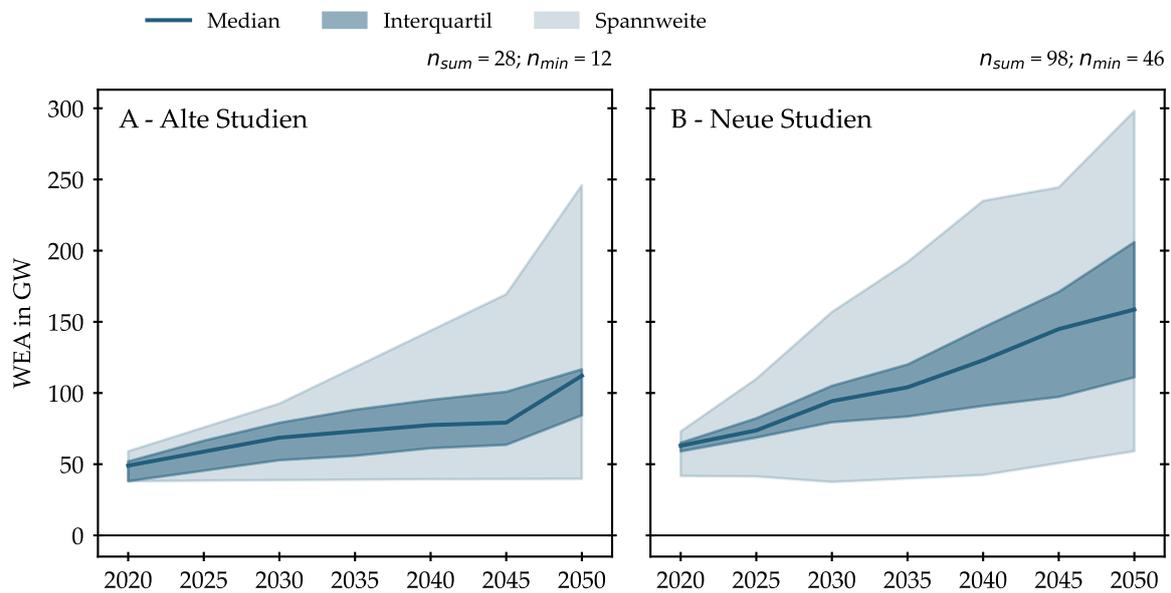


Abbildung 24 Erwartete installierte Windenergie Kapazitäten in älteren (A) und neueren (B) Studien.

Tabelle 13 Mediane der erwarteten installierten WEA Kapazitäten in älteren und neueren Studien, aufgeteilt in Onshore und Offshore Anlagen.

Inst. Leistung in GW		2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
WEA Onshore	Alt	39,0	41,9	44,9	46,6	48,0	48,7	43,8
	Neu	55,5	63,1	78,0	86,8	96,0	119,0	125,0
WEA Offshore	Alt	10,0	13,5	18,5	20,9	26,5	29,0	36,8
	Neu	7,0	11,5	15,3	22,5	30,0	39,3	33,5

Treibhausgasemissionen Ein weitere Grund für die unterschiedlichen erwarteten installierten Kapazitäten an erneuerbarer Stromerzeugung sind die sich in den letzten Jahr stark verstärkten Ziele bezüglich der THG-Emissionen. Während ältere Studien im Median gerade die minimal angestrebten 80 % Reduktion bis 2050 erreichen, erfüllt die Hälfte der neuere Studien mindestens das Ziel von 95 % Reduktion, wobei auch Szenarien mit netto negativen Emissionen in 2050 enthalten sind (Tabelle 14). Hier muss jedoch wieder darauf hingewiesen werden, dass innerhalb der Gruppen „Alt“ und „Neu“ keine weitere Unterscheidung in verschiedene Szenario-Typen vorgenommen wird. Die unteren Grenzen der Ergebnisbandbreiten werden folglich durch konservative Szenarien abgebildet. Mit einem unterem Perzentil von 80 % THG-Reduktion in 2050 bei neueren Studien bestätigt sich hier der Anteil von mindestens drei Viertel an ambitionierten²⁹ Szenarien in aktuellen Studien.

Tabelle 14 Mediane und Maxima der erwarteten Entwicklung der THG-Emissionen in älteren und neueren Studien.

		2020	2030	2040	2050
Alt	Median	35,7 %	50,0 %	68,8 %	79,3 %
	Maximum	48,2 %	64,8 %	79,2 %	91,0 %
Neu	Median	33,8 %	55,0 %	73,6 %	95,0 %
	Maximum	40,0 %	78,0 %	89,0 %	102,5 %

Zusammenfassung Der Vergleich neuerer und älterer Studien zeigt, dass insbesondere extremere Annahmen vermehrt Anwendung finden. So werden Szenarien mit starker Inakzeptanz von Seiten der Bevölkerung bis hin zur zwangsweisen vollständigen Elektrifizierung aller fossiler Anwendungen berücksichtigt. Dieser Trend ist insbesondere wichtig, um ein Unterschätzen von Entwicklungsgeschwindigkeiten, wie es im Falle der Installationskosten von PV Anlagen in den 2010er Jahren passiert ist, zu vermeiden. Auch die Auswirkungen von Großereignissen lassen sich so leichter abschätzen.

²⁹Hier bezogen auf das Erreichen der Klimaziele.

5.5 Einfluss der Szenariengrundlage

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Gewichtung einer Szenarienauswahl bezüglich der acht in Unterunterabschnitt 4.2.2 definierten Charakteristika, sowie deren Einfluss auf die Studienergebnisse herausgearbeitet. Aufgrund von Auffälligkeiten bei der Analyse des Parametereinflusses, wird zusätzlich die Unterteilung der Szenarienauswahl in zwei weitere weitere Gruppen vorgenommen. Genauer betrifft dies Trendszenarien und die Annahme eines Kohleausstiegs bis 2038. Einige Überlegungen der vorigen Abschnitte lassen sich dadurch verifizieren.

5.5.1 Auswertung der Parametereinteilung

In den vorhergehenden Abschnitten zeigt sich, dass die Variablen in Energiesystemstudien einer großen Streuung unterworfen sind, je weiter die Szenarien in der Zukunft liegen. Ziel dieses Abschnitts ist es, einen Teil der Streuung durch die Rückführung auf einzelne Parameter zu erklären. Die Auswahl der Studien³⁰ erfolgt derart, dass die Charakterisierung anhand der Kriterien möglichst eindeutig möglich ist. Die Eingruppierung der einzelnen Szenarien anhand der Kriterienausprägung ist in den separat veröffentlichten Zusatzinformationen enthalten.

Hier sei zunächst zu bemerken, dass die Kriterien rein deskriptivstatistisch eine heterogene Häufigkeitsverteilung aufweisen. In Tabelle 15 ist die prozentuale Aufteilung der 58 Szenarien auf die jeweiligen Ausprägungen der Kriterien aufgelistet. Für das Kriterium Gesellschaft nimmt ein Großteil der Szenarien eine mittlere Ausprägung, zum Beispiel passive Unterstützung an, beim Kriterium Ambition fällt knapp die Hälfte auf mittleres politisches Ambitionsniveau. Dagegen weisen die Kriterien Netz, Handel, Offenheit und Sektorkopplung bei der hohen Ausprägung den höchsten Anteil auf. Am gleichmäßigsten verteilt ist die Umsetzungsgeschwindigkeit; hier besteht jedoch auch die größte Menge an nicht einzuordnenden Szenarien.

Tabelle 15 Aufteilung der hohen, mittleren und niedrigen Ausprägungen der Kriterien auf die betrachteten Szenarien.

Kriterium	hoch	mittel	gering	NA
Gesellschaft	8 %	71 %	7 %	14 %
Ambition	39 %	44 %	17 %	0 %
Sicherheit	41 %	44 %	5 %	10 %
Netz	53 %	25 %	7 %	15 %
Handel	56 %	7 %	19 %	19 %
Offenheit	54 %	17 %	27 %	2 %
Sektorkopplung	56 %	24 %	2 %	19 %
Geschwindigkeit	31 %	22 %	19 %	29 %

Im Weiteren sind die Analysen nach den betrachteten Kriterien gegliedert. Die Auswahl der für die Kriterien-basierte Analyse genutzten Energiesystemparameter sind in Tabelle 16 aufgelistet. Zusätzlich ist für jeden Parameter aufgeführt, wie viel Einfluss dem jeweiligen Kriterium beizumessen ist und in welche Richtung der Einfluss verläuft. Einzelne Parameter und Kriterien werden beispielhaft herausgegriffen, um Einflüsse des jeweiligen Kriteriums oder Auffälligkeiten darzustellen. Die hierfür verwendeten Grafiken stellen jeweils die kriterienabhängigen Entwicklungen der betrachteten Variable über die Zeit von 2020 bis 2050 dar. Zusätzlich wird deren Streuung im Jahr 2050 in Form von Box-Plots, ebenfalls nach Kriteriumsausprägung gruppiert, gezeigt. Aufgrund der geringen Stichprobengröße wird die Angabe der Anzahl der je Ausprägung zugrundeliegenden Szenarien separat angegeben.

³⁰ISE(2020), WWF(2019), BMWi(2018), dena(2018), BDI(2018), RESCUE(2019), BMWi(2019), energies(2019), BEE(2019), ESYS(2017), Nitsch(2019), BMU(2019), UBA(2020), NEP(2019), Öko(2019)

Tabelle 16 Einfluss der Kriterien auf Energiesystemvariablen. Höhere Ausprägung des Kriteriums führt zu höherer (+), niedriger (-) oder gleichbleibender (o) Ausprägung der jeweiligen Energiesystemvariablen.

Kriterium	Gesellschaft	Ambition	Sicherheit	Netz	Handel	Offenheit	Sektorkopplung	Geschwindigkeit
Bruttostromerzeugung (Anteil EE)	o	++	-	o	o	o	+	+
Bruttostromerzeugung (Anteil PV)	-	+	o	-	-	o	o	o
Bruttostromerzeugung (Anteil WEA)	-	o	o	+	o	+	o	+
Anteil PV an EE	-	o	o	o	-	o	o	o
Anteil WEA an EE	-	o	o	++	o	+	o	o
Anteil Onshore an WEA	++	-	o	o	o	o	o	o
Bruttostromverbrauch	-	+	o	o	-	o	o	o
Inst. Leistung (EE)	-	+	o	o	o	o	+	+
Inst. Leistung (Gas)	--	+	o	-	o	o	o	o
Inst. Leistung (Konv.)	--	o	o	-	o	o	o	o
Inst. Leistung (PV)	--	++	o	-	o	o	o	o
Inst. Leistung (WEA)	o	++	o	+	o	o	+	+
Inst. Leistung (WEA Off)	-	+	-	o	o	o	+	+
CO ₂ -Preis	+	++	-	-	o	o	+	++
THG Emissionen	-	--	-	-	-	--	--	-

5.5.2 Analyse der Kriterieneinflüsse

Ambition Das politische Ambitionsniveau zeigt sich deutlich in der Reduktion der THG Emissionen. Dies ergibt sich durch den Zielkorridor, über welchen dieses Kriterium definiert ist. In Abbildung 25 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Aufgrund des zum Teil recht eng definierten CO₂-Korridors ist die Streuung der Werte für das Jahr 2050 gering, insbesondere für hohe Ambition. Gleichmaßen wird auch der EE Anteil durch das Ambitionsniveau und damit verbundene Zielvorgaben beeinflusst, strengere Emissionsziele können nur mit höheren erneuerbaren Stromerzeugungsanteilen einhergehen (Abbildung 26). Zu beachten sei hier, dass sich auch bei geringer Ambition hohe EE-Anteile ergeben können. Die Obergrenze des gering ambitionierten Bereichs in Abbildung 26 ist auf das „Survival-of-the-fittest“-Szenario aus energies(2019) zurückzuführen, in welchem sich aufgrund der globalen Entwicklung der Rohstoffpreise auch ohne Zielvorgabe eine zu 95 % erneuerbare Stromerzeugung einstellt. Bezüglich der einzelnen erneuerbaren Energieträger ist eine hohe Ambition mit einer höheren installierten Leistung und Erzeugung sowohl aus PV- als auch aus WEA verbunden. Möglicher Treiber und gleichzeitig Indikator des Ambitionsniveaus sind CO₂-Preise.

Das Kriterium zeigt sich daher zusammenfassend aufgrund der Zielformulierungen, die in seine Definition eingehen, insbesondere für Unterschiede in der Reduktion von Treibhausgasen sowie des EE Anteils an der Stromerzeugung verantwortlich. Damit zusammen hängen Variablen, die einzelne erneuerbare Energieträger betreffen, sowie CO₂-Preise. Die Ambition wirkt sich damit auf fast alle betrachteten Energiesystemvariablen aus.

Gesellschaftliche Akzeptanz Der Einfluss der gesellschaftlichen Unterstützung zeigt sich im Hinblick auf mehrere Variablen. Die Entwicklung in Abbildung 27 deutet beispielsweise darauf hin, dass sich mit hoher Unterstützung geringere THG Emissionen ergeben können. Das auf der mittleren Ach-

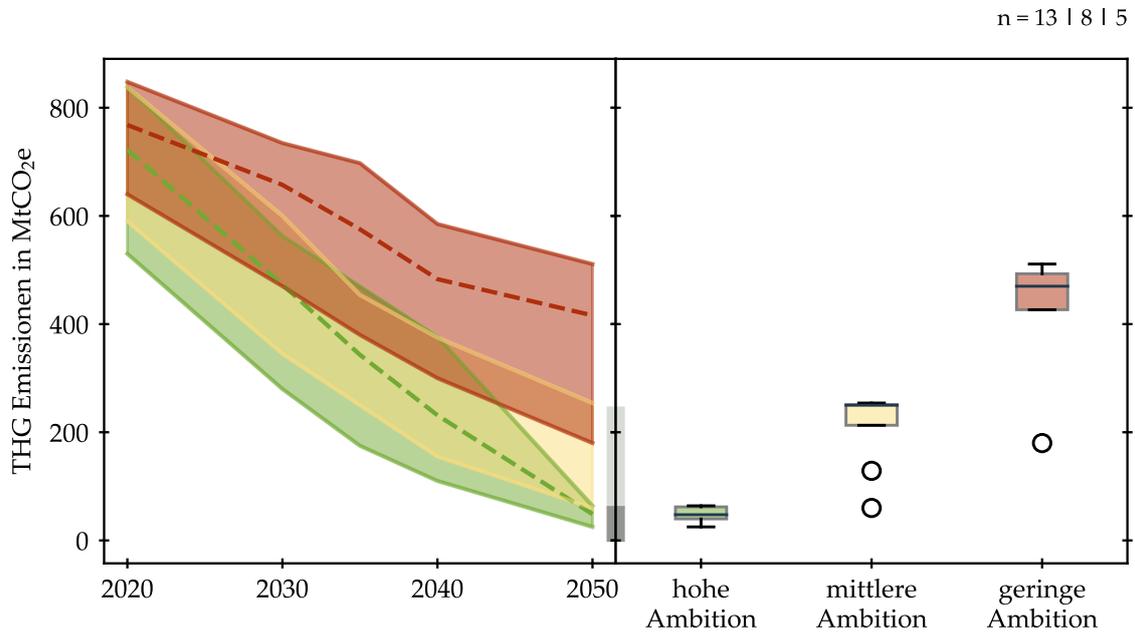


Abbildung 25 Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit des Ambitionsniveaus des Szenarios.

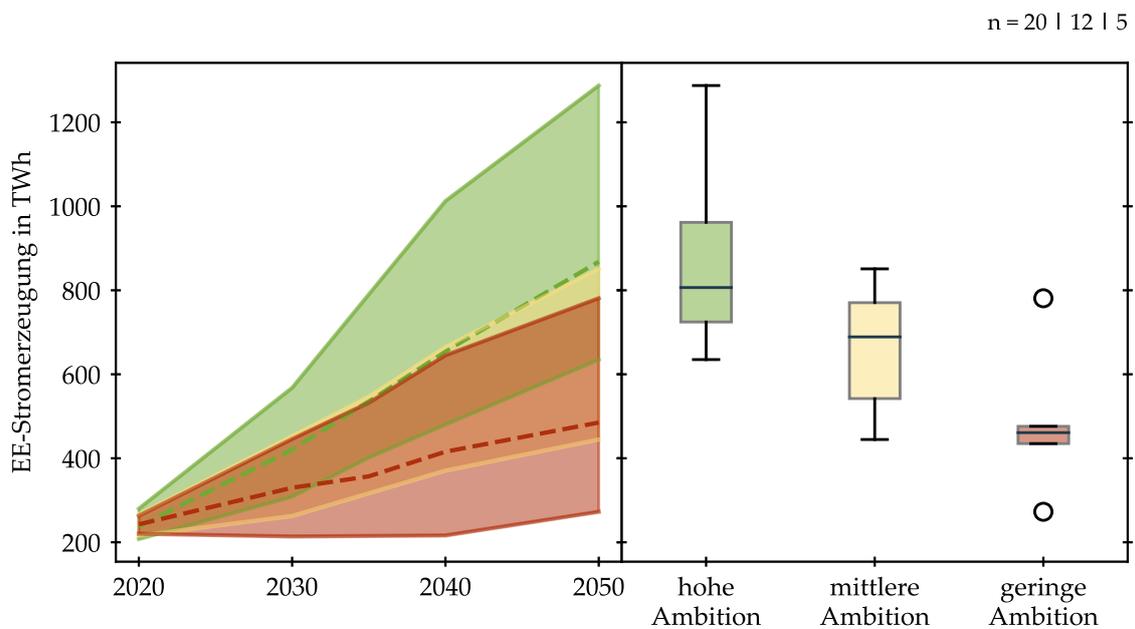


Abbildung 26 Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit des Ambitionsniveaus des Szenarios.

se der Grafik dunkelgrau markierte Reduktionsziel von über 95 % wird von allen drei Szenarien mit hoher gesellschaftlicher Unterstützung erreicht, während die Szenarien mit geringer Akzeptanz nur den unteren Zielrahmen von 80 % (hellgraue Markierung) erreichen. Auffällig ist die hohe Streuung bereits im Jahr 2020. Der Minimalwert zu diesem Zeitpunkt ergibt sich durch das Szenario „Green Democracy“ aus energies(2019), welches neben hohen Ambitionen eine Fortführung des auf Nachhaltigkeit geprägte Verhaltens der Fridays for Future (FFF)-Bewegung annimmt. Dadurch reduzieren sich die Stromnachfrage und damit auch die Emissionen erheblich.

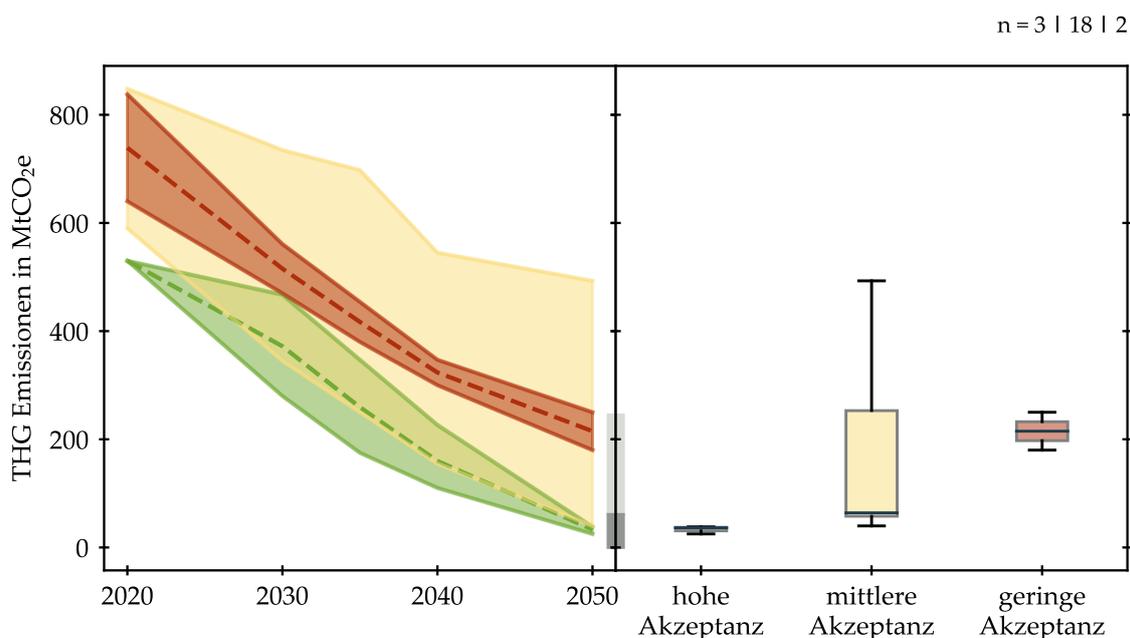


Abbildung 27 Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Eine geringe Akzeptanz richtet sich dabei nicht gegen EE im Allgemeinen. Weder in der EE-Stromerzeugung noch im EE-Anteil an der Bruttostromerzeugung ergeben sich größere Unterschiede. Bei der absoluten installierten EE-Leistung sind für geringe Akzeptanz sogar die höchsten Werte zu verzeichnen, wie Abbildung 28 zeigt. Jedoch ist hier die geringe Stichprobengröße dieser Ausprägung zu beachten (n = 2).

Zusammenfassend führt eine Gruppierung der Szenarien nach ihren Annahmen zur gesellschaftlichen Unterstützung deskriptivstatistisch zu gut sichtbaren Unterschieden in der Entwicklung einiger zentraler Energiesystemvariablen. Zum Teil ist dies in der Kriteriendefinition begründet. Wird im Szenario eine Ablehnung bezüglich des Windausbaus zu Lande beschrieben, ist entsprechend die Obergrenze der Onshore-Kapazität geringer als in anderen Modellen. Nichtsdestotrotz weist die Analyse damit auf die Bedeutung der Gesellschaft für die Energiewende hin.

Handelsintensität Bei den wenigen Unterschieden in den Energiesystemvariablen, die für dieses Kriterium ersichtlich sind, handelt es sich um Scheineffekte. Darüber hinaus scheint der Handel das Energiesystem nicht in den betrachteten Variablen zu beeinflussen. Dies liegt vermutlich daran, dass die betrachteten Studien den Handel oft nicht abbilden. Zwar modellieren sie Kuppelkapazitäten und stellen damit die Verbindung zum Ausland her, der Strommix jedoch entwickelt sich eigenständig innerhalb der Systemgrenze. Es verbleibt die Rolle als Flexibilitätsoption. Diese würde sich vermutlich eher auf andere Flexibilitätsoptionen wie die Speicherleistung auswirken. Die Szenarien, die dafür Daten bereitstellen, weisen jedoch alle eine hohe oder nicht angegebene Ausprägung des Kriteriums auf, sodass ein Unterschied nicht festgestellt werden kann.

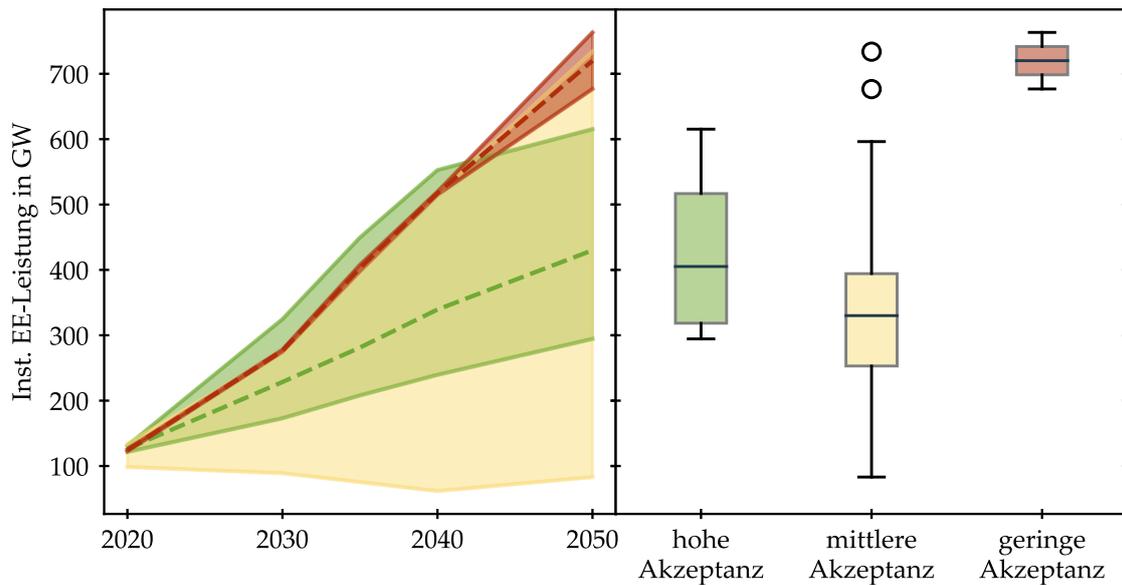


Abbildung 28 Entwicklung der installierten Kapazitäten an erneuerbaren Energien und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der gesellschaftlichen Akzeptanz.

Netzflexibilität Als eigenständiger Parameter hat die Flexibilität des Übertragungsnetzes wenig Einfluss auf die betrachteten Energiesystemvariablen. Lediglich die Rolle des Netzes als Flexibilitätsoption zugunsten größerer Freiheiten bei anderen Variablen zu Flexibilitätsbereitstellung (insb. konventionelle Kraftwerke) spiegelt sich in den Entwicklungsgraphen wider. Durch die starke Kopplung zu andern Kriterien wie gesellschaftlicher Akzeptanz zeigt sich insbesondere bei der Netzflexibilität, dass Aussagen bezüglich expliziter Abhängigkeiten nicht zwangsläufig allein auf ein Kriterium zurückzuführen sind.

Sektorenkopplung Die Sektorenkopplung weist einige Parallelen zum Ambitionsniveau auf. Dies ist zwar plausibel, reduziert aber den eigenständigen Informationsgehalt des Kriteriums. Auch die Vermischung des Grades an Elektrifizierung und der Effizienz der Sektorenkopplung stellt eine Schwierigkeit dar. Eine Modifikation der Kriteriendefinition könnte eine differenzierte Analyse des Kriterieneinflusses ermöglichen.

Sicherheit Als weniger sicher eingestufte Szenarien bilden optimistischere Annahmen ab. Die Verläufe dieser Szenarien befinden sich dementsprechend häufig im Randbereich des Entwicklungsspektrums. Insgesamt ist der Informationsgehalt, den dieses Kriterium bereitstellt, eher gering, beziehungsweise bestätigt die zu erwartenden Einflüsse auf die Ergebnisvariablen.

Offenheit des Modells Die Auswirkung des Kriteriums Offenheit scheint zunächst auf Variablen mit Bezug zur Windkraft einen größeren Effekt zu haben. Sowohl bei der Erzeugung aus WEA, der installierten Leistung als auch der jeweiligen Anteile an EE-Stromerzeugung und gesamter Bruttostromerzeugung bzw. -kapazität korrelieren höhere Ausprägungen des Kriteriums, zum Beispiel entwicklungsoffenere Modelle, mit einer höheren Ausprägung der Variable. Beispielhaft sei hier der WEA Anteil an der Bruttostromerzeugung gegeben (Abbildung 29).

Die scheinbare Korrelation muss jedoch nicht zwangswise auf einer Kausalität beruhen, sondern kann durch einen Bias in den Studien bedingt sein. Basierend auf der Definition des Kriteriums³¹ fällt

³¹Offenheit im Sinne des Gegenteils von Vorbestimmtheit

auf, dass die darin vorgegebenen Entwicklungen weniger in Richtung WEA vorgegeben sind. Die Szenarien „Beharrung“ und „Inakzeptanz“ aus ISE(2020) bevorzugen etwa PV über WEA, während der Fokus in „H2“ und „CSP“ aus BMWi(2019) auf H₂-basierten Technologien oder hohen Stromimport aus dem Süden liegt. Windenergie kann daher allein basierend auf der Kriteriendefinition nicht als kosteneffizienteste Technologie bezeichnet werden.

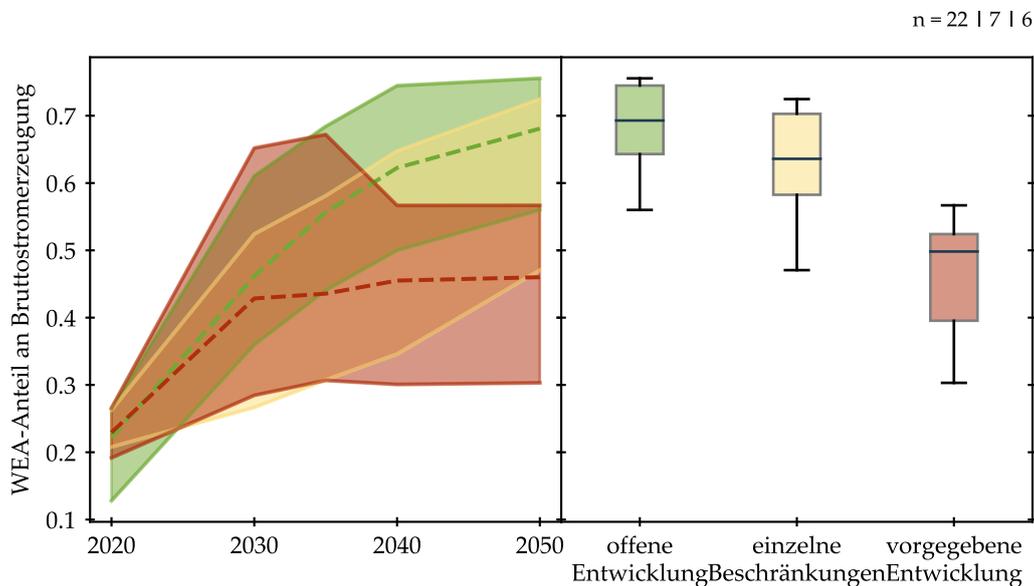


Abbildung 29 Entwicklung des WEA Anteils an der Bruttostromerzeugung und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Offenheit des Modells.

Zudem korreliert die vorgegebene Entwicklung auch damit, ob ein Trend dargestellt wird. Da Trendstudien wiederum oft mit einem niedrigeren Ambitionsniveau behaftet sind, zeigt sich dieser Zusammenhang besonders in den Emissionen, bei denen der entsprechende grafische Verlauf (Abbildung 30) sehr ähnlich zu Abbildung 25 (Emissionen in Abhängigkeit des Ambitionsniveaus) ist.

Wird eine offene Entwicklung in der Modellierung angenommen, sollte dies prinzipiell dazu führen, dass sich rentablere oder anderweitig geeignetere Energieträger durchsetzen. Aufgrund einer ungleichmäßigen Verteilung der niedrigen Ausprägung (vorgegebene Entwicklung) auf wenige Energieträger zeigt das Kriterium jedoch eher an, welche Technologien in den Annahmen und Narrativen der weniger entwicklungs-offenen Szenarien präferiert werden. Innerhalb der als offen klassifizierten Szenarien kann für die betrachteten Systemgrößen keine bestimmte Entwicklungsrichtung festgestellt werden.

Umsetzungsgeschwindigkeit Ein Vergleich der Entwicklung der Systemparameter in Abhängigkeit des Ambitionsniveaus (beispielsweise die Treibhausgasemissionen in Abbildung 25) lässt kaum Unterschiede zur Entwicklung in Abhängigkeit der Umsetzungsgeschwindigkeit (Abbildung 31) erkennen. Dies deutet auf die starke Korrelation zwischen Umsetzungsgeschwindigkeit und Ambition hin, die insbesondere aufgrund der zumeist linearen Zielformulierung in den Studien zum Tragen kommt. Bezogen auf das Kriterium selbst, lassen sich für die Stromerzeugung aus WEA, die installierte WEA Leistung sowie die EE Kapazität bei hoher Umsetzungsgeschwindigkeit leicht erhöhte Anstiege im Vergleich zu niedriger Umsetzungsgeschwindigkeit verzeichnen.

Zusammenfassend scheint die Umsetzungsgeschwindigkeit mit der Ambition verknüpft. Ein Mehrwert des Kriteriums wird durch den Studienfokus auf lineare Zielerreichung und die häufige Vernachlässigung kumulierter Emissionen vermindert. Ein verstärkter Fokus kommender Studien auf

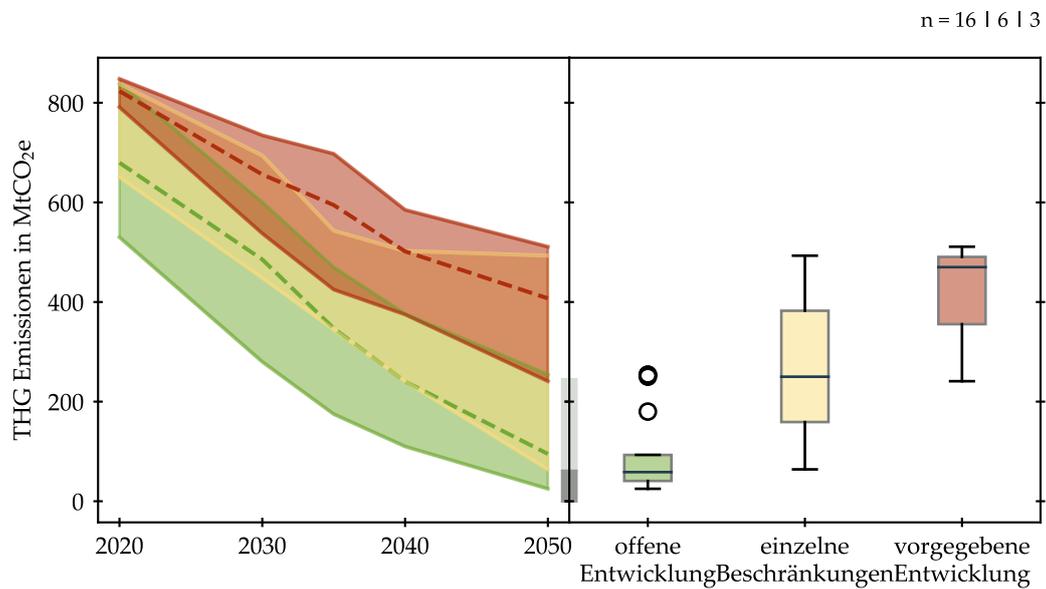


Abbildung 30 Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Offenheit des Modells.

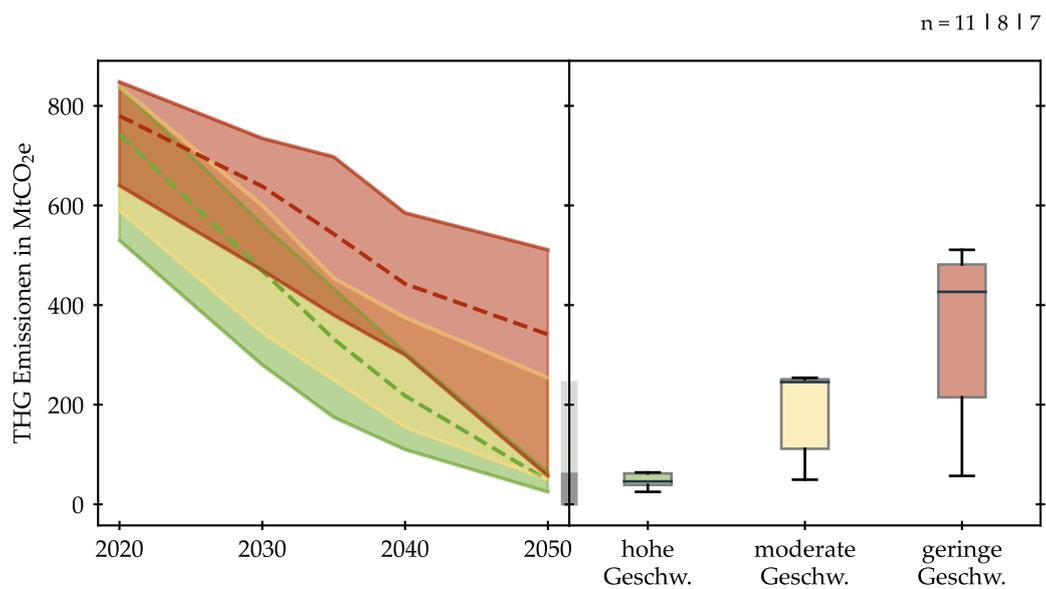


Abbildung 31 Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Umsetzungsgeschwindigkeit innerhalb des Modellierten Zeitraums.

EE Zubau-Planung für die einzelnen Jahre bis 2050 ist aus klimaphysikalischer Perspektive empfehlenswert.

5.5.3 Weitere Beobachtungen zum Kohleausstieg und Trendszenarien

Werden Einzelszenarien genauer betrachtet, um Ausreißer nachzuvollziehen, scheint die Modellierung eines Kohleausstiegs eine zentrale Rolle zu spielen. Tatsächlich nimmt die Aufteilung der Szenarien nach diesem Kriterium einen erheblichen Teil der Varianz in einigen Entwicklungstrichtern. Wird kein Ausstieg modelliert oder findet dieser erst zu einem Zeitpunkt nach 2038 statt, verschiebt sich der Zeitpunkt des Ausbaues der Erneuerbaren Energien deutlich nach hinten (Abbildung 32).

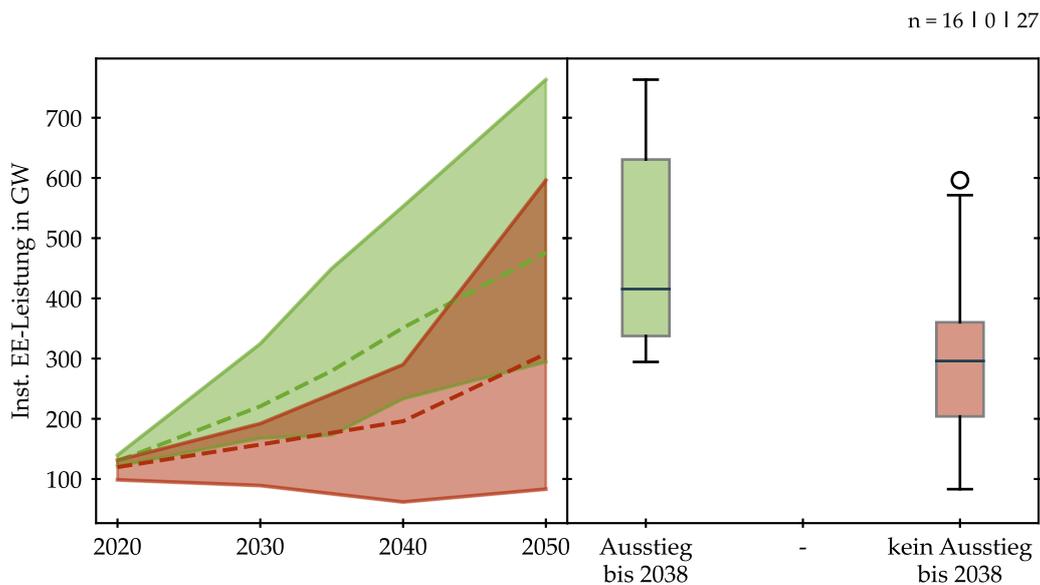


Abbildung 32 Entwicklung der installierten EE-Leistung und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Modellierung eines Kohleausstiegs.

Bezüglich der Treibhausgasemissionen sei zu vermerken, dass die Szenarien mit der höchsten Reduktion einen frühen Kohleausstieg bis 2038 modellieren. Den in Abbildung 33 ersichtlichen Ausreißer bei den Szenarien mit modelliertem Kohleausstieg stellt ein Szenario aus Nitsch(2019) dar, in dem zwar ein Ausstieg modelliert wird, das Reduktionsziel jedoch lediglich bei 80 % liegt. Gleichzeitig lassen sich auch ohne explizit vorgegebenen Ausstieg 95 %-ige Reduktionen erreichen, wie etwa bei Szenarien in dena(2018). Der in der Grafik erkennbare Einbruch der Emissionen zum Kohleausstiegsjahr wird verstärkt durch den Effekt, dass kurz zuvor ein nur bis 2035 modelliertes Szenario aus BMU(2019) entfällt, welches trotz Ausstieg dem Szenario mit den höchsten Emissionen (knapp 700 Mt) entspricht.

Neben dem Kohleausstieg zeigt die Definition eine Überlappung mit mehreren der zuvor vorgestellten Kriterienausprägungen. Einige Studien verwenden Trendszenarien in Abgrenzung zu Zielszenarien. Bezüglich des Kriteriums Offenheit fließen diese Trendszenarien in die niedrige Ausprägung ein, da ihre Entwicklung stärker vorgegeben ist. Die Vermutung, dass auf diese Zuordnung auch etwa die scheinbar durch Entwicklungsoffenheit geprägte Emissionsreduktion zurückzuführen ist, zeigt sich in Abbildung 34 bestätigt. Wenig entwicklungssoffene Modelle sind in ihrer Mittelung folglich nicht auf neutrale Weise beschränkt, sondern durch den Einfluss durchschnittlich weniger stark ambitionierter Trendszenarien geprägt. In ähnlicher Weise gilt dies für das Kriterium Sicherheit. Da dieses unter anderem darüber definiert ist, inwieweit sich bestimmte Entwicklungen zum heutigen Zeitpunkt schon absehen lassen, werden Trendszenarien als sicherer bewertet. Der *sichere* Entwicklungskorridor der CO₂-Preisentwicklung deckt sich damit auch mit dem in Trendszenarien angenommenen CO₂-Korridor.

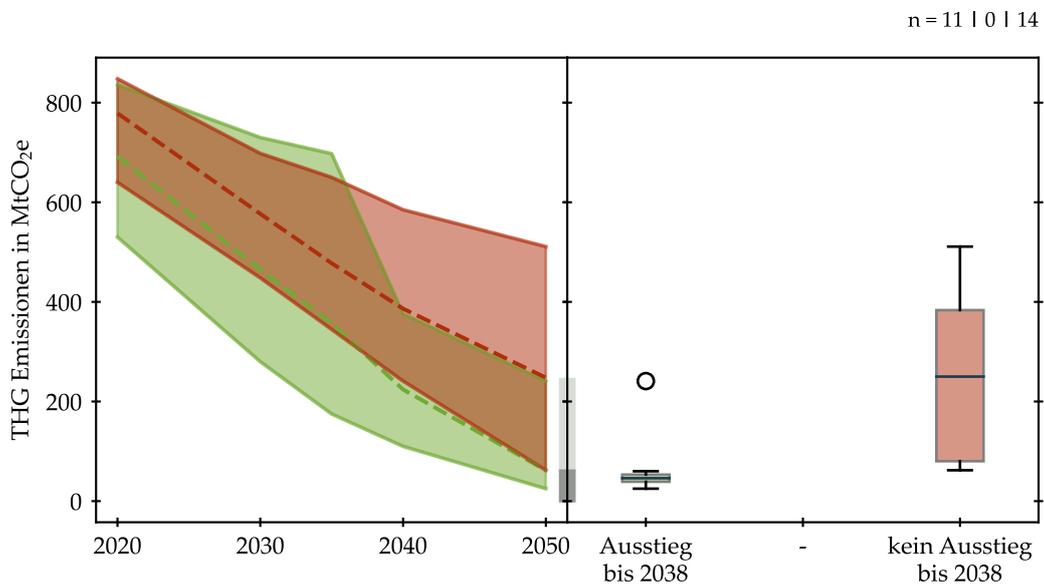


Abbildung 33 Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Modellierung eines Kohleausstiegs.

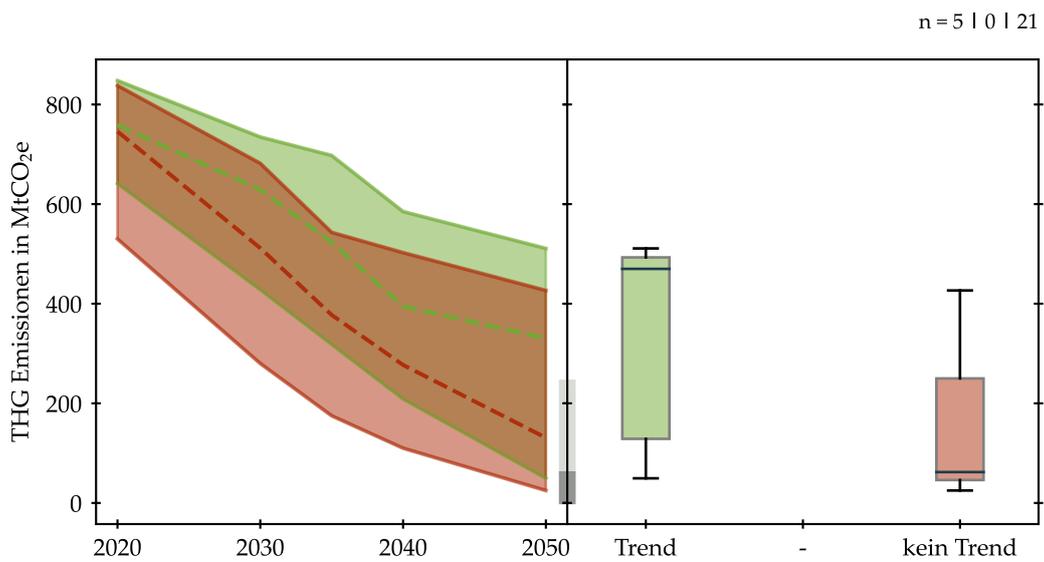


Abbildung 34 Entwicklung der Treibhausgasemissionen und Streuung im Jahr 2050 in Abhängigkeit der Modellierung als Trendszenario.

5.6 Korrelationsanalyse

Das Kapitel zur Korrelationsanalyse hat das Ziel Abhängigkeit innerhalb der Energiesystemvariablen aufzuzeigen. Dabei sollen sowohl erwartete Korrelationen bestätigt, als auch unabhängige Zusammenhänge aufgedeckt werden. Dafür wird für alle vorhandenen Stützjahre (2020, 2030, 2040 und 2050) jeweils für alle Variablenpaare die Korrelation nach *Spearman* berechnet. Je Stützjahr ergeben sich jeweils etwa 60 Korrelationspaare mit einem absoluten r -Wert $\geq 0,8$. Zur grafischen Darstellung einzelner Ergebnisse wird eine Kombination aus Streudiagramm, linearer Regression und Schattierung des 95 % Konfidenzintervalls für die Regression dargestellt. Wie auch in Unterabschnitt 5.5 wird auch in diesem Abschnitt ein reduzierter Datensatz verwendet.

Beispielhaft ist in Abbildung 35 die triviale Abhängigkeit zwischen installierter EE Leistung und dem korrespondierenden bereitgestellten EE Strom (35-A) und die Abhängigkeit der THG Emissionen vom Anteil konventioneller Kraftwerke am gesamten Technologieportfolio (35-B) abgebildet. Wie zu erwarten, steigt die bereitgestellte Energiemenge aus EE mit zunehmender installierter EE Leistung, beziehungsweise steigen die THG Emissionen mit zunehmenden Anteil an konventioneller Kraftwerksleistung. Ein vergleichbares Verhalten ergibt sich auch jeweils für die im Folgenden genannten Variablenpaare, auf deren grafische Abbildung daher verzichtet wird:

- Installierte Leistung und bereitgestellte Energie einer Technologie
- Anteil einer Technologie an Gesamtkapazität und Anteil an gesamter EE Energiebereitstellung
- Installierte Leistung einer EE Technologie und gesamte EE Kapazität

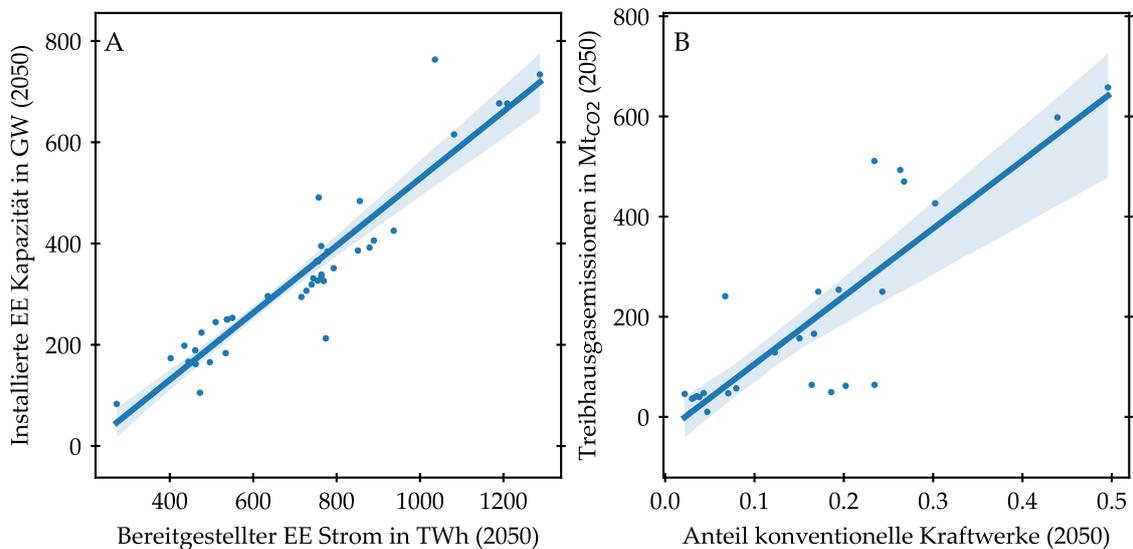


Abbildung 35 Korrelation zwischen installierter EE Kapazität und bereitgestelltem EE Strom (A), sowie Abhängigkeit der THG Emissionen vom Anteil der konventionellen Kraftwerke an der Gesamtkapazität (B) in 2050.

Abhängigkeiten zwischen zwei Technologiegruppen, wie die erzeugte Energiemenge durch konventionelle Kraftwerke und die Nutzung von EE zeigt ebenfalls den erwarteten linearen Zusammenhang (Abbildung 36). Mit EE Anteilen an der gesamten Stromerzeugung Richtung 100 % muss jedoch nicht zwangsläufig die konventionelle Kraftwerksleistung gegen Null laufen. Wie in Unterabschnitt 5.3 diskutiert, gibt es einige Szenarien, in denen auch in vollständig klimaneutralen Energiesystemen konventionelle Kraftwerksleistung genutzt wird, um flexible Leistung bereitzustellen. In diesen Fällen dann auf Basis erneuerbarer Energieträger.

Nach Ausschluss selbsterklärender Korrelationen können noch folgende Abhängigkeiten aufgezeigt werden:

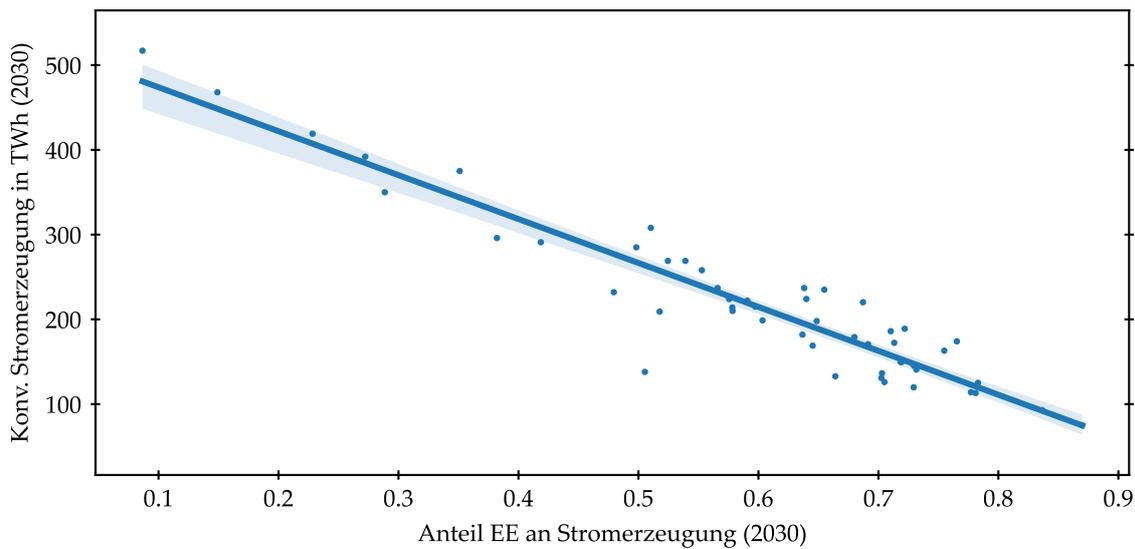


Abbildung 36 Zusammenhang zwischen konventionellen Stromerzeugung und Anteil an EE an der Gesamtstromerzeugung in 2020.

- Demand Side Management (DSM) Kapazität und Anteil EE an Gesamtkapazität
- DSM Kapazität und Anteil konventioneller Kraftwerke an Gesamtkapazität
- Speicherkapazität und Anteil der Kapazität von Biomassekraftwerke an der Gesamtkapazität
- Speicherkapazität und Anteil Stromerzeugung durch Biomassekraftwerke an Gesamterzeugung aus EE

Auch in den genannten Variablenpaaren sind keine unerwarteten Korrelationen enthalten. Die Abhängigkeiten des Bedarfs an Speicherkapazität oder DSM von den jeweils installierten Kapazitäten an EE oder konventionellen Kraftwerken lässt sich jeweils durch den Bedarf an Flexibilität im Gesamtsystem erklären. Höhere Anteile an EE benötigen aufgrund ihrer höheren Volatilität mehr flexible Leistung im System, was zu steigenden DSM Kapazitäten führt. Im Gegensatz dazu sinkt die DSM Kapazität mit steigendem Anteil an konventioneller Leistung. Einen gegenläufigen Trend haben auch Biomassekraftwerke und die benötigte Speicherkapazität, da beide Technologien zur Bereitstellung von Flexibilität genutzt werden können. Als Beispiel sind in Abbildung 37 die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zu zwei ausgewählten Variablenpaaren abgebildet.

Zusammenfassung Die Anwendung gängiger Methoden zur Berechnung von Abhängigkeiten zwischen jeweils zwei Energiesystemvariablen bestätigt zunächst die offensichtlich erwarteten Korrelationen. Über die allgemein bekannten Abhängigkeiten oder zu erwartenden Korrelationen hinaus können keine weiteren Aussagen getroffen werden. Grund hierfür sind unter Anderem zu geringe Datenmengen oder eine zu geringe Signifikanz. Unabhängig davon ist die Aussagekraft einer rein mathematisch bestimmten Korrelation noch nicht ausreichend für die Bestätigung der Kausalität. Die Berechnung der Korrelation sollte daher stets nur als Methodik zum Aufzeigen von eventuell Modellbasierten Abhängigkeiten dienen beziehungsweise als Startpunkt für ausführlichere Analysen.

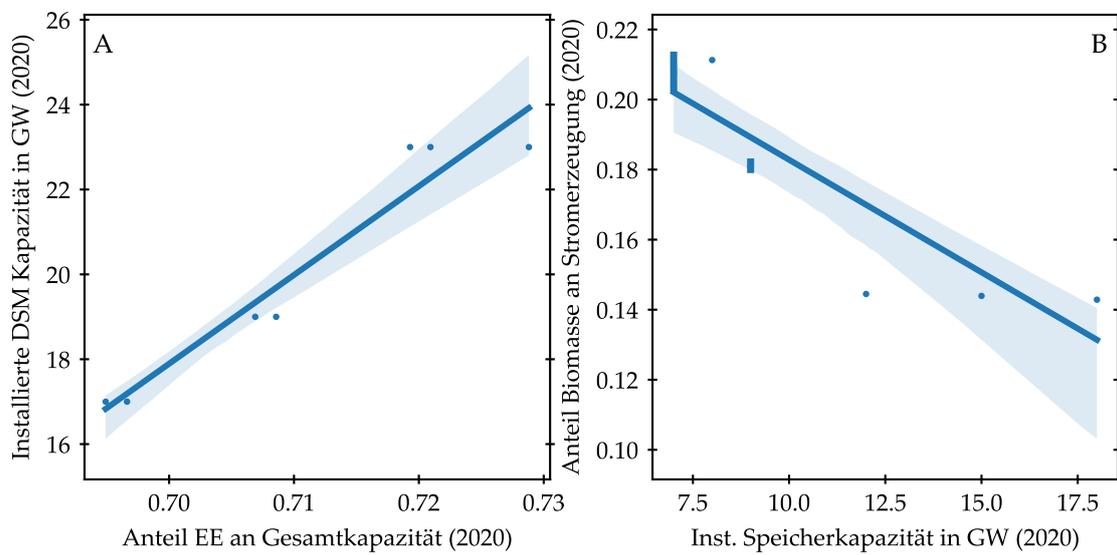


Abbildung 37 Abhängigkeit der installierten DSM Kapazität vom Anteil der EE an der Gesamtkapazität (A) und Abhängigkeit der Speicherkapazität von der Biomassenutzung zur Stromerzeugung (B) in 2020

5.7 Diskussion und Limitationen der Betrachtung

Dieser Abschnitt dient der kritischen Bewertung der Metaanalyse im Allgemeinen und im Speziellen.

Metaanalysen Ein zentraler Faktor bei der Erstellung von Metaanalysen ist die Verfügbarkeit an Informationen zur Modellgrundlage und Annahmen. Nur wenige betrachtete Studien weisen umfangreiche Anhänge auf, in welchen allen relevanten Variablen eindeutig Werte für die gesamte Zeitreihe des Betrachtungsraums zugeordnet werden. Dies betrifft etwa Brutto- und Nettowerte nicht nur für Kapazitäten, sondern auch Erzeugungsmengen oder eine Angabe der Volllaststunden oder auch Emissionswerte. Eine Umrechnung ist aufgrund unterschiedlicher Systemgrenzen, Effizienzannahmen und Zuteilung von Energieträgern oft nicht ohne weiteres möglich oder bedingt zusätzlichen Informationsverlust. Die Vielfalt der Energiesystemmodelle erschwert es, die internen Berechnungen nachzuvollziehen. Auch andere Metastudien geben an, dass eine genaue Identifikation der Gründe für die Unterschiede zwischen Ergebnissen zuweilen nicht möglich ist [20]. Eine Vereinheitlichung der Ein- und Ausgangsgrößen sowie Richtlinien zur Benennung und Unterteilung der Größen würde einen Vergleich deutlich vereinfachen. Ebenfalls sollte es gängige Praxis werden, auch den kumulierten Energieaufwand bzw. die kumulierten Emissionen darzustellen. Die Vergleichbarkeit der Studien erschwert sich auch durch einen zeitlichen Aspekt. Das Energiesystem ist einem ständigen Wandel unterworfen. Dies zeigt sich darin, dass nur wenige Jahre ältere Studien schon eine hohe Streuung der Schätzungen für 2020 bedingen. Mehrjährige Projekte scheinen diesen Wandel nicht abzubilden, sondern stets nur die Bedingungen zu Projektstart zu berücksichtigen. Um sich an schnelle Politikänderungen anzupassen, müssten Studien laufend aktuell gehalten werden. Letztlich sollte im Hinblick auf die Verlässlichkeit der Statistiken stets berücksichtigt werden, dass unter die Abhängigkeiten im Energiesystem auch Abhängigkeiten von der Perspektive bestimmter Akteursgruppen fallen. Diese kommen im Falle von Energiesystemstudien zum Tragen, indem unter Umständen die Informationen und besonders Interpretationen einer Verzerrung durch die Interessen der jeweiligen Auftraggeber oder Institute unterliegen. Verantwortlich hierfür kann schon eine reine Tendenz zur Bestätigung sein, wie sie sich insbesondere in komplexen Systemen mit unsicherer Zukunftsentwicklung auswirkt.

Diskussion zur Szenarieneinteilung und Kategorisierung Bezüglich der Auswahl und Definition der Kriterien zeigt die Analyse der Energiesystemvariablen noch Potenzial für Verbesserungen auf. So können Korrelationen über strikter definierte Kriterien reduziert werden. Der Parameter Offenheit etwa integriert in seiner verwendeten Definition verschiedene Faktoren wie Trendszenarien, den Fokus auf eine bestimmte Technologie oder weitere Beschränkungen. Dadurch kann er im Ganzen nicht mehr trennscharf angewendet werden. Auch bei der Sektorenkopplung ist eine stärkere Abgrenzung zur Effizienz nötig. Entgegen der Erwartung zeigt die Gruppe der gering ambitionierten Szenarien ein progressiveres Verhalten im Hinblick auf die Energiewende als Trend- oder Referenzszenarien. Meist liegt diese Kategorie nur auf einem knapp niedrigerem Ambitionsniveau als die Kategorie der ambitionierten Szenarien. Grund hierfür ist, dass die Gruppe der gering ambitionierten Szenarien auch jene enthält, in welchen die Klimaziele zwar eingehalten werden die Unterstützung von Seiten der Bevölkerung jedoch fehlt. Gerade solche Varianten weisen hohe Energiebedarfe auf und führen meist zu vergleichsweise hohen Gesamtkosten. Trendszenarien beschreiben ein System, in dem zukünftig keine neuen Fortschritte im Energiesystem erzielt werden und in der die Entwicklung der letzten Jahre fortgeführt wird. Da unser Energiesystem jedoch einer starken Dynamik unterliegt, ist diese Kategorie eher als unrealistisch einzustufen. Referenzszenarien sind meist zwischen ambitionierten und Trendszenarien einzuordnen. Die Verwendung eines Referenzfalls für den Vergleich mit anderen Szenarien enthält jedoch studienübergreifend keine klare Charakteristik, weswegen diese Kategorie am schwersten zu bewerten ist. Ambitionierte Szenarien auf der anderen Seite weisen die größte Datenbasis auf. Zwar zeigt sich meist ein eng verlaufender Interquartil, die gesamte Spannweite der Szenarienergebnisse zeigt jedoch die größte Streuung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Metaanalyse von 54 Studien, beziehungsweise 192 Szenarien hat das Ziel aktuelle Trends in Energiesystemstudien herauszuarbeiten. Dabei liegt der Fokus auf Themen wie die angenommene Entwicklungen von Systemparametern für den Zeitraum 2030 bis 2050, eine Analyse älterer Studien, ein Vergleich der Szenariendefinition oder Abhängigkeiten innerhalb der Energiesystemvariablen.

Allgemeine Trends Die aktuellen Ziele der Regierung decken sich deutlich stärker mit den Annahmen und Berechnungen aktueller Studien als noch vor wenigen Jahren. Grund hierfür ist zum einen die Aktualität und Präsenz der Themen in der Bevölkerung. Aber auch die mittlerweile große Datenbasis auf der die Politik Entscheidungen treffen kann, wächst stetig. Zusammenfassend zeigt die Analyse der Ergebnisse aber auch der Annahmen der aktuellen Systemstudien, dass das Erreichen der Klimaziele durchaus möglich ist. Dabei werden in den Studien mehrere Wege aufgezeigt, die die Klimaneutralität des deutschen Energiesystems ermöglichen. Jedoch bedarf es insbesondere bezüglich der Sektoren Mobilität, Wärme und Industrie noch ambitionierter Entscheidungen, um die Transformation anzustoßen. Der Bedarf an synthetischen Energieträgern wird insbesondere in diesen Sektoren wichtig werden. Für den Weg der Transformation werden auch weiterhin konventionelle Kraftwerke eingesetzt werden. Zunächst erdgasbetrieben, im späteren Verlauf basierend auf Power-to-X Produkten. Insbesondere der Bedarf an Power-to-X Anwendungen und die direkte Elektrifizierung von heutzutage noch fossilen Technologien wird einen starken Anstieg des Strombedarfs Deutschlands bedingen. Hier liegt auch der größte Unterschied zu älteren Studien, in denen ein nahezu konstanter Bedarf an elektrischer Energie für die kommenden Jahrzehnte angenommen wurde.

Szenariendefinition Die Definition der Szenarien hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse, wobei die Definition mit den jeweiligen Annahmen und Randbedingungen gleichzusetzen ist. Gerade das Ambitionsniveau und die gesellschaftliche Akzeptanz spielen eine große Rolle. Ohne, dass die Gesellschaft hinter den politischen Entscheidungen steht, wird der Wandel hin zur Klimaneutralität nicht gelingen.

Korrelationen Die Anwendung statistischer Methoden zur Analyse von Systemstudien hat gezeigt, das hauptsächlich absehbare Verhalten bestätigt werden können. Unerwartete Zusammenhänge sind nicht signifikant nachweisbar. Die Methodik empfiehlt sich daher insbesondere, um das eigne Vorgehen bei der Studiererstellung auf ungewünschte Korrelationen zu untersuchen.

Lücken in aktuellen Systemstudien Energiesystemstudien waren und sind auch noch immer Abstraktionen der Realität. Aufgrund der Komplexität des Energiesystems wird auch in absehbarer Zukunft keine Änderung dahingehend erwartet. Nichtsdestotrotz sollten Themen wie der Einfluss von Extremereignissen, Ökobilanzierung oder Vereinfachungen der Netzdarstellung genauer betrachtet werden. Ebenso wird nur in den wenigsten Fällen über die reine Bedarfsabdeckung hinaus die benötigte installierte Kapazität betrachtet, beispielsweise Regelleistung oder Kaltstartfähigkeit.

Metaanalysen Der Bedarf an Metaanalysen steigt, insbesondere aufgrund der stark zunehmenden Zahl an Studien zu vielfältigen Themen. Gerade die Schwerpunkte der Transformation des Industriesektors oder die allgemeine Anwendungen von synthetischen Energieträgern und Speichersystemen muss noch weiter untersucht werden. Allgemein wäre ein vereinheitlichtes Vorgehen bei der Erstellung von Systemstudien wünschenswert, um eine direkte Vergleichbarkeit in kommenden Metaanalysen zu gewährleisten.

Funding

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung bei der VGB-FORSCHUNGSSTIFTUNG (Projekt Nr.: 441).

Acknowledgement

Die Autoren bedanken sich des Weiteren besonders bei Saskia Böck, Fanning Zheng, Peggy Huang und Philipp Råde für deren Unterstützung bei der Recherche und Aufbereitung der Datensätze.

Literatur

- [1] Corinne Le Quéré u. a. „Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement“. In: *Nature Climate Change* 10.7 (2020), S. 647–653. ISSN: 1758-678X. DOI: 10.1038/S41558-020-0797-X.
- [2] Agora Energiewende. *Abschätzung der Klimabilanz Deutschlands für das Jahr 2021*. 2021.
- [3] Bundesnetzagentur, Hrsg. *SMARD Strommarktdaten*. 2021. URL: www.smard.de.
- [4] Alexander Buttler und Hartmut Spliethoff. *Kampf der Studien: Eine Metaanalyse aktueller Energiesystemstudien zum Bedarf an Speichern und konventionellen Kraftwerken im Kontext der Annahmen und der historischen Entwicklung*. Hrsg. von Lehrstuhl für Energiesysteme. 2016.
- [5] Avinash Subramanian, Truls Gundersen und Thomas Adams. „Modeling and Simulation of Energy Systems: A Review“. In: *Processes* 6.12 (2018), S. 238. DOI: 10.3390/pr6120238.
- [6] Armin Grunwald. „Energy futures: Diversity and the need for assessment“. In: *Futures* 43.8 (2011), S. 820–830. ISSN: 00163287. DOI: 10.1016/j.futures.2011.05.024.
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hrsg. *Kommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“: Abschlussbericht*. 2019. Kohlekommission.
- [8] Deutsche Energie-Agentur GmbH, Hrsg. *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende: Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050*. 2018.
- [9] Philip Gebert u. a. *Klimapfade für Deutschland*. Hrsg. von Boston Consulting Group und Prognos AG. 2018.
- [10] Öko-Institut e.V. und Prognos AG. *Zukunft Stromsystem II: Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung: Vom Ziel her denken*. Hrsg. von WWF Deutschland. 2018.
- [11] Sebastian Miehl* u. a. *100 % erneuerbare Energien für Bayern: Potenziale und Strukturen einer Vollversorgung in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität*. 2021.
- [12] Alena Hahn, Nora Szarka und Daniela Thrän. „German Energy and Decarbonization Scenarios: “Blind Spots” With Respect to Biomass-Based Carbon Removal Options“. In: *Frontiers in Energy Research* 8 (2020). DOI: 10.3389/fenrg.2020.00130.
- [13] Agentur für Erneuerbare Energien e.V., Hrsg. *Metaanalyse: Zusammenspiel von Strom- und Wärmesektor für die Energiewende*. 2017.
- [14] Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher und Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg. *Analyse sektorenübergreifender Studien zur Dekarbonisierung des deutschen Energiesystems: Metastudie*. Regensburg, 2016.
- [15] acatech/Leopoldina/Akademienunion. *Sektorkopplung: Optionen für die nächste Phase der Energiewende*. Berlin, 2017.
- [16] acatech/Leopoldina/Akademienunion. *Zentrale und dezentrale Elemente im Energiesystem: Der richtige Mix für eine stabile und nachhaltige Versorgung*. Berlin, 2020.
- [17] Soner Candas u. a. „Meta-analysis of country-specific energy scenario studies for neighbouring countries of Germany“. In: *16th IAEE European Conference*. Hrsg. von IEAA. 2019.
- [18] M. Wietschel u. a. *Metastudie Wasserstoff - Auswertung von Energiesystemstudien: Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats*. Hrsg. von Fraunhofer IEG, Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE. 2021.
- [19] ESYS, dena und BDI. *Expertise bündeln, Politik gestalten – Energiewende jetzt! Essenz der drei Grundsatzstudien zur Machbarkeit der Energiewende bis 2050 in Deutschland*. Hrsg. von Geschäftsstelle „Energiesysteme der Zukunft“, Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. und Deutsche Energie-Agentur GmbH. Berlin, 2019.

- [20] Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Navigant Energy Germany GmbH und Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung. *Energiewende in der Industrie: Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Industriesektor: Abschlussbericht zum Arbeitspaket 1 an: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*. 2019.
- [21] Ecofys Germany GmbH, Hrsg. *Metaanalyse aktueller Studien zum Thema „Sektorenkopplung“: Welchen Beitrag kann Power-to-Gas für die Erreichung der Klimaziele leisten?* 2018.
- [22] Ilja N. Bronstejn u. a. *Taschenbuch der Mathematik*. 11., aktualisierte Auflage. Edition Harri Deutsch. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer GmbH & Co. KG, 2020. ISBN: 9783808557921.
- [23] Udo Kuckartz u. a. „Korrelation: Zusammenhänge identifizieren“. In: *Statistik*. Hrsg. von Udo Kuckartz u. a. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2010, S. 189–213. ISBN: 978-3-531-16662-9. DOI: 10.1007/978-3-531-92033-7{\textunderscore}9.
- [24] Henrik Lund u. a. „Simulation versus Optimisation: Theoretical Positions in Energy System Modelling“. In: *Energies* 10.7 (2017). DOI: 10.3390/en10070840.
- [25] BMWi, Hrsg. *Energiedaten: Gesamtausgabe Grafiken*. 2019.
- [26] Umweltbundesamt, Hrsg. *Nationale Trendtabellen für die Treibhausgas-Emissionen nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes: 1990-2019*. 2020.
- [27] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *Kerninhalte der Referentenentwürfe des BMWK zur Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, zur Novelle des Wind-auf-See-Gesetzes und zum EEG-Entlastungsgesetz*. 2022. URL: www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Service/Gesetzesvorhaben/referentenentwurf-erneuerbaren-energien-und-weiteren-massnahmen-im-stromsektor.
- [28] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *DE Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. 2022. URL: www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Zeitreihen.
- [29] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. *Die Nationale Wasserstoffstrategie*. 2020.
- [30] Andreas Hanel, Sebastian Fendt und Hartmut Spliethoff. „Operation of Conventional Power Plants During the German Energy Transition: a Mini Review“. In: *Frontiers in Energy Research* (2022). DOI: 10.3389/fenrg.2022.907251.
- [31] Umweltbundesamt, Hrsg. *Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2021 gemäß Bundesklimaschutzgesetz. Begleitender Bericht*. 2022. URL: www.umweltbundesamt.de/emissionen.

Kampf der Studien - Ein Update

Zusatzinformationen und Anhang zur Metastudie

Andreas Hanel   **Sebastian Fendt** , und **Hartmut Spliethoff** 

Lehrstuhl für Energiesysteme, Technische Universität München

 andreas.hanel@tum.de

August 2022

Inhaltsverzeichnis

A	Übersicht der betrachteten Studien	II
B	Zuordnung der Charakteristika	XIV

A Übersicht der betrachteten Studien

Tabelle 1 Detaillierte Übersicht und Beschreibung aller verwendeten Studien.

Kürzel	Titel	Autoren	Beschreibung	Zeitraum	N _{Szn.}
EnerH2(2021)	Wasserstoffbasierte Industrie in Deutschland und Europa	enervis	Übergeordnetes Ziel ist die Treibhausgasneutralität in der Industrie 2050; keine Berücksichtigung von blauem Wasserstoff wegen eingeschränktem Potential von CCS	2050	2
BMWi(2021)	Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050	Prognos, Fraunhofer ISI, IINAS, GWS	Aufteilung in die Nachfragesektoren Industrie, Verkehr, Haushalte und GHD; Die Studie führt in den Zielszenarien bestimmte Maßnahmen-sets ein und versucht, die Ergebnisse wie Strom- einsparung oder THG-Minderung direkt auf jene zurückzuführen	2050	4
Con(2021)	Strommarkt und Klimaschutz: Transformation der Stromerzeugung bis 2050	Connect Energy Economics GmbH	Vorgabe von CO ₂ -Minderungspfaden; "CO ₂ -Preise ergeben sich endogen aus den Kosten der Grenzvermeidungstechnologie [...]"; Energie-Only-Marketdesign (EOM); WP- und PtH-Kapazitäten exogen vorgegeben; Bottom-Up-Potenzialanalyse für Wind und Solarenergie in Europa	2050	10
Agora(2021)	Klimaneutrales Deutschland 2045	Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut	Branchenübergreifende Studie zur Realisierung von Klimaneutralität bis 2045: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, LULUCF, Abfall	2045	1
NEP(2021)	Netzentwicklungsplan Strom 2035	ÜNB	Aktualisierung von NEP(2019), Fokus auf Maßnahmen zur bedarfsgerechten Optimierung, zur Verstärkung und zum Ausbau des deutschen Strom-Übertragungsnetzes	2035	3

BEE(2021)	Das „BEE-Szenario 2030“	Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.	Aktualisierung von BEE(2019), Neuerungen: Einbindung des EU-Beschlusses (Green Deal) 65 % THG-Reduktion bis 2030 ggü. 1990, Berücksichtigung von Geothermie, weitere kleinere Anpassungen, neues Referenzjahr 2019	2030	1
dena(2021)	Zwischenbericht: dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität	dena	— Nur Verwendung qualitativer Aussagen aus dem Zwischenbericht —	2050	-
Agora(2020)	Klimaneutrales Deutschland	Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut	Branchenübergreifende Studie zur Realisierung von Klimaneutralität bis 2050: Energiewirtschaft, Industrie, Gebäude, Verkehr, Landwirtschaft, LULUCF, Abfall	2050	2
RWE(2020)	Strommarktentwicklung und Braunkohlebedarf unter der Prämisse des Braunkohleausstiegspfads	enervis	Sensitivieren von Parametern ggü. Referenz, die einen starken Einfluss auf den Braunkohlebedarf vermuten lassen; Fokus auf Kapazitätsbilanzen und rheinisches Kohlerevier	2040	4
ISE(2020)	Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem	Fraunhofer ISE	Einflüsse gesellschaftlicher Unterstützung auf die Energiewende; Bedeutung inländischer Wasserstoffwirtschaft (insb. in Szenarien wie "Beharrung")	2050	6
UBA-Pol(2020)	Politiksznarien VIII	Öko-Institut, Fraunhofer ISI	Bewertung der Wirkung energiepolitischer Instrumente/geplanter oder bereits getroffener Maßnahmen	2050	3

ENSURE(2020)	Transformation des Energiesystems bis zum Jahr 2030	Öko-Institut, KIT, EWI, RWTH Aachen, Deutsche Umwelthilfe	"Die grundlegende Fragestellung in ENSURE ist, welchen Anteil jeweils zentrale und dezentrale Versorgungselemente unter technologischen, umweltbezogenen und gesellschaftlichen Randbedingungen am Gesamtsystem einnehmen sollten und welche Anpassungen in den Übertragungs- und Verteilnetzen hierfür notwendig sind."(S.5f); Bewertung der Entwicklungspfade aus Stakeholder-Sicht	2050	4
Jülich(2020)	Wege für die Energiewende - Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050	Forschungszentrum Jülich	Untersuchung des Energiesystems in 2050 mit 80 bzw. 95 % THG-Reduktion; Berechnung basiert auf eigens entwickelter Modellfamilie bestehend aus einem nationalen Energiesystemmodell, einem europäischen Stromnetzmodell, einem EE-Potentialmodell, einem globalen Handelsmodell für EE und einem nationalen H2-Infrastrukturmodell	2050	2
umlaut(2020)	Wasserstoff- Studie. Chancen, Potentiale & Herausforderungen im globalen Energiesystem.	umlaut GmbH, Energy-Transition Consulting	Untersuchung der weltweiten Potentiale von Wasserstoff unter der speziellen Betrachtung von Deutschland als Vergleich	2050	2
EWI(2019)	Auswirkungen einer Beendigung der Kohleverstromung bis 2038 auf den Strommarkt, CO ₂ -Emissionen und ausgewählte Industrien	Energie-wirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln (EWI)	Moderater Anstieg der Stromnachfrage, moderate Elektrifizierung der Verbrauchssektoren; Orientierung an dena-Leitstudie bei den Randbedingungen; Maßnahmen gemäß EEG 2017	2050	2

BMU(2019)	Projektionsbericht der Bundesregierung 2019	BMU	Projektionsbericht, der alle zwei Jahre der EU vorgelegt werden muss und eine Schätzung der zukünftigen THG-Emissionen beinhalten muss Technologie- und Emissionspfad bis 2035 mit speziellem Emissionsberechnungsmodell	2035	1
WWF(2019)	Zukunft Stromsystem II - Regionalisierung der erneuerbaren Stromerzeugung	Öko-Institut, Prognos	zwei alternative Zubaupfade der Stromerzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien; Berücksichtigung von Naturschutzinteressen; Landkreisscharfe Auflösung	2050	2
Öko(2019)	Modellbasierte Szenarienuntersuchung der Entwicklungen im deutschen Stromsystem unter Berücksichtigung des europäischen Kontexts bis 2050	Öko-Institut, Jacobs University, eclareon	Energiewende im Stromsystem charakterisiert durch Ausbau EE, Ausstieg aus konventioneller Stromerzeugung, Entwicklung Stromnachfrage; Gesamteuropäischer Ansatz; wenig isolierte Daten für Deutschland	2050	4
BEE(2019)	Das „BEE-Szenario 2030“	Bundesverband Erneuerbare Energien e.V.	Umrechnung der THG-Reduktionsziele des Klimaschutzplans in EE-Energiemengen und Effizienzsteigerungen	2030	1
Nitsch(2019)	Noch ist erfolgreicher Klimaschutz möglich	Dr. Joachim Nitsch	Aufzeigen notwendiger Umstrukturierungsmaßnahmen für Deutschland zur Erreichung des 1,5°-Ziels	2060	3

BMWi(2019)	Analyse von Strukturoptionen zur Integration erneuerbarer Energien in Deutschland und Europa unter Berücksichtigung der Versorgungssicherheit	DLR, Universität Stuttgart; Fraunhofer IEE	Endogene Ausbauoptimierung des Kraftwerksparcs in Deutschland bis zum Jahr 2050; Schwerpunkt liegt auf die Rolle von Energiespeichern, Stromnetzen sowie Last- und Erzeugungsmanagement in einem System mit hohem Anteil erneuerbarer Energien	2050	5
SET-Nav(2019)	Energy systems: Demand perspective (WP5 Summary report)	Fraunhofer ISI, TU Wien (Projekt SET-Nav)	-	2050	-
energies(2019)	Pathways for Germany's Low-Carbon Energy Transformation Towards 2050	Bartholdsen, Eidens, Löffler, Seehaus, Wejda et al. (Energies, 2019)	Minimale totale Systemkosten (Investitions- & Betriebskosten, Kosten des Handels, Kosten des Ausbaus von Handelskapazitäten, Strafen für CO ₂ -Ausstoß); Beschränkungen des Energiesystems durch maximale Kapazitäten und Nutzungsdauer; außerdem Pläne für Ausstiege (Atom, Kohle) und Emissionsbeschränkungen	2050	3
DBFZ(2019)	Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials	DBFZ	-	2050	6

RESCUE(2019)	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität	UBA	Lösungs- und Handlungsspielräume für den Weg in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität in Deutschland; Szenarien spiegeln Einflüsse unterschiedlicher Anstrengungsniveaus zur Treibhausgasneutralität wider; systemische Vorgehensweise ambitionierter Klima- und Ressourcenschutz über alle Anwendungsbereiche hinweg gemeinsam betrachtet; keine ökonomische Bewertung	2050	6
NEP(2019)	Netzentwicklungsplan Strom 2030	ÜNB	Fokus auf Maßnahmen zur bedarfsgerechten Optimierung, zur Verstärkung und zum Ausbau des deutschen Strom-Übertragungsnetzes	2030	3
DIW(2019)	Erneuerbare Energien als Schlüssel für das Erreichen der Klimaschutzziele im Stromsektor	DIW Berlin	Kostenoptimaler Kraftwerkspark unter Berücksichtigung politischer und technischer Randbedingungen	2030	5
BMW(2018)	Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland	Fraunhofer ISI, Consentec GmbH, ifeu	"wissenschaftliche Analyse für den Transformationsprozess zu einem weitgehend treibhausgasneutralen Energiesystem in Deutschland"; Aufteilung auf diverse sog. Module mit unterschiedlichen Annahmen	2050	4
dena(2018)	dena-Leitstudie Integrierte Energiewende	Deutsche Energie-Agentur GmbH	Aufzeigen von Transformationspfaden zur Erreichung der klimapolitischen Ziele 2050 mit 80 und 95 % THG-Reduktion; Ergänzung und Überprüfung von energie-wirtschaftlichen Analysen durch Einschätzungen zu Umsetzungsherausforderungen und gesellschaftlichen Fragestellungen von über 60 Studienpartnern	2050	6

BDI(2018)	Klimapfade für Deutschland	Boston Consulting Group, Prognos	Sektorübergreifende, möglichst kosteneffiziente Erreichung des Klimaziels 2050; Priorisierung der Maßnahmen nach volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten; Keine politischen Steuerungsinstrumente, nur Beschreibung technischer Maßnahmen; Aufzeigen direkter und indirekter ökonomischer Folgeeffekte	2050	5
HBS(2018)	Innovation Energiespeicher - Chancen der deutschen Industrie	Hans-Böckler Stiftung	Untersuchung, inwieweit die deutsche Industrie von Energiespeichern in den nächsten Jahrzehnten profitieren kann; Fokus liegt auf Wasserstofftechnologien und Batteriespeicher; Studie geht auch auf Investitions- und Beschäftigungseffekte ein	2050	4
BMBF(2018)	Szenarien für den Strommix zukünftiger, flexibler Verbraucher am Beispiel von P2X-Technologien	TUM	Bewertung der Flexibilität durch Power-to-X Technologien anhand mehrerer Szenarien; Ableitung eines empfohlenen Strommixes für Power-to-X Anwendungen	2050	4
UBA-Pol(2018)	Politiksznarien für den Klimaschutz VII; Treibhausgas-Emissionszenarien bis zum Jahr 2035	Öko-Institut, Fraunhofer ISI, Dr. Hans Joachim Ziesing	Entspricht im Wesentlichen dem Projektionsbericht der Bundesregierung 2015; Bewertung der Wirkung energiepolitischer Instrumente/geplanter oder bereits getroffener Maßnahmen	2035	2
TUM(2018)	The role of hydrogen, battery-electric vehicles and heat as flexibility option in future energy systems	TUM	Untersuchung der Potentiale von PtH-, PtG-Technologien und Elektrofahrzeugen im deutschen Energiesystem für das Jahr 2050	2050	2

EWI(2017)	Energiemarkt 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO ₂ -Minderung	Energiemerkant 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO ₂ -Minderung	Energiemerkant 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO ₂ -Minderung	Energiemerkant 2030 und 2050 – Der Beitrag von Gas- und Wärmeinfrastruktur zu einer effizienten CO ₂ -Minderung	2050	2
ESYS(2017)	»Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende	»Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende	»Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende	»Sektorkopplung« – Optionen für die nächste Phase der Energiewende	2050	7
UBA(2017)	Klimaschutz im Stromsektor 2030 - Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung	Klimaschutz im Stromsektor 2030 - Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung	Klimaschutz im Stromsektor 2030 - Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung	Klimaschutz im Stromsektor 2030 - Vergleich von Instrumenten zur Emissionsminderung	2030	4
Shell(2017)	Shell Energieszenarien für Deutschland	Shell Energieszenarien für Deutschland	Shell Energieszenarien für Deutschland	Shell Energieszenarien für Deutschland	2050	2
WWF(2017)	Zukunft Stromsystem - Kohleausstieg 2035	Zukunft Stromsystem - Kohleausstieg 2035	Zukunft Stromsystem - Kohleausstieg 2035	Zukunft Stromsystem - Kohleausstieg 2035	2050	8

EnerGas(2017)	Erneuerbare Gase - ein Systemupdate der Energiewende	enervis	"Der Fokus liegt auf der Frage, in welchen Bereichen und in welchem Umfang der Einsatz von Erneuerbaren Gasen technisch zwingend erforderlich und volkswirtschaftlich vorteilhaft ist."(S.13); Starker Fokus auf den Wärmesektor	2050	2
ISE(2015)	Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050	Fraunhofer ISE	-	2050	5
BMU(2015)	Klimaschutzszenario 2050 2. Endbericht	Öko-Institut, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung	-	2050	5
BMWi(2015)	Modellgestützte Bewertung von Netzausbau im europäischen Netzverbund und Flexibilitätsoptionen im deutschen Stromsystem im Zeitraum 2020–2050	Öko-Institut, Energynautics GmbH	Betrachtung der Szenario-Jahre 2020, 2030 und 2050, welche für Deutschland die Annahmen der BMU Leitstudie hinsichtlich EE-Ausbau und Stromnachfrage möglichst detailliert nachbilden.	2050	4
UBA-Pol(2013)	Politikszenerien für den Klimaschutz VI Treibhausgas - Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030	Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich (IEF-STE), DIW Berlin, Fraunhofer ISI	-	2030	2

UBA(2013)	Modellierung einer vollständigen auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen	Stefan Peter (freier Ingenieur)	-	2050	3
BMU(2011)	Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global - BMU Leitstudie 2011	DLR, Fraunhofer IWES, Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE)	-	2050	4
SRU(2011)	Wege zur 100 % erneuerbaren Stromversorgung	SRU	-	2050	8
EU(2011)	Energiefahrplan 2050		Untersuchung der Wege zur Dekarbonisierung des Energiesystems. Eine Verringerung der THG um 80 % soll erreicht werden (Verkehrssektor mit eingeschlossen)	2050	7
UBA(2010)	Energieziel 2050 - 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen	Fraunhofer IWES	-	2050	1

WWF(2009)	Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050	Öko-Institut, Prognos, Dr. Hans-Joachim Ziesing	-	2050	2
UBA-Pol(2009)	Politiksznarien für den Klimaschutz V – auf dem Weg zum Strukturwandel	Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich (IEF-STE), DIW Berlin, Fraunhofer ISI, Hans-Joachim Ziesing	-	2030	2
BMU(2008)	Weiterentwicklung der „Ausbastrategie Erneuerbare Energien“ vor dem Hintergrund der aktuellen Klimaschutzziele Deutschlands und Europas - Leitstudie 2008	Dr. Joachim Nitsch - DLR	-	2050	6
UBA-Pol(2008)	Politiksznarien für den Klimaschutz IV - Szenarien bis 2030	Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich (IEF-STE), DIW Berlin, Fraunhofer ISI	-	2030	3

UBA-Pol(2004)	Politikszzenarien für den Klimaschutz Langfristszenarien und Handlungsempfehlungen ab 2012 (Politikszzenarien III)	Öko-Institut, Forschungszentrum Jülich, DIW Berlin, Fraunhofer ISI	-	2050	6
---------------	---	---	---	------	---

B Zuordnung der Charakteristika

Tabelle 2 Zuteilung aller Szenarien aus dem ausgewählten Teildatensatz zu den Charakteristika.

Szenario	Gesellschaft	Ambition	Sicherheit	Netz	Handel	Offenheit	Sektorkopplung	Geschwindigkeit
ISE2020-Referenz	o	o	+	o	+	+	+	o
ISE2020-Beharrung	-	o	+	o	+	-	o	-
ISE2020-Inakzeptanz	-	o	+	-	-	-	+	o
ISE2020-Suffizienz	+	o	o	o	+	+	+	+
ISE2020-Referenz100	o	+	o	o	+	+	+	+
ISE2020-Suffizienz2035	+	+	o	o	+	+	+	+
WWF2019-Energiewende-Ref.	o	o	o	+	NA	o	+	NA
WWF2019-FokusSolar	o	o	o	+	NA	-	+	NA
BMWi2018-Referenz	o	-	o	+	+	o	o	-
BMWi2018-Basis	o	o	+	+	+	o	+	o
BMWi2018-geNA	o	o	+	-	-	o	+	NA
BMWi2018-RAS	o	o	o	+	+	+	NA	NA
dena2018-RF	o	-	+	+	+	-	o	-
dena2018-EL80	o	o	+	+	+	o	+	o
dena2018-EL95	o	+	+	+	+	o	+	+
dena2018-TM80	o	o	+	+	+	+	+	o
dena2018-TM95	o	+	+	+	+	+	+	+
dena2018-Bottleneck	-	o	+	-	+	o	o	-
BDI2018-Referenz	o	-	+	+	+	o	o	-
BDI2018-N80	o	o	+	+	+	+	+	o
BDI2018-N95	o	+	+	+	+	+	+	+
BDI2018-G80	o	o	+	+	+	+	+	o
BDI2018-G95	o	+	+	+	+	+	+	+
RESCUE2019-GreenEe1	o	+	o	o	+	+	+	+
RESCUE2019-GreenLate	o	+	o	o	+	+	o	-
RESCUE2019-GreenEe2	o	+	o	o	+	+	+	+
RESCUE2019-GreenMe	o	+	o	o	+	+	+	+
RESCUE2019-GreenLife	+	+	o	o	+	+	+	+
RESCUE2019-GreenSupreme	+	+	o	o	+	+	+	+
BMWi2019-Base	o	o	+	+	NA	+	NA	NA
BMWi2019-CSP	o	o	o	+	+	-	NA	NA
BMWi2019-H2	o	o	o	+	NA	-	NA	NA
BMWi2019-CSP & H2	o	o	o	+	+	-	NA	NA
BMWi2019-eHighway	o	o	+	+	NA	+	NA	NA
energies2019-SOTF	-	-	+	o	-	+	+	-
energies2019-EI	o	o	+	o	NA	+	+	o
energies2019-GD	+	+	o	o	NA	+	+	+
BEE2019	NA	o	o	NA	NA	+	+	NA
ESYS2017-60-offen	o	-	NA	+	-	+	o	NA
ESYS2017-75-offen	o	-	NA	+	-	+	o	NA
ESYS2017-85-offen	o	o	NA	+	-	+	+	NA

ESYS2017-90-offen	o	+	NA	+	-	+	+	NA
ESYS2017-85-H2	o	o	NA	+	-	o	+	NA
ESYS2017-85-PtG	o	o	NA	+	-	o	+	NA
ESYS2017-85-offen-aktiv	o	o	o	+	+	+	o	NA
Nitsch2019-Trend-19	NA	-	+	-	NA	-	o	-
Nitsch2019-KLIMA-19-PLAN	NA	o	o	o	NA	-	NA	o
Nitsch2019-KLIMA-19-OPT	NA	+	-	+	NA	NA	+	+
BMU2019-MMS	o	-	+	NA	o	-	o	-
UBA2020-MMS	o	-	+	NA	o	-	o	-
UBA2020-MWMS	o	-	o	NA	o	-	o	-
UBA2020-MEMS	o	o	o	NA	o	-	+	o
NEP2019-A2030	o	o	+	+	+	-	-	o
NEP2019-B2025-2035	o	o	o	+	+	-	o	o
NEP2019-C2030	o	o	o	+	+	-	+	o
Öko2019-amb-vernetzt	NA	+	o	NA	+	+	NA	+
öko2019-amb-gering-vernetzt	NA	+	o	NA	-	+	NA	+
Öko2019-unamb-vernetzt	NA	+	o	NA	+	+	NA	+
Öko2019-unamb-gering-vernetzt	NA	+	o	NA	-	+	NA	+
