

Entwicklungspfade des regionalen Energieverbrauchs in Deutschland in den Sektoren Haushalte, Industrie, GHD und Verkehr bis 2050

Pia Manz¹

¹ Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung, Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Tel.: +49 721 6809 263; Mail: pia.manz@isi.fraunhofer.de

Abstract

Um die langfristigen klimapolitischen Ziele bis 2050 erreichen zu können, müssen politische Maßnahmen sowie technologische Veränderungen bereits kurz- bis mittelfristig umgesetzt werden. Obwohl die Stromnachfrage im letzten Jahrzehnt nahezu konstant geblieben ist, ist abzusehen, dass diese zukünftig zunehmen wird. Insbesondere strombasierte Sektorkopplungsoptionen, eine viel diskutierte Alternative zu fossilen Brennstoffen, stellen eine Option dar, mit der die klimapolitischen Vorgaben erreicht werden können. Um mögliche Implikationen unter anderem für die Netzbelastung und Flexibilisierungspotenziale der Nachfrage (sog. Demand-Side-Management) zu analysieren, werden Modelle eingesetzt, die eine Projektion der Entwicklung des Energiesystems ermöglichen. Ergebnisse zur Entwicklung der Endenergienachfrage in zwei Szenarien und die Verteilung der regionalen Stromnachfrage sowie daraus abgeleitete Herausforderungen und mögliche Politikmaßnahmen werden vorgestellt.

1. Hintergrund

Bereits im Jahr 2010 hat die Bundesregierung im Energiekonzept beschlossen, die Treibhausgasemissionen (THG) bis 2050 im Vergleich zu 1990 um 80 bis 95 % zu reduzieren, die sogenannte Dekarbonisierung des Energiesystems [1]. Vor dem Hintergrund des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 wurden dann 2016 im *Klimaschutzplan 2050* energie- und klimapolitische Maßnahmen entwickelt, um die globale Klimaerwärmung auf unter 2°C zu begrenzen [2]. Eine Übersicht der sektoralen Ziele ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Treibhausgasminderungen und sektorale Ziele in Deutschland. Quelle: BMUB und Klimaschutzplan 2050 [2]

Jahr	Senkung THG-Emissionen	Senkung Energieverbrauch				Erneuerbare Anteile	
		Primär-energie	Gebäude-wärme	Endenergie Verkehr	Brutto-strom-verbrauch	Brutto-ent-energie	Brutto-strom-verbrauch
2020	min. - 40%	- 20%	- 20% (EEV)	- 10%	- 10%	18%	35%
2030	min - 55% (Industrie: min -49% Verkehr: min - 40% Gebäude: min -66%)					30%	50%
2040	min - 70%					45%	65%
2050	80 - 95%	- 50%	- 80% (PEV, nicht erneuerbar)	- 40%	- 25%	60%	80%
Basis	1990	2008	2008	2005	2008		

Die Energierferenzprognose [3] zeigt auf, dass in einem Referenzszenario, welches eine wahrscheinliche Entwicklung abbildet, diese Ziele nicht erreicht werden. Vielmehr bedarf es einer ambitionierteren Technologieentwicklung in allen Sektoren, der Steigerung der Energieeffizienz sowie

der weiteren Integration von erneuerbaren Energien zur Reduktion des Einsatzes von fossilen Energieträgern. Insbesondere die Dekarbonisierung des Wärme- und Verkehrssektors stellt eine Herausforderung dar, da diese Sektoren im Bereich von Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), Haushalten und Verkehr mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs ausmachen und nahezu vollständig auf fossilen Energieträgern basieren (siehe Abbildung 1).

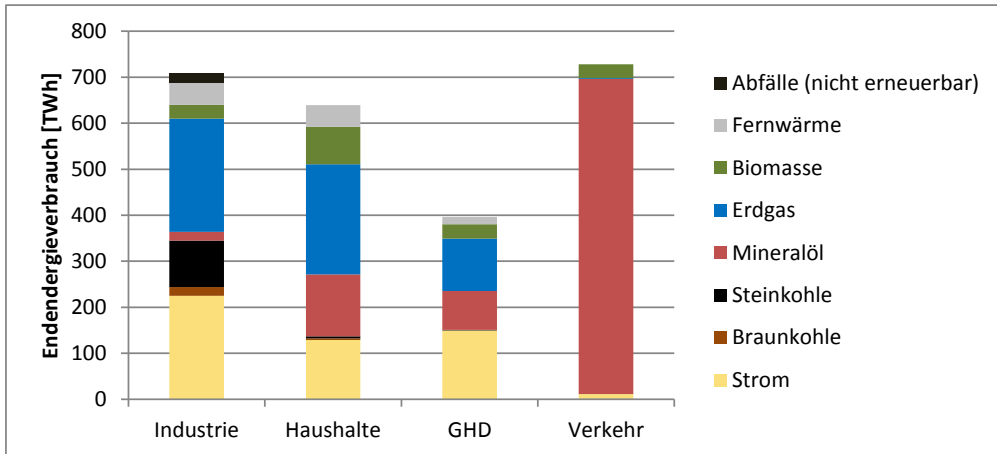


Abbildung 1: Endenergieverbrauch in Deutschland in den Sektoren Industrie, Haushalte, GHD und Verkehr im Jahr 2014. Quelle: AG Energiebilanzen [4]

Zur Beantwortung der energiewirtschaftlichen Fragestellungen und zu deren gesellschaftlichen Auswirkungen wird eine Vielzahl von Energiesystemmodellen, beispielsweise von Prognos, Consentec, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IWES, Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Öko-Institut e.V., IER oder E3M [5-9] eingesetzt. Diese unterscheiden sich sowohl in der Methodik (Simulationsmodelle, Optimierung, Agentenbasiert) sowie in ihrer Fragestellung und ihrem Detailgrad (Gesamtenergiesystemmodelle, Strommarktmodelle, Netzmodelle, Nachfragemodelle). Um langfristige Fragestellungen zu beantworten, werden Szenarien erstellt, in denen mögliche Entwicklungen von Parametern wie Energiepreise, wirtschaftliche, soziodemografische und technologische Entwicklung sowie politische Vorgaben in sich konsistent abgebildet werden.

2. Das Modell FORECAST

Das Energienachfragemodell FORECAST wurde für die Erstellung von Szenarien zur zukünftigen Entwicklung von THG-Emissionen und Energienachfrage in den Ländern der EU 28, Schweiz und Norwegen entwickelt. Es ermöglicht unterschiedliche Rahmenbedingungen zur wirtschaftlichen Entwicklung (BIP, Bevölkerung, Energiepreise) sowie techno-ökonomische Eigenschaften von Energiewandlungstechnologien auf der Energienachfrageseite zu evaluieren. Das Modell FORECAST wurde bereits zur Bearbeitung verschiedener Fragestellungen in Bezug auf die zukünftige Entwicklung der Energienachfrage, Energieeinsparpotenziale und die Wirkung von Politikinstrumenten eingesetzt. Das Ergebnis ist die jährliche Endenergienachfrage, die in einem hohen Detailgrad die Analyse von sektorspezifischen sowie technologiespezifischen Potentialen und Indikatoren ermöglicht. Eine Gesamtsystemanalyse sowie die Erreichung der THG-Minderungsziele wird mithilfe von Modellkopplungen, beispielsweise mit Lastprofil-, Angebots- und Netzmodellen, erreicht, wobei iterativ Vorgaben evaluiert werden sowie u.a. Energiepreise als Ergebnis anderer Modelle zur Rückkopplung dienen.

2.1 Methodik

Methodisch basiert das Simulationsmodell FORECAST auf einem technologiespezifischen Bottom-up-Ansatz, der die zukünftige Entwicklung von Energieverbrauch und THG-Emissionen mit der

technologischen Entwicklung in allen Nachfragesektoren verknüpft. Dieser Ansatz ermöglicht zum einen technologische Trends und ihre Auswirkungen auf die Dynamik des Energieverbrauchs zu berücksichtigen. Zum anderen erlaubt er Rückschlüsse auf die Realitätsnähe der Energieszenarien, indem jedem Szenario eine spezifische technologische Entwicklung zugrunde liegt.

Das Modell FORECAST ist entsprechend der nationalen Energiebilanzen [4] auf der Ebene der Endenergie in die Sektoren Industrie, Haushalte, GHD und Übrige (Primärsektor, Transport und Rest) aufgeteilt, siehe Abbildung 2. Wenngleich die generelle Methodik der Modellierung in den jeweiligen Sektormodulen vergleichbar ist (bottom-up, Simulation, keine übergeordnete Optimierung), unterscheidet sich der Aufbau der Sektormodule teils deutlich, abhängig von Datenverfügbarkeit und technologischer Struktur. Die einzelnen Module berücksichtigen somit die strukturellen Charakteristika der Sektoren. [10-12]

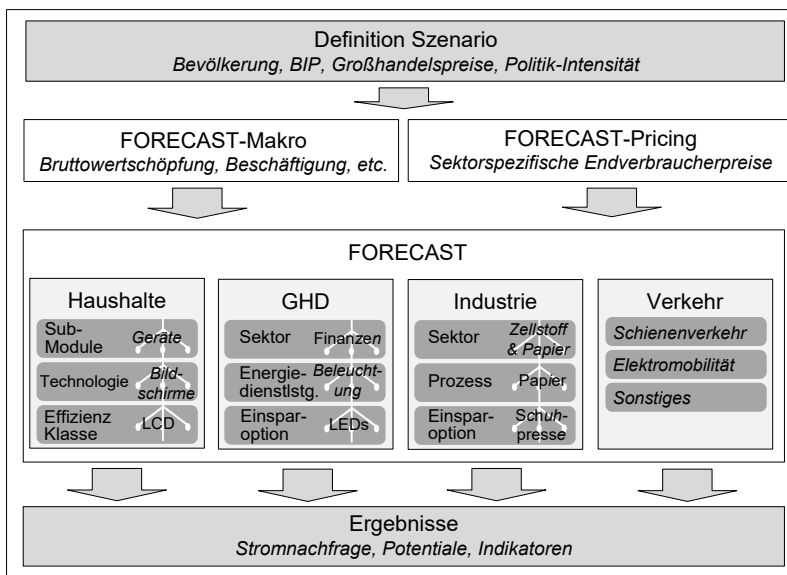


Abbildung 2: Das Modell FORECAST. Eigene Abbildung

Gemeinsame Eingangsgrößen des Modells sind sektorübergreifende und zum Teil szenariospezifische Rahmenparameter wie Anzahl der Bevölkerung, Wirtschaftsentwicklung (BIP), Großhandelspreise für Energieträger, Klimadaten und Ausgestaltung der Politikmaßnahmen. Darüber hinaus werden in den Sektormodulen wesentliche sektorspezifische Bestimmungsfaktoren (Aktivitätsgrößen bzw. Treiber) bestimmt, deren Entwicklung eine möglichst direkte Korrelation mit dem Energieverbrauch aufweist. Prognosen dieser Treiber ermöglichen eine Projektion des Energieverbrauchs. In einem weiteren Schritt wird die Entwicklung der Technologiestruktur und Diffusion von Technologieoptionen durch Investitionsentscheidungen modelliert, welche sich auf die Energieintensität auswirkt und damit den Wandel zu gesteigerter Energieeffizienz berücksichtigt. Die wichtigsten Eingangsdaten je Modul sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Sektorspezifische Eingangsgrößen der Sektormodule in FORECAST

	FORECAST-Industry <i>(Industrie)</i>	FORECAST-Tertiary <i>(Dienstleistungssektor)</i>	FORECAST-Residential <i>(Haushalte)</i>
Aktivitätsgrößen	- Tonnenproduktion - Wertschöpfung	- Fläche je Beschäftigtem - Anzahl Beschäftigte	- Anzahl der Haushalte - Gebäudefläche
Preise	- Energieträgerpreise (Industrie) - EUA Preise	- Energieträgerpreise (Gewerbe)	- Energieträgerpreise (Haushaltskunden)
Energiebilanzen und Emissionsfaktoren	- AG Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger	- AG Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger	- AG Energiebilanzen - Emissionsfaktoren je Energieträger
Technologiedaten	<p>Prozesse:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Spez. Energieverbrauch <p>Einsparoptionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion 	<p>Energiedienstleistungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Technologietreiber - Installierte Leistung - Jährliche Volllaststunden <p>Einsparoptionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Einsparpotenzial - Kosten - Lebensdauer - Diffusion 	<p>Geräte (je Effizienzklasse)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marktanteil - Spez. Energieverbrauch - Lebensdauer - Standby Leistung - Standby Dauer <p>Gebäude</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dämmniveau - Nutzungsgrad Heizsystem - Marktanteile Wärme- und Beleuchtungstechn.

2.2 FORECAST-Regional

Mögliche Entwicklungspfade des Endenergieverbrauchs können sich insbesondere regional im Zeithorizont bis 2050 unterscheiden, beispielsweise durch unterschiedliche technologische und sektorale Strukturen in städtisch oder ländlich geprägten Regionen. Diese Unterschiede sind u.a. wesentlich bedingt durch zukünftige Bevölkerungsentwicklungen und sektorale Zusammensetzung. Dies führt zu einer strukturell verschiedenen Stromnachfrage in den Landkreisen, die insbesondere für Netzbetreiber und die Modellierung der lokalen Stromerzeugung essentiell ist. [13,14]

Die nationale Stromnachfrage wird daher in einem nachfolgenden Schritt regional auf Landkreisebene aufgeteilt. Neben den Modellergebnissen basieren die Eingangsdaten von FORECAST-Regional auf einer Regionaldatenbank, die mithilfe von regionalen Strukturparametern¹ die räumliche Auflösung ermöglicht. Sektorale Verteilungsschlüssel, wie beispielsweise die Bruttowertschöpfung in jedem Subsektor, verfügbares Einkommen und die Bevölkerungsdichte, werden auf den nationalen Stromverbrauch angewandt. Zusätzlich wird auf mehreren Ebenen die Stromnachfrage mit Regionalstatistiken und Daten von Netzbetreibern validiert.

Zur Veranschaulichung der Struktur einiger Verteilungsschlüssel des Regionalmodells sind in Abbildung 3 eine verwendete Industriedatenbank und eine Bevölkerungsprognose dargestellt. Grundlage der georeferenzierten Industriestandorte sind die Datenbanken des europäischen Emissionshandels (ETS) und des Schadstoffregisters (E-PRTR), womit die nationale industrielle Stromnachfrage den Kreisebenen sektorspezifisch zugeordnet werden kann. Die Bevölkerungsprognose des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung zeigt die Bevölkerungsentwicklung bis 2035. Für die Projektionen bis 2050 wurde im Modell diese Entwicklung fortgeschrieben. Die Entwicklung der Bevölkerung hat direkt und indirekt (Anzahl der Haushalte, Beschäftigte, Bruttowertschöpfung) Einfluss auf die regionale Verteilung der Stromnachfrage.

¹ Quellen der Strukturparameter sind frei verfügbare Daten wie DESTATIS, Landesstatistikämter, DWD, Kraftfahrtbundesamt (KBA), BAFA, BBSR, EU-ETS, E-PRTR und kommerzielle Datenbanken wie die ene-t-Datenbank (Bertelsmann, 2015)

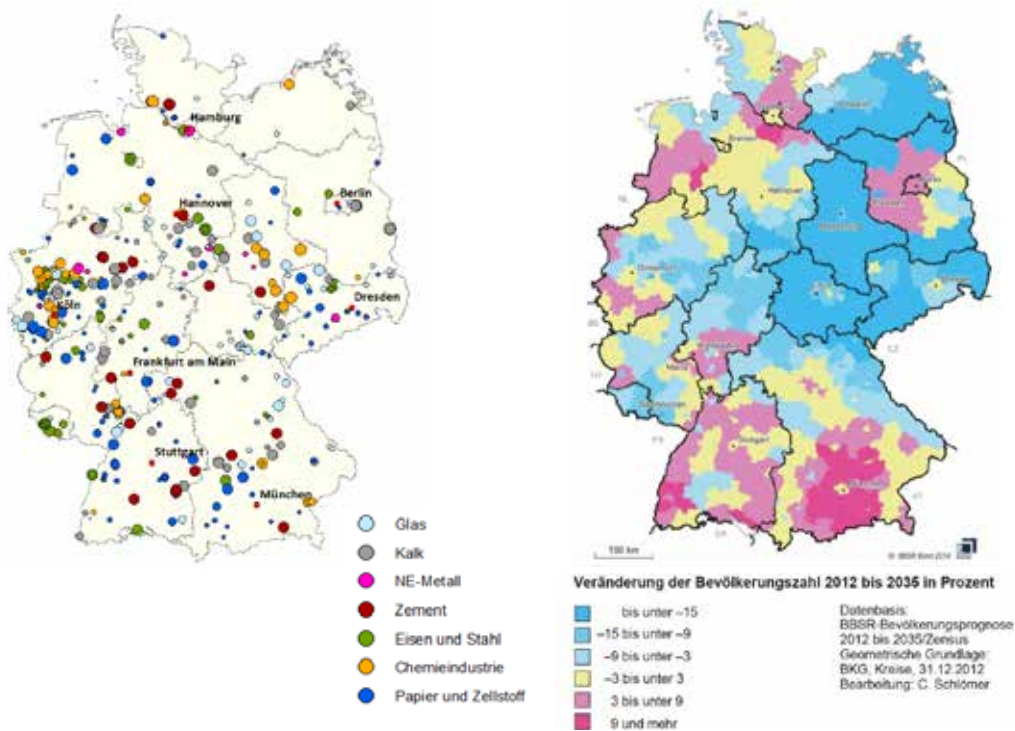


Abbildung 3: Regionale Strukturdaten zur Regionalisierung. Quelle: ETS, E-PRTR und BBSR

3. Ergebnisse der Szenarien

Mithilfe des Modells FORECAST wurden verschiedene Szenarien ausgestaltet, um Aussagen über die Wirkungen von Politikmaßnahmen und technologischen Entwicklungen treffen zu können. Es wurde ein "Business-as-usual"-Szenario als Referenzszenario sowie ein Zielerreichungsszenario modelliert, welches das Ziel von 80% Treibhausgasminderung erreichen kann. Um eine finale Aussage über die Emissionen treffen zu können, ist der Angebotssektor entscheidend und damit die Kopplung mit anderen Modellen erforderlich [15]. Insbesondere der Zubau der erneuerbaren Energien und damit die Emissionsfaktoren der Stromerzeugung, sowie die Entscheidung über die Erzeugung von strombasierter Prozesswärme im Industriesektor und über den Einsatz von Methan oder Wasserstoff, erzeugt aus erneuerbarem Strom ("Power to Gas" kurz: PtG), sollte in einer Gesamtbetrachtung des Energiesystems und des Kraftwerksparks getroffen und optimiert werden [16]. Entscheidend ist hierbei die Kopplung der Energiepreise innerhalb der Modelle und eine iterative und konsistente Modellierung der Szenarien.

3.1 zentrale Annahmen

Die hier gezeigten Ergebnisse basieren auf zentralen sozio-ökonomischen Annahmen des *EU Reference Scenario 2016* [9] und den Energiepreisen sowie dem CO₂-Zertifikatspreis des Dekarbonisierungsszenarios des *World Energy Outlook* der IEA [17]. Die Bevölkerungs- und Wirtschaftsentwicklung, die sektorale Bruttowertschöpfung und die Anzahl der Haushalte sind in den modellierten Szenarien gleich, um die Ergebnisse vergleichbar zu machen. Für die Energiepreise und CO₂-Zertifikatspreise des Referenzszenarios wurden ebenfalls Projektionen aus dem *Reference Scenario 2016* entnommen, für das Zielszenario Projektionen der IEA.

Weitere sektorspezifische exogene Annahmen wie Annahmen zu Sanierungsrate und -tiefe im Gebäudebereich, Technologiewechsel in der Industrie sowie zur Entwicklung der Elektromobilität sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Überblick über die sektorspezifischen Rahmenparameter der berechneten Szenarien

Sektorale Annahmen	Referenzszenario	Zielszenario
Haushalte		
Sanierungsrate	konstant (1%)	Steigerung auf 1,8 %
Heiztechnologie	kein Verbot von Öl- und Gaskesseln	schnellerer Austausch von alten Heizsystemen, Förderung von Wärmepumpen
Dämmstandards	keine Verschärfung der EnEV	ambitionierte Sanierungstiefe (Passivhausstandard)
Geräte	einfache Fortschreibung der Ökodesignrichtlinie	Verschärfung der Ökodesignrichtlinie
Industrie		
Ausschöpfung von Effizienzpotentialen	Aktuelle Effizienzförderung	Vollständige Ausschöpfung von Effizienzpotentialen und Materialeffizienz
neue Technologien	Kein Technologiewechsel	Strukturwandel in der Industrie
Industrie-CCS?	kein CCS	Kein CCS
GHD		
Gebäudestandards	Keine Verschärfung der Richtlinien	Analog zu Haushalten: Passivhausstandard
Klimatisierung	Anstieg des Klimatisierungsbedarfs	Einsatz von effizienten Klimatisierungstechnologien und Gebäudetechnik
Verkehr		
Personenverkehr	keine klare Entscheidung für eine Technologie	2050 nahezu vollständige Durchdringung von Elektromobilität (BEV und PHEV)
Güterverkehr	elektrifizierte Einzelanwendungen	Güterverkehr zu 45 % basierend auf Hybrid-Oberleitungs-LKWs

3.2 Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Referenz- und Zielszenarios sind für den Industriesektor in Abbildung 4 veranschaulicht. Die Endenergienachfrage ist, nach Energieträgern aufgeschlüsselt, bis zum Jahr 2050 dargestellt. In beiden Szenarien ist der Endenergiebedarf rückläufig, wobei dieser im Referenzszenario auf ca. 40% fossilen Energieträgern basiert. Der Rückgang ist durch die Ausschöpfung von Effizienzpotentialen und einem teilweisen Ersatz von Kohle und Gas durch Biomasse zurückzuführen. Ein wesentlicher Treiber dafür ist der Preisanstieg der Zertifikate des CO₂-Emissionshandels auch im Referenzszenario. Die in der Industrie geforderten kurzen Amortisationszeiten von Investitionen sowie die langen Investitionszyklen von kapitalintensiven Prozesstechnologien wie beispielsweise Hochöfen, Dampferzeuger und Mühlen führen zu einer langsamen Transformation des Sektors. Im Zielszenario beträgt der Zertifikatspreis 100€/t CO₂ und ermöglicht, zusammen mit politischen Maßnahmen und Förderungen für Energie- und Materialeffizienz, eine Dekarbonisierung des Industriesektors. Für dieses Szenario wird kein Industrie-CCS, also keine Abscheidung und Speicherung von CO₂ nach der Verbrennung von fossilen Brennstoffen, als Dekarbonisierungsoption zugelassen. Daher werden verstärkt strombasierte Öfen, Dampferzeuger und Prozesstechnologien wie Elektrolyse und EE-Methanherzeugung in den energieintensiven Sektoren Stahlerzeugung, Zement, Papier und Chemie eingesetzt. Dies hat einen Anstieg des Stromverbrauchs ("Power to Heat") zur Folge. Allerdings ist zu erwähnen, dass der hier gezeigte Strukturwandel in der Industrie auf äußerst ambitionierten Annahmen beruht und insbesondere durch internationalen Wettbewerb und die Abhängigkeit von Energiepreisen in Frage gestellt werden kann.

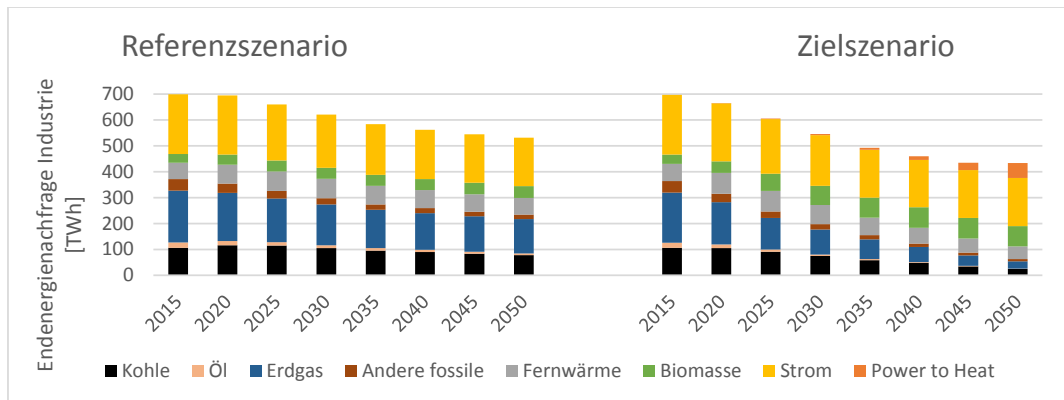


Abbildung 4: Endenergienachfrage im Industriesektor in Deutschland bis 2050 im Referenz- und Zielszenario

Im Gebäudebereich (Wohn- und Nichtwohngebäude) ergibt sich in Abbildung 5 für beide Szenarien eine vergleichbare Entwicklung zum Industriesektor. Die bereits implementierten Standards (Energieeinsparverordnung, kurz: EnEV) und KfW-Förderungen führen auch im Referenzszenario zu einem Rückgang des Endenergiebedarfs zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser. Eine Herausforderung ist jedoch die geringe Sanierungsrate von ca. 1% in Deutschland, die trotz politischer Maßnahmen kaum ansteigt. Insbesondere für Bestandsgebäude ist jedoch eine ambitioniertere Sanierungstiefe und -rate nötig, damit Technologien wie Wärmepumpe und Solarthermie wirtschaftlich eingesetzt werden können. Darüber hinaus sind die langen Nutzungsdauern von Wärmeerzeugern, insbesondere von Öl- und Gaskesselneine Herausforderung im Gebäudesektor. Im Zielszenario werden Wärmepumpen subventioniert, so dass auch Direktstromheizungen frühzeitig ausgetauscht werden und Umweltwärme genutzt werden kann. Darüber hinaus ist der Ausbau von Fernwärmenetzen eine geeignete Maßnahme, da diese sich zentral über den Einsatz von erneuerbaren Energien oder Strom dekarbonisieren lassen.

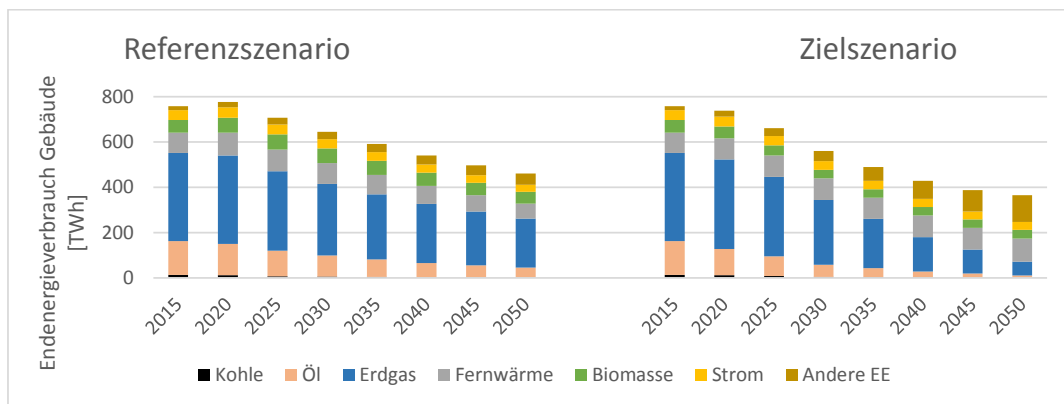


Abbildung 5: Endenergienachfrage von Wohn- und Nichtwohngebäuden in Deutschland bis 2050 im Referenz- und Zielszenario

Im Zielszenario wurde übergreifend in allen Sektoren das Potenzial von Biomasse begrenzt, da diese für Sektoren, die nur über den Einsatz von biogenen Kraftstoffen dekarbonisiert werden können, eingesetzt werden. Dies betrifft hauptsächlich den Luft-, Schiff- und Güterverkehr. Die Stromnachfrage steigt im Zeithorizont bis 2050 durch neue Technologien wie Wärmepumpe, Elektromobilität und Power-to-Heat in der Industrie im Vergleich zum derzeitigen Niveau um ca. 100TWh an. In Abbildung 6 ist links die Stromnachfrage in 5-Jahresschritten bis 2050 nach Sektoren gezeigt, und rechts die Entwicklung der wichtigsten neuen Stromverbraucher im Zielszenario. Im Zeitraum bis 2030 ist die Stromnachfrage

gekennzeichnet durch Effizienzgewinne in allen Sektoren, danach ist der Anstieg durch die neuen Verbraucher begründet, die einen substantziellen Anteil (ca. 200TWh in 2050) am Stromverbrauch ausmachen. Diese Entwicklung ist großen Unsicherheiten sowie politischen Rahmenbedingungen unterworfen, so dass in der Literatur einer große Bandbreite der Ergebnisse existiert: von 462 TWh bis 788 TWh in 2050 [18].

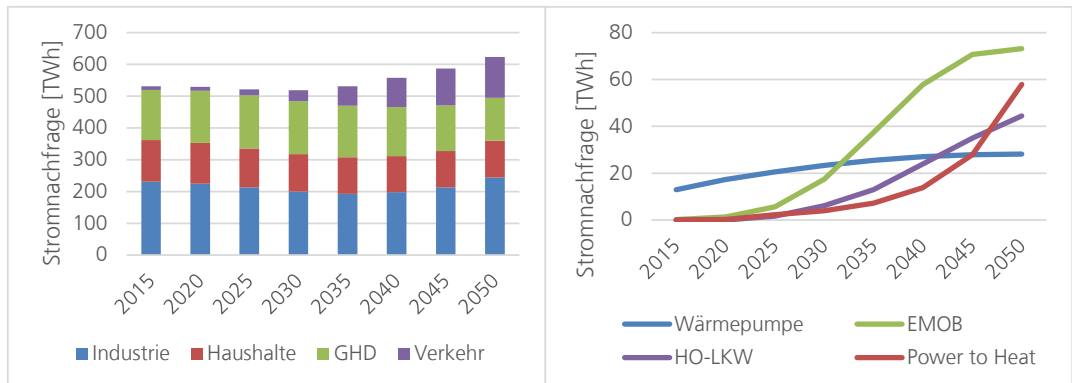


Abbildung 6: Entwicklung der Stromnachfrage aller Sektoren (links) und Entwicklung von neuen Verbrauchern (rechts) in Deutschland bis 2050 im Zielszenario

3.3 Regionaler Stromverbrauch der Landkreise in Deutschland im Zielszenario

Insbesondere neue Anwendungen wie Wärmepumpe, Elektromobilität und die industrielle Stromnachfrage können zu einer strukturellen Veränderung der Nachfrage sowie der Laststruktur führen. Die Haupteinflussfaktoren sind die Bevölkerungsentwicklung sowie die Standorte der energieintensiven Industrien, die sich regional unterscheiden, wie im Abschnitt 2.2 erläutert. Daher wird in einem nachgelagerten Schritt die Stromnachfrage regionalisiert, um Herausforderungen für lokale Akteure wie Kommunen und Energieversorger, aber auch für Verteil- und Übertragungsnetzbetreiber und für die Kopplung mit Angebotsmodellen, die auf eine regional hoch aufgelöste Nachfrage angewiesen sind, zu identifizieren.

Es kann gezeigt werden, dass die Bevölkerungsentwicklung einen hohen Einfluss auf Regionen mit

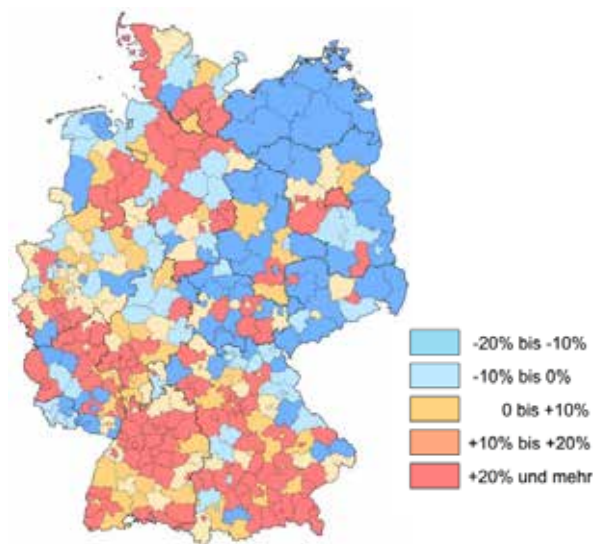


Abbildung 7: Prozentuale Veränderung der Stromnachfrage in den Landkreisen und kreisfreien Städten in Deutschland 2050 vs. 2015

einem großen Anteil von Haushalten und GHD hat. In Abbildung 7 ist die prozentuale Veränderung der Stromnachfrage in den Landkreisen von 2050 bezogen auf 2015 farblich dargestellt. Insbesondere in ländlichen Regionen sowie in den neuen Bundesländern führen Abwanderungen zu einer überdurchschnittlichen Verringerung des Stromverbrauchs. In städtischen Regionen kommt es zu einer weiteren Verdichtung, jedoch können die Effizienzgewinne im Haushalts- und GHD-Sektor den Einfluss auf die Stromnachfrage dämpfen. In Vorstädten, wo verstärkt Industriebetriebe angesiedelt sind, kommt es zu einem Bevölkerungswachstum, was sich im Stromverbrauch deutlich zeigt (Beispiel Berlin, Stuttgart, München). Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor sind Hybrid-Oberleitungs-LKWs, die im Zielszenario als Alternative zu Diesel-LKWs modelliert wurden. Der Einsatz auf 400km der wichtigsten Autobahnstrecken führt insbesondere in ländlichen Regionen, durch die diese verlaufen, zu einer substantziellen Steigerung der Stromnachfrage, in Einzelfällen um den Faktor 10. Das verdeutlicht die Notwendigkeit der Modellierung der regionalen Stromnachfrage, da je nach Typ der Region diese sich deutlich verändern kann und neue Stromverbraucher berücksichtigt werden müssen.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Durch die Modellierung der Endenergienachfrage für Deutschland wird deutlich, dass mögliche Pfade der Entwicklung von neuen Anwendungen sowie der Einfluss von Energieeffizienz Implikationen zur Erreichung der klimapolitischen Vorgaben beinhalten. Insbesondere die Wirkung von politischen Maßnahmen, sozio-ökonomischen Einflussfaktoren sowie spezifische sektorale Herausforderungen können in dem hier vorgestellten bottom-up-Ansatz abgebildet werden. In Zielerreichungsszenarien können zentrale Punkte, die zur Dekarbonisierung des Gesamtenergiesystems nötig sind, herausgearbeitet werden. Im Nachfragesektor ist dies im Verkehrsbereich (PKW und Güterverkehr) die Entscheidung über batterie- und direktstrombasierte Technologien oder synthetische Kraftstoffe. Im Gebäudebereich ist die Sanierung von Bestandsgebäuden in Verbindung mit dem Ausbau von Wärmepumpen und Fernwärmeanschlüssen entscheidend. Energieintensive Industriesektoren benötigen für Prozesswärme insbesondere im Hochtemperaturbereich derzeit fossile Brennstoffe. In manchen dieser Anwendungen müssen neue Prozesse und Produkte noch entwickelt werden oder zur Marktreife gebracht werden, wenn kein Industrie-CCS eingesetzt werden soll.

Noch nicht ausreichend im Regionalisierungsmodell berücksichtigt sind bestehende oder mögliche Fernwärmeinfrastrukturen, der Einfluss auf die Stromnachfrage von Eigenversorgung in Haushalten sowie mögliche Auswirkungen von zukünftig regional unterschiedlichen Strompreisen auf DSM-fähige Technologien in der Industrie und Wärmepumpen.

Zusammengefasst ist die Modellierung der regional hoch aufgelösten sowie technologiespezifischen Energienachfrage essentiell für die Modellierung der Energieerzeugung, des Netzausbaubedarfs sowie für die kommunale Planung. Des Weiteren können mögliche und untereinander konkurrierende Pfade zur Zielerreichung in Kopplung mit Angebots- und Netzmodellen untersucht und miteinander verglichen werden.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Bundesregierung: Das Energiekonzept der Bundesregierung 2010 und die Energiewende 2011. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2011.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Klimaschutzplan 2050. Klimapolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. 2016.
- [3] Prognos AG, Energiewirtschaftliches Institut EWI, Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS): Entwicklung der Energiemärkte - Energiereferenzprognose. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2014.
- [4] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die

- Bundesrepublik Deutschland 1990-2015. Stand 2017. online: www.ag-energiebilanzen.de
- [5] Öko-Institut e.V. und Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung: Klimaschutzszenario 2050. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015.
 - [6] R. Corradini; C. Konetschny; T. Schmid: FREM - Ein regionalisiertes Energiemodell. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 67. jg. Heft 1/2, S. 69 - 71. 2017.
 - [7] F. Hinz, D. Iglhaut, T. Frevel, D. Möst: Abschätzung der Entwicklung der Netznutzungsentgelte in Deutschland, in: *Series of the chair of energy economics, TU Dresden (Band 3)*, 2014.
 - [8] R. Elsland, A.-L. Klingler, P. Degner, Y. Oswald, M. Wietschel: Are current regionalisation approaches sufficient to decompose electricity demand? - A German case study. *Conference on Energy Economics and Technology (ENERDAY)*, 2015.
 - [9] Europäische Kommission: EU Reference Scenario 2016. Energy, transport and GHG emissions. Trends to 2050. 2016
 - [10] T. Fleiter, S. Hirzel, M. Jakob, J. Barth, L. Quandt, F. Reitze, F. Toro (Hrsg): Electricity demand in the European service sector: a detailed bottom-up estimate by sector and by end-use. *Konferenzband der IEECB 13-14.04.2010*.
 - [11] J. Santos, A. Rajkiewicz, I. Graaf de, R. Bointner: The impact of energy performance certificates on property values and nearly zero-energy buildings. An analysis for market professionals, owners and tenants. 2016
 - [12] J. Steinbach: Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich. *Dissertation*, 2016.
 - [13] R. Elsland, T. Boßmann, A.-L. Klingler, A. Herbst, M. Klobasa, M. Wietschel: *Netzentwicklungsplan Strom – Entwicklung der regionalen Stromnachfrage und Lastprofile. Begleitgutachten. Studie für die deutschen Verteilnetzbetreiber*, 2016.
 - [14] Deutsche Energieagentur: *Ausbau- und Innovationsbedarf in den Stromverteilnetzen in Deutschland bis 2030*. 2012
 - [15] B. Pfluger, B. Tersteegen, B. Franke et al.: *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*, 2017.
 - [16] M. Wietschel, M. Haendel, T. Boßmann, G. Schubert, J. Michaelis, C. Doll, B. Schломann, W. Köppel, C. Degünther: *Integration erneuerbarer Energien durch Sektorkopplung, Teilvorhaben 2: Analyse zu technischen Sektorkopplungsoptionen*. Fraunhofer ISI; KIT, 2015.
 - [17] International Energy Agency: *World Energy Outlook 2016*. 2016
 - [18] Fraunhofer IWES: *Wie hoch ist der Stromverbrauch in der Energiewende? Energiepolitische Zielszenarien 2050 - Rückwirkungen auf den Ausbaubedarf von Windenergie und Photovoltaik. Studie im Auftrag von Agora Energiewende*, 2015.