

Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Stromversorgung in Deutschland – eine kritische Analyse von Energieprognosen

Sophia Jörg (*), Viktoria Steinberger, Manfred Wirsum

Institut für Kraftwerkstechnik, Dampf- und Gasturbinen, RWTH Aachen University,
Mathieustr. 9, 52074 Aachen, Tel.: +49 241 80 25451, Fax: +49 241 80 22307,
office@ikdg.rwth-aachen.de, www.ikdg.rwth-aachen.de

Kurzfassung:

Energieprognosen stellen ein weit verbreitetes Werkzeug dar, um zukünftige Entwicklungen von Energiesystemen anhand von modellierten Szenarien abzuschätzen.

Für den exemplarischen Fall des deutschen Stromversorgungssystems werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen ausgewählte Prognoseszenarien sowie die historische Entwicklung analysiert und einander gegenübergestellt. Dazu werden gesellschaftliche, technologische, wirtschaftliche und politische Kenngrößen identifiziert und ihr Einfluss mithilfe einer statistischen Analyse untersucht. Nicht-quantifizierte Einflüsse wie politische Rahmenbedingungen und die Veränderung der gesellschaftlichen Akzeptanz von Stromerzeugungstechnologien fließen in die Diskussion ein.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Nettostromerzeugung in Deutschland in den betrachteten Prognosen im Vergleich zur tatsächlichen Entwicklung geringer erwartet wurde, was auf eine Unterschätzung des Wirtschaftswachstums zurückzuführen ist. Die Analyse fossiler und erneuerbarer Energieträger im Hinblick auf ihren Anteil an der Stromerzeugung zeigt deutliche Diskrepanzen zwischen Prognosen und der historischen Entwicklung. Diese sind maßgeblich auf politische Entscheidungen zurückzuführen, die schwer zu prognostizieren sind. Diese regulativen Maßnahmen haben wiederum einen starken Einfluss auf die Verbreitung und die Wirtschaftlichkeit von einzelnen Technologien.

Keywords: Energieprognosen, Stromversorgungssystem

1 Einleitung

Die Dekarbonisierung der nationalen Energieversorgungssysteme ist ein zentrales Element zur Erreichung der international vereinbarten Klimaziele [1]. Bei der Gestaltung der zugrundeliegenden Transitionsprozesse dienen szenariobasierte Energieprognosen als Entscheidungsgrundlage für Akteure aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft [2].

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist eine vergleichende Analyse von Energieprognosen und historischen Entwicklungstendenzen im Hinblick auf zentrale Einflussfaktoren. Der Fokus der Untersuchung liegt dabei auf dem deutschen Stromerzeugungssystem. Im Rahmen dieser Analyse sollen mögliche Ursachen für Abweichungen zwischen prognostizierten Szenarien und der historischen Entwicklung ausgewertet und diskutiert werden.

2 Methodik

Die potentiellen zentralen Einflussfaktoren und ihre Bedeutung für die Entwicklung des deutschen Stromerzeugungssystems werden in einem mehrstufigen Analyseverfahren untersucht. Zu diesem Zweck wird die historische Entwicklung ausgewählter Analyseparameter zunächst mit der durch verschiedene Prognosen vorhergesagten Entwicklung verglichen. In diesem Kontext wird untersucht, welche Einflussfaktoren bereits durch den direkten Abgleich dieser Verläufe festzustellen sind. Darauf aufbauend erfolgt eine tiefergehende Aufschlüsselung und statistische Analyse möglicher Einflussfaktoren.

Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verwendete Einteilung der Einflussfaktoren erfolgt anhand eines metatheoretischen Systemmodells nach *Cherp et al.* [3] (siehe Abbildung 2).

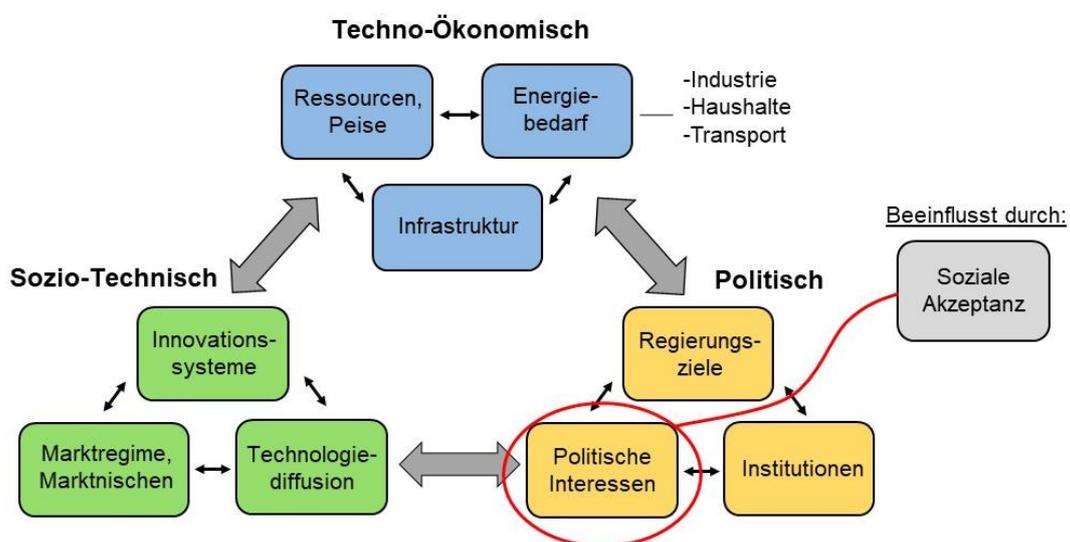


Abbildung 1: Metatheoretisches Systemmodell des deutschen Stromerzeugungssystems nach Cherp et al. [3]

Das Systemmodell unterteilt die Stromerzeugung in drei übergeordnete Teilsysteme und beschreibt deren gegenseitige Wechselwirkungen. Darüber hinaus werden die Abhängigkeiten einzelner Einflussfaktoren innerhalb der Teilsysteme beschrieben. Das techno-ökonomische Teilsystem umfasst alle Prozesse, die im Zusammenhang mit Stromproduktion und -verbrauch stehen. Einflussfaktoren aus diesem Bereich sind z.B. Rohstoffvorkommen, Kraftwerkskapazitäten sowie die Übertragungskapazität des Stromnetzes. Das sozio-technische Teilsystem umfasst soziale Vorgänge, wie das Verhalten von Verbrauchern und Zulieferern, Netzwerke von Entwicklern und Anwendern sowie vorhandenes Wissen im Zusammenhang mit Energietechnologien. Das politische Teilsystem umfasst alle Einflüsse auf die energiepolitische Ausrichtung Deutschlands und der damit einhergehenden Gesetzgebung.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einflussfaktoren sind in Tabelle 1 dargestellt. Dabei erfolgt eine Unterteilung in quantifizierte und nicht quantifizierte Faktoren, wobei die quantifizierten Einflussfaktoren mit einem hochgestellten q gekennzeichnet sind. Nicht-quantifizierte Einflussfaktoren beinhalten sowohl nicht unmittelbar quantifizierbare Einflüsse (z.B. soziale Akzeptanz) als auch Faktoren, für die im betrachteten Umfang keine ausreichende Datengrundlage vorhanden ist.

Tabelle 1: Übersicht der betrachteten Einflussfaktoren auf das deutsche Stromerzeugungssystem

Techno-Ökonomisch		
Energiebedarf	Ressourcen und Preise	Infrastruktur
Industrie <ul style="list-style-type: none"> – Energieintensität ^q – Energieeffizienz – Bruttoinlandsprodukt ^q – Bruttoproduktion ^q – Bruttowertschöpfung Gewerbe, Handel und Dienstleistungssektor ^q Haushalte <ul style="list-style-type: none"> – Zahl der Haushalte ^q – Größe der Haushalte ^q – Energieintensität ^q Transport <ul style="list-style-type: none"> – Gefahrene Kilometer (PKW und LKW) ^q – Transporteffizienz ^q 	Globale Reserven <ul style="list-style-type: none"> – Gas ^q – Kohle – Öl ^q Preise <ul style="list-style-type: none"> – Gas ^q – Kohle ^q – Öl ^q 	Energiekapazität <ul style="list-style-type: none"> – Installierte Kapazität ^q – Kapazitätsänderung ^q Netzausbau Kraft-Wärme-Kopplung <ul style="list-style-type: none"> – Elektrizität aus KWK ^q – Wärme aus KWK ^q
Sozio-Technisch		
Innovationssysteme	Marktregime, Marktnischen	Technologiediffusion
<ul style="list-style-type: none"> – Staatsausgaben für Entwicklung und Forschung ^q – Forschungsinvestitionen von anderen Organisationen 	<ul style="list-style-type: none"> – Politische Unterstützung – Regimewandel 	<ul style="list-style-type: none"> – Nationale Diffusion – Grenzübergreifende Diffusion
Politisch		
Politische Interessen	Institutionen	Regierungsziele
<ul style="list-style-type: none"> – Soziale Akzeptanz 	<ul style="list-style-type: none"> – EU Richtlinien – Globale Vereinbarungen 	<ul style="list-style-type: none"> – Versorgungssicherheit – Intelligentes Stromnetz und Digitalisierung
Politische Richtlinien		

Die quantifizierten Faktoren werden mittels einer statistischen Analyse untersucht. Hierbei wird die Pearson-Korrelation zwischen der Entwicklung der betrachteten Einflussfaktoren und der Entwicklung der zu untersuchenden Analyseparameter ausgewertet. Auf Basis der Auswertung der Pearson-Korrelation und des doppelten T-Tests [4] werden für die weitere Analyse nur Einflussfaktoren mit ausreichender statistischer Signifikanz und Korrelation berücksichtigt.

Die unabhängige Relevanz der übrigen Einflussfaktoren wird mittels einer Dominanzanalyse bestimmt [4]. Hierbei wird der individuelle Einfluss eines jeden Faktors $x_{i/j}$ auf die Änderung der Korrelation R^2 einer Untergruppe an Faktoren x_h bestimmt und mit dem Einfluss der restlichen Faktoren der Untergruppe verglichen (siehe Gleichung 1).

$$(R_{y,x_i x_h}^2 - R_{y,x_h}^2) \geq (R_{y,x_j x_h}^2 - R_{y,x_h}^2) \quad (\text{Gl. 1})$$

Dieser Direktvergleich wird für jedes Faktorpaar und jede mögliche Untergruppe durchgeführt. Hat ein Faktor für alle Untergruppen einen größeren Einfluss auf die Korrelation mit der Zielgröße als ein anderer Faktor, so wird dieser als dominant klassifiziert [5]. Ist der Einfluss auf die Korrelation überwiegend größer, wird er als partiell dominant eingeordnet [4]. Daraus resultiert ein qualitatives Ranking der Einflussfaktoren für jede untersuchte Zielgröße. Die Umsetzung der statistischen Analyse erfolgt mithilfe der Statistiksoftware *IBM SPSS Statistics* von *IBM*.

Neben der statistischen Untersuchung erfolgt eine theoretische Auswertung der Auswirkungen der nicht-quantifizierten Einflussfaktoren auf die historische Entwicklung des deutschen Stromerzeugungssystems. Die Diskussion der Einflüsse beinhaltet die Berücksichtigung historischer Entwicklungen und der Betrachtung von Einzelereignissen mit signifikantem Einfluss auf das deutsche Stromerzeugungssystem.

3 Ergebnisse

Als Grundlage für die vorliegenden Untersuchungen dienen Daten aus den EU Countrysheets [6], BP Statistiken [7], den Auswertetabellen der Energiebilanzen Deutschland [8], den Tabellen des Bundesamts für Statistik [9] sowie dem Energieforschungsbericht 2018 [10]. Die analysierten Energieprognosen wurden in den Jahren 2009 [11] und 2014 [2] im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie durchgeführt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Szenarien sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Dabei wurden Szenarien, welche eine Laufzeitverlängerung von Kernkraftwerken oder eine Verlängerung der Finanzkrise von 2008/2009 abbilden, auf Grund der abweichenden historischen Entwicklung nicht berücksichtigt.

In den Referenzszenarien aus den Jahren 2009 und 2014 werden jeweils die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung als hoch wahrscheinlich eingeschätzte Entwicklung der politischen, gesellschaftlichen, technischen und ökonomischen Rahmenbedingungen zugrunde gelegt. Im Vergleich dazu werden in den Szenarien A, B und C der Sensitivitätsanalyse von 2009 Annahmen in Bezug auf die Entwicklung einzelner zentraler Einflussfaktoren wie Rohstoffpreise, Bevölkerungswachstum und Maßnahmen zum Klimaschutz getroffen. Das in der Energieprognose 2014 betrachtete Zielszenario orientiert sich an den Zielen des Energiekonzepts der Bundesregierung [12].

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Prognoseszenarien

Energieprognose 2009 [11]				Energieprognose 2014 [2]	
Referenz-szenario	Sensitivitätsanalyse			Referenz-szenario	Klimazielenorientiert
	Höhere Rohstoffpreise	Geringeres Bevölkerungswachstum	Stärkerer Klimaschutz		
Ref. Szen. '09	Szen. A '09	Szen. B '09	Szen. C '09	Ref. Szen. '14	Zielszen. '14

3.1 Einflüsse auf die Gesamtstromerzeugung

Global steigt der Anteil der Stromerzeugung am Primärenergieverbrauch stetig [13]. Ein vergleichbarer Trend ist in Deutschland zu beobachten. Abbildung 2 zeigt einerseits die historische Entwicklung der Nettogesamtstromerzeugung in Deutschland und andererseits die prognostizierte Entwicklung, entsprechend der zuvor beschriebenen Szenarien.

Seit 1993 kann ein nahezu konstanter Anstieg der nationalen Stromerzeugung beobachtet werden. Die auffälligsten Einbrüche zeigt die historische Entwicklung in den Jahren 2009 und 2011, welche auf die Weltwirtschafts- und die Eurokrise zurückzuführen ist. Darauf folgende Fluktuationen lassen sich durch einen größeren Anteil von erneuerbaren Energien an der Stromproduktion sowie statistischen Ungenauigkeiten als Folge der Weltwirtschaftskrise erklären [8]. Die Szenarioanalysen von 2009 weichen in ihren Basisdaten, die als Grundlage für die Energieprognose dienen, bereits von der historischen Entwicklung ab. Dieser Unterschied ist nach Betrachtung der einzelnen Primärenergieträger (siehe Abbildungen 5 bis 7) auf Fehler in Daten des Gas- und Ölanteils an der Stromerzeugung, welche im Rahmen der Prognoseerstellung verwendet wurden, zurückzuführen. Ein möglicher Grund für diese Abweichung ist eine rückwirkende Korrektur des historischen Datensatzes im betrachteten Zeitraum.

Die Prognoseszenarien von 2009 zeigen, beeinflusst durch die vorherrschende Eurokrise, eine Abnahme des Elektrizitätsbedarfs bis 2025 auf. Diese Prognose hat sich jedoch nicht erfüllt, wie der historische Verlauf zeigt. Im Rahmen des Referenzszenarios von 2014 wird erwartet, dass ein Maximum der Stromproduktion im Jahr 2020 erreicht wird, gefolgt von einer abnehmenden Stromerzeugung bis 2050. Die tatsächliche Stromerzeugung lag in den Jahren 2010 bis 2015 unter den kalkulierten Werten des Zielszenarios aus dem Jahr 2014. Ein weiterer Anstieg des Strombedarfs in den darauffolgenden Jahren führte zu einer historischen Entwicklung innerhalb des von den Szenarien prognostizierten Korridors [2, 6].

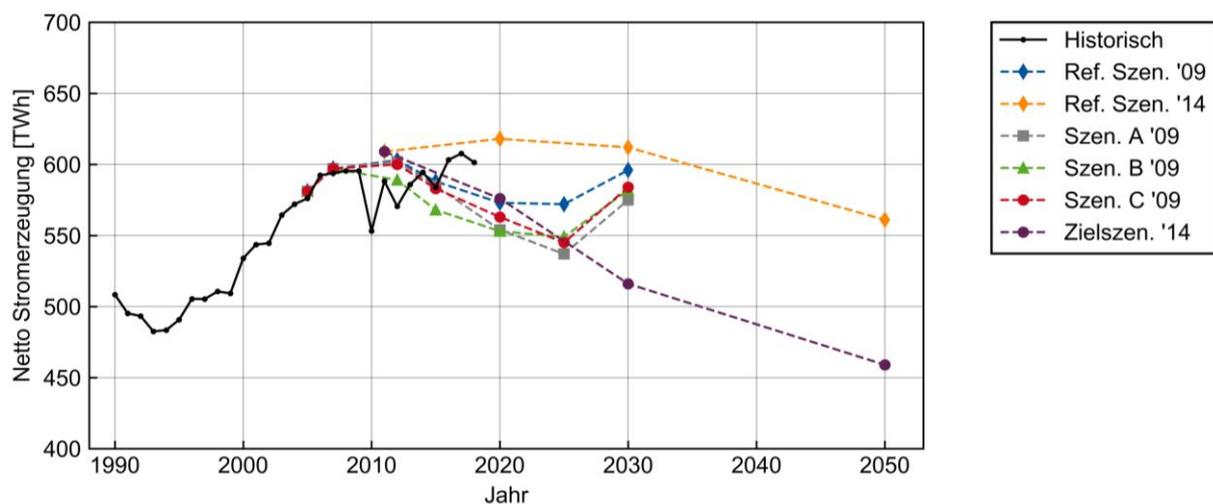


Abbildung 2: Historische und prognostizierte Nettostromerzeugung in Deutschland

Die historische Betrachtung zeigt eine eindeutige Abhängigkeit der Nettostromerzeugung von den wirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Diese Schlussfolgerung wird durch die detaillierte statistische Analyse bestätigt, aus der die in Tabelle 1 genannten Wirtschaftsleistungsfaktoren als dominanteste Einflüsse hervorgehen. Die Dominanzanalyse zeigt, dass der Gaspreis nach den wirtschaftlichen Kennzahlen den größten Einfluss auf die Entwicklung der

Stromerzeugung hat, gefolgt vom Einfluss der genutzten Wohnfläche. Diese steht stellvertretend für die Einwohnerzahl, da das Bevölkerungswachstum aufgrund mangelnder statistischer Signifikanz nicht als separater Faktor untersucht werden konnte.

3.2 Einflüsse auf die Nutzung verschiedener Primärenergieträger

Im Nachfolgenden werden die Einflüsse auf die Zusammensetzung der Nettostromerzeugung nach Primärenergieträgern betrachtet. Im Rahmen der detaillierten Betrachtung der Energieträger wird die Abhängigkeit von techno-ökonomischen, sozio-technischen und politischen Einflüssen im Detail untersucht.

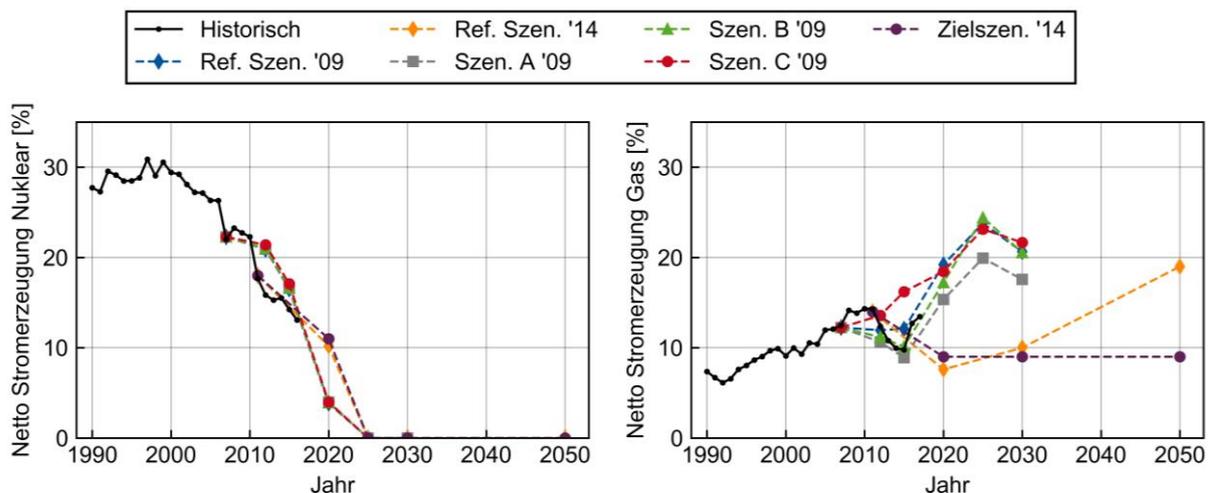


Abbildung 3: Entwicklung der Nettostromerzeugung aus Kernkraft und Gas

Abbildung 3 zeigt die reale und prognostizierte Entwicklung der Anteile von Kernenergie und Gas an der deutschen Nettostromerzeugung. Anhand des Kernenergieanteils lässt sich deutlich der Einfluss politischer Entscheidungen auf das Stromerzeugungssystem erkennen. Ausgehend von der Novellierung des Atomgesetzes im Jahr 2002 [14] ist ein stetiger Rückgang der Kernenergie in Deutschland erkennbar. Die durch die Nuklearkatastrophe von Fukushima 2011 ausgelöste dritte Novellierung des Atomgesetzes [15] hat einen drastischen Einschnitt in der Entwicklung zur Folge. Diese politische Entscheidung wurde durch den starken Rückgang der gesellschaftlichen Akzeptanz für die energetische Nutzung von Kernkraft begleitet. Da der Atomausstieg bis 2022 gesetzlich reguliert ist, zeigt die Analyse kaum Unterschiede zwischen den Prognoseszenarien eines Jahres. Es zeigt sich jedoch ein insgesamt abweichender Verlauf ab dem Jahr 2010 aufgrund der geänderten Gesetzeslage. Der starke politische Einfluss auf den Anteil der Kernenergie an der deutschen Nettostromerzeugung wird auch dadurch deutlich, dass weder die historische noch die prognostizierte Entwicklung keine relevanten, statistischen Zusammenhänge mit der untersuchten Auswahl an Einflussfaktoren aufweist.

Die Nutzung von Erdgas als Energieträger zeigt im Gegensatz zur Kernenergie die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien. Die tiefere statistische Analyse von Szenario A zeigt eine hohe Rohstoffpreisabhängigkeit der Stromerzeugung aus Gas. Die statistische Analyse der historischen Entwicklung zeigt ebenfalls eine große Abhängigkeit des Gasanteils vom Öl- und Gaspreis sowie von wirtschaftlichen Faktoren wie dem

Bruttoinlandsprodukt und der Bruttowertschöpfung in Gewerbe, Handel und dem Dienstleistungssektor.

Im Falle von stärkeren Klimaschutzmaßnahmen (Szenario C) wird ein direkter Anstieg der Gasnutzung im Elektrizitätssektor vorausgesehen. Grundsätzlich prognostizieren die Szenarien von 2009 einen Anstieg des Gasanteils, gefolgt von einer Abnahme nach 2025. Die Referenzprognose von 2014 sieht den Anstieg des Gasanteils an der Stromerzeugung erst nach 2020 voraus, jedoch ist er bereits nach 2015 wieder gestiegen. Das Zielszenario zeigt jedoch, dass zum Erreichen der Klimaziele auch der Anteil gasbasierter Stromerzeugung zurückgehen muss. Insgesamt ist in der historischen Entwicklung keine direkte politische Abhängigkeit zu erkennen.

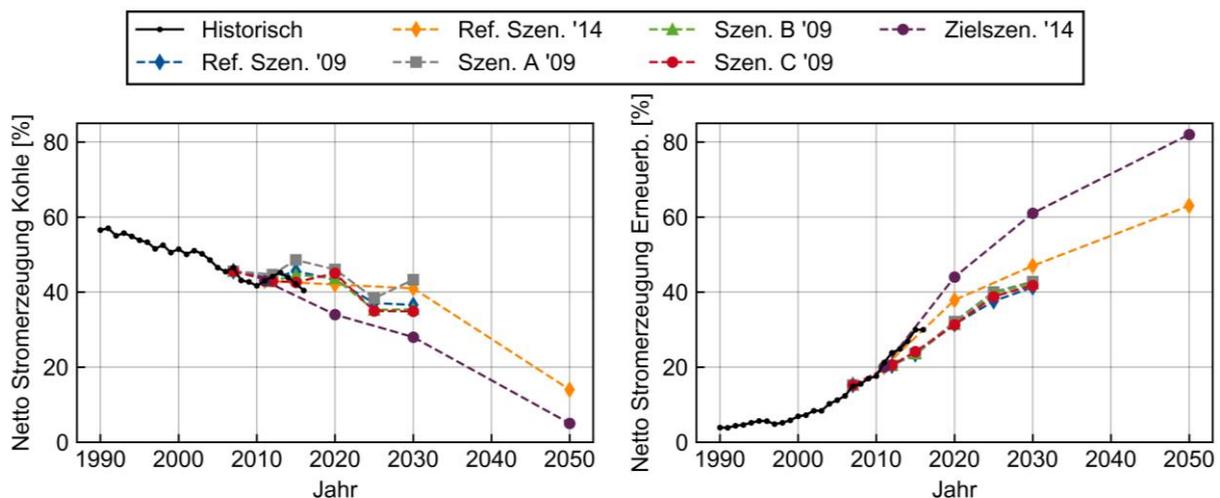


Abbildung 4: Entwicklung der Nettostromerzeugung aus Kohle und erneuerbaren Energieträgern

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung der Stromerzeugung aus Kohle und erneuerbare Energien. Im gesamten Betrachtungszeitraum von 1990 bis 2017 nimmt der Beitrag von Braun- und Steinkohle zur Nettostromerzeugung konstant ab. Dennoch liegt der Anteil der Kohlenutzung zur Stromerzeugung im Jahr 2017 immer noch über 40%. Wie das Zielszenario zeigt, müsste dieser stetige Rückgang des Anteils der Stromerzeugung aus Kohle bestehen bleiben um die Klimaziele zu erreichen. Alle Prognoseszenarien sehen jedoch einen schwächeren Rückgang oder teilweise sogar eine Zunahme des Kohleanteils voraus. Im betrachteten Fall von höheren Rohstoffpreisen (inklusive Kohle) in Szenario A nimmt der Anteil an Stromerzeugung aus Kohle dennoch zu. Die statistische Analyse der historischen Entwicklung zeigt ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse für eine Korrelation mit wirtschaftlichen Faktoren.

Der aktuelle Entwurf des Kohleausstiegsgesetzes sieht einen vollständigen Ausstieg aus der Kohlenutzung zur Stromerzeugung in Deutschland bis zum Jahr 2038 vor [16]. Durch die entsprechende Gesetzgebung wird der Rückgang des Kohlestromanteils politisch vorgegeben und durch wirtschaftliche Anreize umgesetzt [17].

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (Stand 2017) sieht eine Erhöhung des Stromanteils aus erneuerbaren Energieträgern auf 40-45% im Jahr 2020, auf 60-65% im Jahr 2035 und auf 80% im Jahr 2050 vor um die Klimaziele des Pariser Klimaabkommens zu erreichen [18]. Wie in Abbildung 4 dargestellt, sind diese Maßgaben bereits im Zielszenario berücksichtigt. Der Vergleich der historischen Entwicklung bis zum Jahr 2016 zeigt, dass die implementierten politischen Maßnahmen zur Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien die Zielvorgaben

weitestgehend erfüllen. Die vorläufige Auswertung der Daten des Jahres 2019 ergibt einen Anteil von 40,2% der Bruttostromerzeugung, der auf erneuerbare Energieträger entfällt [19].

Die statistische Analyse der Einflussfaktoren zeigt, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hauptsächlich durch den Zubau an Erzeugungskapazitäten bestimmt ist. Diese Korrelation weist bei konventionellen Stromerzeugungstechnologien keine relevante Signifikanz auf, da die installierte Leistung in diesen Fällen kein limitierender Faktor für den Anteil der Stromerzeugung darstellt. Dadurch, dass der Ausbau von Windenergie-, Solar- und Biomasseanlagen gesetzlich durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz 2017 [18] gesteuert wird, ist der politische Einfluss hier maßgeblich. Dies wird durch die statistische Analyse bestätigt, wonach der Einfluss wirtschaftlicher Faktoren eine schwächere Korrelation aufweist als die installierte Leistung. Die Tatsache, dass die Mehrheit der Bevölkerung den erneuerbaren Technologien positiv gegenübersteht, wirkt sich ebenfalls indirekt auf die Entwicklung aus [20]. Im Gegensatz zur historischen Entwicklung zeigen die untersuchten Prognoseszenarien, mit Ausnahme des Zielszenarios, die stärkste Korrelation mit dem Bruttoinlandsprodukt. Die Überschätzung des wirtschaftlichen Einflusses im Rahmen der Szenariomodellierung hat die in Abbildung 4 ersichtlichen Abweichungen zur Folge. Anhand der Diskrepanz von etwa 15 Prozentpunkten lässt sich das Ausmaß des politischen Einflusses und der fehlenden Wirtschaftlichkeit des Ausbaus unter den aktuellen ökonomischen Randbedingungen (ohne Berücksichtigung von Subventionen) ableiten.

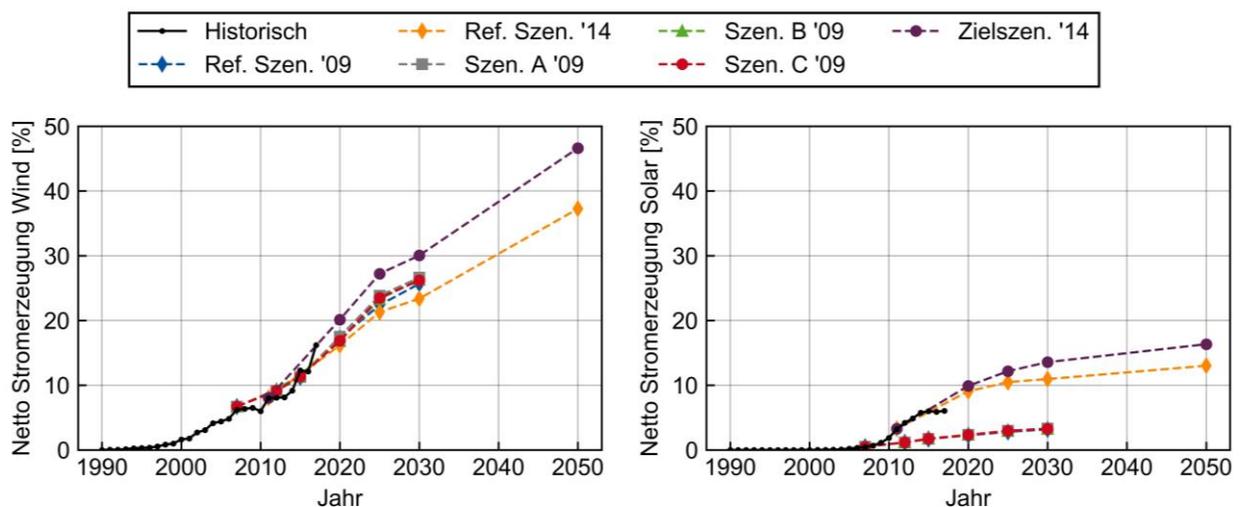


Abbildung 5: Entwicklung der Anteile von Wind- und Solarenergie an der Nettostromerzeugung

Aufgrund der geografischen Gegebenheiten in Deutschland wird der größte Teil erneuerbarer Energie aus Windkraft gewonnen, gefolgt von Solarenergie (hauptsächlich Photovoltaik) und Biomasse. Im Rahmen der vorliegenden Betrachtung wird der Fokus auf die Entwicklung volatiler Stromerzeugungstechnologien gelegt. Die Entwicklung des entsprechenden Anteils der Wind- und Solarenergie an der Stromerzeugung in Deutschland ist in Abbildung 5 dargestellt.

Seit Mitte der 1970er Jahre nimmt die gesellschaftliche Akzeptanz von Kernenergie aufgrund der Fragestellung hinsichtlich der Endlagerung radioaktiver Abfälle stetig ab. Bedingt durch den Wandel in der öffentlichen Wahrnehmung beauftragte das Bundesministerium für Bildung und Forschung eine 1981 vollendete Untersuchung des deutschen Energiesystems [21]. Die

Studie zeigt, dass ein Energiesystem basierend auf erneuerbaren Energien und Energieeffizienzsteigerung eine wirtschaftliche Alternative zu einem System basierend auf Kernenergie darstellt. Daraufhin, und besonders nach der Nuklearkatastrophe in Tschernobyl 1986, wurde die Forschung im Bereich erneuerbarer Energietechnologien intensiviert. Im Anschluss begann die Formationsphase der Wind- und Solarenergie, in der erste Marktnischen mit politischer Unterstützung erschlossen wurden [21].

In den 1990er Jahren folgte der weitere Ausbau mit starkem Wachstum als erste Installationsprojekte von Windenergieanlagen vorangetrieben wurden (siehe Abbildung 5). Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) von 2000 wurden erstmals feste Einspeisevergütungen in Verbindung mit dem Einspeisevorrang von Strom aus erneuerbaren Energien verankert [22]. Die Wirkung dieser politischen Maßnahme ist besonders an dem Verlauf der Stromerzeugung aus Windenergie in Abbildung 5 ersichtlich. Durch die Wirtschaftskrise ist allerdings auch in der Entwicklung des Windenergieanteils ein Einbruch in den Jahren 2008 – 2010 zu erkennen.

Die Prognoseszenarien aus dem Jahr 2009 zeigen einheitlich einen Anstieg des Anteils der Windenergie auf etwa 26% bis 2030. Die tatsächliche Entwicklung übersteigt die prognostizierten Erwartungen im betrachteten Zeitraum teilweise. Wie bei der Analyse aller erneuerbaren Energieträger, zeigt die statistische Analyse eine starke Korrelation der historischen Entwicklung mit der installierten Leistung von Windkraftanlagen. Die große Wachstumsrate in den Jahren 2014 – 2017 ist daher durch den starken Zubau von insgesamt 18,4 GW an installierter Leistung in diesen vier Jahren zu erklären [23]. Der Einbruch des Zubaus auf 3,5 GW zusätzlich installierter Leistung in den Jahren 2018 und 2019 lässt jedoch eine Stagnation des Windkraftanteils erwarten. Bis 2050 muss sich der Gesamtanteil von Windenergie an der Nettostromerzeugung gemäß dem Zielszenario verdreifachen, um den Zielwert von 48% zu erreichen.

Die Entwicklung der Solarenergie in Deutschland zeigt im Vergleich zur Windkraft einen anderen Trend (siehe Abbildung 5). Die Zunahme an Solarenergie begann Anfang der 2000er Jahre nach der Implementierung des EEG inklusive des 100.000 Dächer-Programms, welches die nötigen Investitionsanreize für eine Umsetzung der Solarenergie bot [14]. Die dargestellten Daten zeigen, dass die Stromerzeugung aus Solarenergie erst ab dem Jahr 2010, bedingt durch stark fallende Stromgestehungskosten von Photovoltaik-Anlagen, bedeutend zunimmt [24]. Die Prognosen aus dem Jahr 2009 haben diesen schnellen Anstieg des Anteils der Solarenergie an der Stromerzeugung in Deutschland allerdings nicht vorausgesehen. Entsprechend liegt der erwartete Höchstwert dieser Prognosen bei einem Anteil von nur 3%. Nach dem steilen Anstieg jedoch folgt eine Stagnation des historischen Wachstums im Jahr 2014 bei ungefähr 6%. Das Zielszenario sowie aktuelle Prognosen [16] lassen allerdings vermuten, dass ein erneuter Anstieg des Anteils der Solarenergie an der Stromerzeugung in Deutschland bevorsteht. Dies wird durch steigende Zahlen im Zubau von Photovoltaikanlagen bestätigt [25]. Mit annähernd 3 GW neu installierter Leistung im Jahr 2018 fällt der Zubau hingegen deutlich geringer aus als in den Jahren 2010 bis 2012, in denen im Durchschnitt 7,5 GW Leistung jährlich neu installiert wurden [25]. Zusätzlich führt der Rückgang der EEG-Vergütung zu einer Schwächung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen. Da auch die statistische Analyse der Prognosen für die Stromerzeugung aus Solarenergie eine starke Korrelation mit volkswirtschaftlichen Faktoren zeigt, ist zu erwarten, dass die Entwicklung hinter den Prognosen zurückbleibt.

4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich schlussfolgern, dass folgende Faktoren den größten Einfluss auf die Entwicklung der Stromversorgung in Deutschland haben:

- Politik: Die Entwicklung der Stromerzeugung aus Kernkraft und Kohle einerseits sowie die Förderung neuer Technologien aus dem Bereich erneuerbarer Energieträger andererseits zeigen den starken politischen Einfluss auf die Zusammensetzung der Strommixes in Deutschland. Durch die Regulierung von Zubaukapazitäten sowie durch die Implementierung von Einspeisevergütungen wird die Wirtschaftlichkeit einzelner Technologien maßgeblich beeinflusst.
- Soziale Akzeptanz: Die soziale Akzeptanz wirkt indirekt durch politische Maßnahmen auf das Elektrizitätsversorgungssystem. Sie hat zwar keinen stetig messbaren Einfluss, kann in Einzelfällen aber zu politischen Entscheidungen führen. Außerdem beeinflusst sie die Investitionsbereitschaft von Firmen wie auch Privatpersonen.
- Wirtschaft: Obwohl die Gesamtwirtschaftslage starke Auswirkungen auf den Nettostromverbrauch hat, ist der wirtschaftliche Einfluss auf die Verteilung der Primärenergien bei der Stromerzeugung relativ gering. Mit wachsender politischer Handelsbereitschaft im Zuge der Energiewende nimmt er weiter ab. Zurzeit ist nur noch der Gasanteil der Nettostromerzeugung vorwiegend von einer Kombination aus volkswirtschaftlichen Faktoren und dem Gaspreis bestimmt. Die Nutzung der anderen untersuchten Primärenergieträger wird dagegen hauptsächlich politisch gesteuert.

Die analysierten Prognosen zeigen teilweise große Abweichungen von der historischen Entwicklung. Im Falle der Sensitivitätsanalysen ist dies auf die beabsichtigte verstärkte Gewichtung einzelner Einflussfaktoren im Rahmen der Szenariomodellierung zurückzuführen. Dass die historische Entwicklung jedoch über das modellierte Spektrum an Entwicklungspfaden hinausgeht, wird maßgeblich durch die politische Einflussnahme bedingt. Auf Basis dieser Erkenntnis ist die Aussagekraft von Energieprognosen stets kritisch zu hinterfragen.

Im Hinblick auf weitere vorgesehene politische Maßnahmen zur Anpassung der Stromversorgungslandschaft in Deutschland, wie dem geplanten Kohleausstiegsgesetz [16], ist eine erneute Zunahme des politischen Einflusses zu erwarten. Einerseits resultiert daraus eine höhere Prognosegenauigkeit in Bezug auf Kenngrößen, die von der politischen Gesetzgebung direkt betroffen sind. Andererseits hat ein stärkerer politischer Einfluss eine Schwächung anderer Einflüsse, wie ökonomischer Faktoren, zur Folge. In Bezug auf das gesamte Stromversorgungssystem resultieren daraus eine größere Unsicherheit der Prognosen und eine damit verbundene geringere Planungssicherheit der Akteure.

5 Referenzen

- [1] H. J. Schellnhuber, S. Rahmstorf und R. Winkelmann, „Why the right climate target was agreed in Paris,“ *Nature Climate Change*, Bd. 6, Nr. 7, pp. 649 - 653, 2016.
- [2] M. Schlesinger, D. Lindenberger und C. Lutz, „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Projekt Nr. 57/12. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie,“ ewi/ gws/ prognos, Basel/ Köln/ Osnabrück, 2014.
- [3] A. Cherp, V. Vinichenko, J. Jewell, E. Brutschin und B. Sovacool, „ Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework,“ *Energy Research & Social Science*, Nr. 37, pp. 175-190, 2018.
- [4] R. B. Darlington, *Regression analysis and linear models: Concepts, applications, and implementation*, Guilford Publications, 2016.
- [5] D. V. Budescu, „Dominance analysis: a new approach to the problem of relative importance of predictors in multiple regression,“ *Psychological bulletin*, Bd. 3, Nr. 114, p. 542, 1993.
- [6] Eurostat, „Energy datasheets: EU28 countries,“ 13.03.2019. [Online]. Available: www.data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/information-on-energy-markets-in-eu-countries-with-national-energy-profiles. [Zugriff am 18.05.2019].
- [7] BP p.l.c., „BP Statistical Review of World Energy,“ BP Statistical Review, London, 2018.
- [8] AG Energiebilanzen e.V., „Energie in Zahlen: Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen,“ Prometheus, Berlin, 2012.
- [9] Statistisches Bundesamt, „Destatis - Statistisches Bundesamt,“ 2020. [Online]. Available: www.destatis.de. [Zugriff am 01.06.2019].
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Bundesbericht Energieforschung 2019: Forschungsförderung für die Energiewende,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, 2019.
- [11] U. Fahl, M. Blesl, A. Voß, P. Achten, D. Bruchof, B. Götz, M. Hundt, S. Kempe, T. Kober und R. Kuder, „Die Entwicklung der Energiemärkte bis 2030: Energieprognose 2009,“ ZEW Gutachten/ Forschungsberichte, 2010.
- [12] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), „Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung,“ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, 2010.
- [13] International Energy Agency, „WEO: World Energy Outlook 2017,“ Paris, 2017.
- [14] Deutscher Bundestag, „Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz),“ Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Berlin, 2002.
- [15] Deutscher Bundestag, „Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes,“ *Bundesgesetzblatt*, Bd. 1, Nr. 43, 2011.

- [16] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, „Regierungspressekonferenz vom 29. Januar 2020,“ 29.01.2020. [Online]. Available: www.bundesregierung.de/breg-de/suche/regierungspressekonferenz-vom-29-januar-2020-1716876. [Zugriff am 30.01.2020].
- [17] Bundesnetzagentur, „Kraftwerksstilllegungsanzeigenliste der Bundesnetzagentur,“ Bundesnetzagentur, Bonn, Stand: 17.01.2020.
- [18] Deutscher Bundestag, *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017)*, Berlin: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2017.
- [19] Statista GmbH, „Anteil Erneuerbarer Energien an der Bruttostromerzeugung in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2019,“ 20.01.2020. [Online]. Available: www.bdew.de/media/documents/20191212-BRD_Stromerzeugung1991-2019.pdf. [Zugriff am 30.01.2020].
- [20] V. Bertsch, M. Hall, C. Weinhardt und W. Fichtner, „Public acceptance and preferences related to renewable energy and grid expansion policy: Empirical insights for Germany,“ *Energy*, Nr. 114, pp. 465-477, 2016.
- [21] S. Jacobsson und V. Lauber, „The politics and policy of energy system transformation — explaining the German diffusion of renewable energy technology,“ *Energy policy*, Bd. 3, Nr. 34, pp. 256-276, 2006.
- [22] Deutscher Bundestag, „Gesetz über den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes,“ *Bundesgesetzblatt*, Bd. 1, Nr. 13, pp. 305 - 328, 2000.
- [23] Statista GmbH, „Jährliche neu installierte Leistung von Onshore-Windenergieanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2019,“ Januar 2020. [Online]. Available: www.de.statista.com/statistik/daten/studie/218904/umfrage/neu-installierte-windenergieleistung-in-deutschland. [Zugriff am 30.01.2020].
- [24] Fraunhofer ISE, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland,“ 07.01.2020. [Online]. Available: www.pv-fakten.de. [Zugriff am 30.01.2020].
- [25] Statista GmbH, „Entwicklung der jährlich installierten Leistung von Photovoltaikanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2018,“ Februar 2019. [Online]. Available: www.de.statista.com/statistik/daten/studie/29264/umfrage/neu-installierte-nennleistung-von-solarenergie-in-deutschland-seit-2004. [Zugriff am 30.01.2020].
- [26] D. A. Levinthal, „The slow pace of rapid technological change: gradualism and punctation in technological change,“ *Industrial and corporate change*, Bd. 2, Nr. 7, pp. 217-247, 1998.
- [27] Umweltbundesamt, „Datenbank "Kraftwerke in Deutschland",“ 18.10.2019. [Online]. Available: www.umweltbundesamt.de/dokument/datenbank-kraftwerke-in-deutschland. [Zugriff am 30.01.2019].
- [28] R. B. Darlington und A. F. Hayes, *Regression analysis and linear models: Concepts, applications, and implementation*, New York: Guilford Publications, 2016.