



Projekte „Langfrist- und Klimaszenarien“: Übergreifende Einordnung

Untersuchungsgegenstand, Szenarioarchitektur und Aussagekraft der Szenarien

Projekte:

„Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland“
und

„Auswirkungen der Klimaschutzziele und diesbezüglicher Maßnahmen auf den Energiesektor und den Ausbau der erneuerbaren Energien“

Auftragnehmer:

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), Consentec GmbH und Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (ifeu) unter Beteiligung der Unterauftragnehmer M-Five, Technische Universität Wien, TEP Energy GmbH und GEF Ingenieur AG

Projekte im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Inhaltsverzeichnis

1	Untersuchungsgegenstand und Vorgehen	2
2	Szenarioarchitektur	3
3	Aussagekraft der Szenarien – Potenziale und Grenzen	5
4	Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen	8

Berlin, 30. August 2017

1 Untersuchungsgegenstand und Vorgehen

In den Projekten „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau Erneuerbarer Energien in Deutschland“ sowie „Auswirkungen der Klimaschutzziele und diesbezüglicher Maßnahmen auf den Energiesektor und den Ausbau der erneuerbaren Energien“ (im Folgenden: „Langfrist- und Klimaszenarien“) werden Szenarien für ein kostenoptimiertes und sicheres Energiesystem modelliert. Mit Ausnahme des sogenannten Referenzszenarios werden in den (Ziel-)Szenarien die energie- und klimapolitischen Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung exogen vorgegeben. Dem Energiekonzept entsprechend, reicht der Zeithorizont der Modellierung bis 2050 einschließlich der Zwischenschritte für 2020, 2030 und 2040. Der zeitliche Fokus der Projekte liegt auf der langfristigen Perspektive. Die mittelfristigen sektorspezifischen Emissionsminderungsziele für 2030, die im Jahr 2017 im Klimaschutzplan 2050 verankert und damit erst nach Durchführung der Modellierungsarbeiten festgelegt worden sind, wurden bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

Betrachtete Sektoren und Modellverbund

In den Projekten „Langfrist- und Klimaszenarien“ wird das gesamte Energiesystem (Strom, Wärme/Kälte, Verkehr, Industrie) modelliert. Um die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen den Sektoren adäquat zu erfassen, ist der Einsatz eines komplexen Modellverbunds nötig. Der Modellverbund wird ausführlich in *Modul 2* erläutert.

Es ist nicht möglich, sämtliche Bereiche der Energieversorgung in einem einzigen Modell in sehr hoher Auflösung abzubilden und zu optimieren. In den Langfristszenarien liegt der Fokus der Arbeiten auf der Kostenoptimierung des Stromversorgungssystems einschließlich der Übertragungs- und Verteilnetze. Für die Sektoren Wärme, Industrie und Verkehr (einschließlich der dortigen Infrastruktur, wie z. B. Gasnetze und -speicher, Wärmenetze) werden angesichts der sehr komplexen Modellarchitektur weniger Szenarien betrachtet und die Ergebnisse in einer im Vergleich zum Stromsektor geringeren Detailtiefe diskutiert. Um wichtige Aussagen zu diesen Bereichen erhalten zu können, sind künftig weitere systemübergreifende und spezifische Studien notwendig. Diese sollten beispielsweise Fragen der Infrastruktur im Wärme-, Verkehrs- und Gasbereich adressieren oder politische Instrumente und Maßnahmen, z. B. im Bereich der Energieeffizienz, bewerten.

Zielfunktion: Systemkostenoptimierung unter Nebenbedingungen

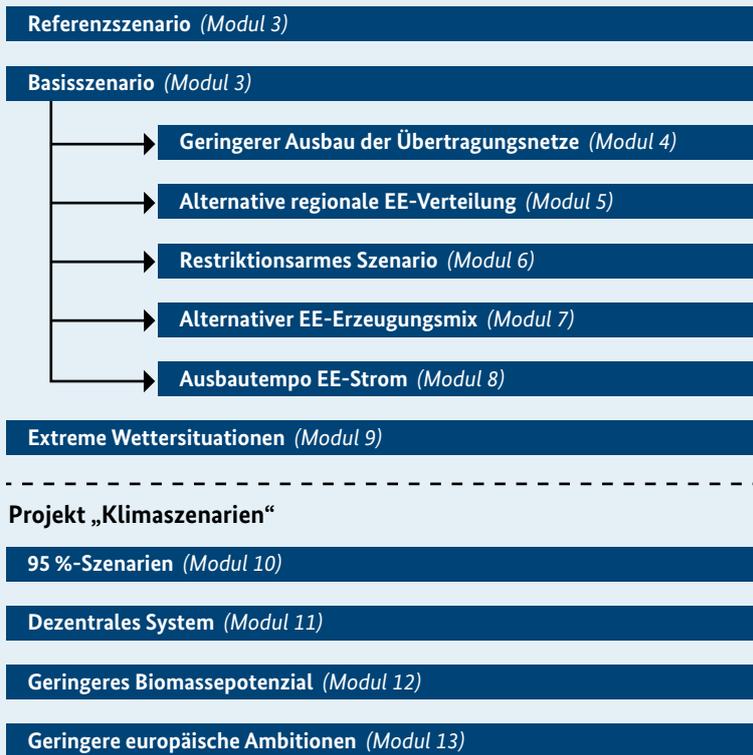
Die Modellierung der einzelnen Szenarien zielt grundsätzlich auf eine Minimierung der Kosten des Energiesystems ab. Als Nebenbedingung ist die Versorgungssicherheit des Systems stets zu gewährleisten. Dies wird durch die hohe zeitliche und räumliche Auflösung der Modellierung sichergestellt. Des Weiteren sind in den Zielszenarien die energie- und klimapolitischen Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung in den Bereichen Treibhausgasemissionen, erneuerbare Energien und Energieeffizienz zu erreichen. Darüber hinaus werden in einzelnen Szenarien spezifische weitere Nebenbedingungen vorgegeben, die in den jeweiligen Szenarien erläutert werden.

2 Szenarioarchitektur

Generell ist die zukünftige Entwicklung mit Unsicherheiten behaftet. Dies gilt umso mehr, je weiter man in die Zukunft schaut. In besonderem Maße gilt dies für das Energiesystem, wo im Kontext der Energiewende dynamische technologische Entwicklungen und Innovationen stattfinden.

Vor diesem Hintergrund und angesichts des Modellierungszeitraums bis zum Jahr 2050 wäre die Entwicklung eines einzelnen zentralen „Leitszenarios“, an dem sich die Politik orientieren sollte, wenig sinnvoll. Aus diesem Grund werden in den Projekten „Langfrist- und Klimaszenarien“ diverse Szenarien modelliert, um auf der Basis des derzeit verfügbaren Wissenstands das Spektrum möglicher Entwicklungspfade möglichst gut abzubilden. Die Schlussfolgerungen ergeben sich dabei in besonderem Maße durch den Vergleich der Ergebnisse. Einen Überblick über die derzeit in den Projekten vorgesehene Szenarioarchitektur vermittelt die folgende Abbildung:

Projekt „Langfristszenarien“



Im Folgenden soll die Grundidee der Szenarioarchitektur erläutert werden. Eine genauere Darstellung der Szenarioarchitektur einschließlich einer Beschreibung der einzelnen Szenarien erfolgt in *Modul 1*.

Referenzszenario

Grundsätzlich handelt es sich bei allen Szenarien um sogenannte Zielszenarien, in denen die energie- und klimapolitischen Ziele der Bundesregierung exogen vorgegeben und somit erreicht werden. Eine Ausnahme hiervon bildet lediglich das sogenannte Referenzszenario (*Modul 3*), in dem die energie- und klimapolitischen Ziele nicht exogen vorgegeben und letztlich verfehlt werden. Das Referenzszenario stellt den fiktiven Fall dar, dass Deutschland aus der Energiewende aussteigt. Damit soll keine realistische Handlungsoption durchgespielt werden. Es dient vielmehr dem Erkenntnisgewinn im Vergleich zu den Zielszenarien. Das Referenzszenario dient zum einen dazu aufzuzeigen, welche Entwicklungen auch ohne weitere zukünftige energie- und klimapolitische Eingriffe ablaufen können; zum anderen ist es ein Bezugspunkt für die Beantwortung der Frage „Was kostet die Energiewende?“. Denn auch ein alternatives Energiesystem, in dem die energie- und klimapolitischen Ziele verfehlt werden, ist mit Kosten für Kraftwerke, Netze, fossile Brennstoffe usw. verbunden.

Zielszenarien

In den Zielszenarien werden die energie- und klimapolitischen Ziele hinsichtlich Reduktion der Treibhausgasemissionen sowie Steigerung der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz definitionsgemäß grundsätzlich erreicht. Das Energiekonzept der Bundesregierung sieht für das Jahr 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 80 bis 95 Prozent im Vergleich zu 1990 vor. Für die meisten Szenarien wird eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 80 Prozent bis 2050 vorgegeben. So auch im Basisszenario (*Modul 3*), welches das zentrale Zielszenario des Projekts Langfristszenarien ist. Im Basisszenario werden die energie- und klimapolitischen Ziele zu unter den getroffenen Annahmen (z. B. zur Kostenentwicklung verschiedener Technologien) möglichst geringen Systemkosten erreicht.

In den weiteren Zielszenarien, die Gegenstand der Module 4 bis 13 sind, werden im Vergleich zum Basisszenario einzelne Parameter oder das für 2050 vorgegebene Emissionsreduktionsziel („95 statt 80 Prozent“) variiert. Auf dieser Grundlage werden die Auswirkungen von veränderten Entwicklungen oder Strategien im Vergleich zum kostenoptimalen Basisszenario beurteilt. In den Modulen 4 bis 8 beschränken sich die Parametervariationen, die im Vergleich zum Basisszenario vorgenommen werden, dabei ausschließlich auf den Bereich der Stromerzeugung und der Stromnetze. Beispielsweise werden im Szenario „Geringerer Ausbau der Übertragungsnetze“ (*Modul 4*) die Folgen eines geringeren Netzausbaus analysiert, während im Szenario „Alternative regionale EE-Verteilung“ (*Modul 5*) ein stärkerer Ausbau der Windenergie an Land im Süden Deutschlands vorgegeben wird. Auf eine Neumodellierung der Nachfragesektoren (Industrie, Prozesse im Bereich Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Verkehr, Gebäude sowie Haushaltsgeräte, Beleuchtung und Klimatisierung) kann daher im Vergleich zum Basisszenario verzichtet werden.

Neben den Szenariovarianten in den Modulen 4 bis 8 werden in den Projekten „Langfrist- und Klimaszenarien“ weitere Szenarien und auch qualitative Analysen durchgeführt, bei denen sich im Vergleich zum Basisszenario umfangreichere Änderungen ergeben, die auch die Nachfragesektoren betreffen. In diesen Fällen werden neben der Angebotsseite auch die Nachfrageseite oder bestimmte Sektoren neu modelliert. Beispielsweise wird in *Modul 10* analysiert, welche Änderungen sich ergeben, wenn 2050 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 95 Prozent angestrebt wird. Darüber hinaus sind weitere Module geplant, welche folgende Themen abdecken:

- Extreme Wettersituationen (*Modul 9*)
- Wasserstoffmobilität/-infrastruktur (als Teil von *Modul 10*)
- Dezentrales System (*Modul 11*)
- Geringeres Biomassepotenzial (*Modul 12*)
- Geringeres europäisches Ambitionsniveau (*Modul 13*)

3 Aussagekraft der Szenarien – Potenziale und Grenzen

Eine grundsätzliche Herausforderung von Energieprognosen und -szenarien ist der Umstand, dass die zukünftige Entwicklung mit Unsicherheiten behaftet ist und die zugrunde liegenden Modelle die Komplexität der realen Welt allenfalls begrenzt und mit Vereinfachungen abbilden können. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, was Energieszenarien im Allgemeinen und die in den Projekten „Langfrist- und Klimaszenarien“ modellierten Szenarien im Besonderen eigentlich leisten können. Um diese Frage zu beantworten, soll zunächst verdeutlicht werden, was die Szenarien nicht leisten können bzw. was die Grenzen der Szenarien sind.

Keine Prognose, sondern Systemkostenoptimierung

Keines der in den Projekten „Langfrist- und Klimaszenarien“ modellierten Szenarien stellt eine Prognose der zukünftigen Entwicklung des Energiesystems dar. Dies liegt unter anderem daran, dass die Szenarien auf eine Minimierung der Kosten des Energiesystems abzielen. Diese Systemkostenoptimierung abstrahiert in bestimmten Bereichen vom bestehenden institutionellen Rahmen, z. B. der Finanzierung des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Stromsektor über das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Dementsprechend weicht das Ergebnis einer solchen Systemkostenoptimierung auch von bestimmten realen Entwicklungen ab, wo die Akteure unter Berücksichtigung der bestehenden institutionellen Rahmenbedingungen einzelwirtschaftlich motivierte Entscheidungen treffen, die vom gesamtwirtschaftlichen Optimum abweichen. So kann z. B. für einen Einfamilienhausbesitzer eine PV-Dachanlage eine sinnvolle Investition sein, weil er für den selbst verbrauchten Strom u. a. weder EEG-Umlage noch Netzentgelte zahlen muss; aus Gesamtsystemsicht wäre es aber kostengünstiger, den gleichen Strom z. B. in einer PV-Freiflächenanlage zu erzeugen. Eine Modellierung, die sich nicht an den einzelwirtschaftlichen Entscheidungen orientiert, sondern die Gesamtsystemkosten optimiert, mag zwar auf den ersten Blick realitätsfern erscheinen, ist aber wichtig, um eine wissenschaftliche Grundlage für die Weiterentwicklung des institutionellen Rahmens zu haben und die Frage

zu beantworten: Wie müsste der institutionelle Rahmen gestaltet werden, damit die einzelwirtschaftlichen Entscheidungen zu einem kosteneffizienten Energiesystem führen?

Bedeutung der Annahmen

Ferner müssen im Rahmen der Modellierung für diverse Parameter, deren zukünftige Entwicklung – insbesondere bis 2050 – unsicher ist, Annahmen getroffen werden. Dies betrifft zum einen allgemeine wirtschaftliche Kenngrößen wie die langfristige demografische und wirtschaftliche Entwicklung, was einen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung der Endenergienachfrage hat. Zum anderen müssen für die Modellierung diverse energiewirtschaftliche Eingangsdaten festgelegt werden. Hierzu gehört beispielsweise die Entwicklung der fossilen Brennstoffpreise oder das energetische Biomassepotenzial. Ferner sind für die Technologien, die den Modellen als Lösungsoptionen zur Verfügung stehen, Kostenannahmen zu treffen. Bei anderen Annahmen können sich andere Ergebnisse ergeben, zum Beispiel bezüglich der genutzten Technologien und dem Einsatz von verschiedenen Dekarbonisierungsoptionen.

Den Modellen steht grundsätzlich ein sehr breites Technologieportfolio zur Verfügung. Dabei handelt es sich grundsätzlich nur um Technologien, die aus heutiger Sicht bereits verfügbar sind oder zumindest absehbar verfügbar sein werden. Dies bedeutet, dass mögliche disruptive Entwicklungen oder Technologien in den Szenarien nicht abgebildet werden. In gewissem Sinne eine Ausnahme bilden die CCS-Technologien (Carbon Capture and Storage), deren großtechnischer Einsatz – zumindest onshore – aus heutiger Sicht mit erheblichen Akzeptanzfragen verbunden ist. In den Langfristszenarien wird CCS daher grundsätzlich nur für schwer vermeidbare Prozessemissionen im Industriesektor eingesetzt. Lediglich im restriktionsarmen Szenario (*Modul 6*) ist CCS darüber hinaus auch im Kraftwerkssektor zugelassen.

Es sind für alle in den Modellen hinterlegten Technologien Annahmen über die Kostenentwicklungen bis zum Jahr 2050 zu treffen. Dabei werden auf Basis des heute verfügbaren Wissens technologiespezifisch die Potenziale für technologisches Lernen berücksichtigt. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollte jedoch beachtet werden, dass Technologiesprünge, neue Technologien oder disruptive Entwicklungen über einen Zeitraum von mehr als drei Jahrzehnten nicht vorhersehbar sind und dementsprechend nicht in den Modellen abgebildet werden können. Niemand hätte z. B. vor 20 Jahren ahnen können, welche Möglichkeiten Smartphones eröffnen und wie sie die Welt verändern. In diesem Sinne sind auch in der Energieversorgung z. B. bei dynamischen technologischen Fortschritten – wie es in der Vergangenheit beispielsweise bei der Photovoltaik der Fall gewesen ist – auch andere Entwicklungen, als in den Szenarien dargestellt, möglich. Dementsprechend ist es für eine erfolgreiche Energiepolitik wesentlich, solche Entwicklungspfade bzw. Optionen offen zu lassen und zum gegebenen Zeitpunkt in die weiteren Betrachtungen einzubeziehen.

Nicht nur Systemkosten relevant

Neben diesen Unsicherheiten gibt es weitere Gründe, weshalb keines der Szenarien einen unmittelbar empfehlenden Charakter hat in dem Sinne, dass die Transformation des Energiesystems genau gemäß der Entwicklung eines Szenarios vollzogen werden sollte. Eine Systemkostenoptimierung, wie sie in den Langfrist- und Klimaszenarien erfolgt, hat den Vorteil, dass es sich bei den Systemkosten um ein verhältnismäßig gut operationalisierbares und objektivierbares Kriterium handelt. Zugleich neigt eine strikte Kostenoptimierung jedoch vielfach zu extremen Ergebnissen. Die Modelle nutzen die ihnen zur Verfügung stehenden Spielräume zur Kostenminimierung rigoros aus.

In der Praxis gibt es aber neben den Kosten auch weitere Kriterien, die bei der politischen Entscheidungsfindung eine Rolle spielen. Dies betrifft beispielsweise die ökologischen Wirkungen alternativer Energiesysteme. Aus diesem Grund werden die Umweltwirkungen der verschiedenen Szenarien, deren Monetarisierung mit erheblichen Bewertungsspielräumen einherginge, in einem separaten Berichtsmodul dargestellt (*Modul U*). Dies bildet die Grundlage, um auch die ökologischen Wirkungen bei der Entscheidungsfindung adäquat zu berücksichtigen.

Ebenso können in der Realität Akzeptanzfragen, gesamtwirtschaftliche Wirkungen oder industriepolitische Effekte von großer Bedeutung sein. Beispielsweise kann die Entwicklung neuer Technologien Einfluss auf die Produktion

und Leistungsfähigkeit der deutschen Wirtschaft haben. Bei diesen Aspekten handelt es sich jedoch um teilweise nur schwer operationalisierbare Effekte, die in den Optimiermodellen nicht adäquat abgebildet werden können.

Insofern ist eine kostenoptimierte Lösung nicht automatisch die „beste“ Antwort auf die Herausforderungen der Energiewende. Die Kenntnis der kostenoptimalen Lösung bzw. der Mehrkosten alternativer Lösungen ermöglicht es aber, weitere Aspekte den damit teilweise einhergehenden Mehrkosten gegenüberzustellen und erlaubt dadurch eine fundiertere Diskussion. Die Studie schafft also eine sehr gute Orientierung, um auf Basis der Modellierungsergebnisse und der Bewertung anderer Faktoren politische Entscheidungen treffen zu können. Es bleibt jedoch Aufgabe der Politik, in der Gesamtbetrachtung sinnvolle Entscheidungen zu fällen.

Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass in den Modellen grundsätzlich weltweit ein ähnliches klimapolitisches Ambitionsniveau unterstellt wird. Dementsprechend spielt eine mögliche Verlagerung von Produktion bzw. Abwanderung von Unternehmen und der damit verbundenen Treibhausgasemissionen in das Ausland infolge unterschiedlicher energie- und klimapolitischer Anstrengungen („Carbon Leakage“) keine Rolle. In der Praxis ist dieser Aspekt jedoch speziell im Industriesektor von großer Bedeutung und muss bei der Ausgestaltung energie- und klimapolitischer Instrumente beachtet werden. Die Bedeutung eines ähnlichen klimapolitischen Ambitionsniveaus wird in dem Szenario „Geringere europäische Ambitionen“ (*Modul 13*) diskutiert. Darin wird der Einfluss einer fiktiven europäischen Energie- und Klimapolitik auf das deutsche Energiesystem untersucht, die sich nicht im Gleichschritt mit Deutschland bewegt.

Erkenntnisgewinn aus den Szenarien

Die vorstehenden Ausführungen bedeuten nicht, dass aus Energieszenarien keine wertvollen Erkenntnisse generiert werden können. Die Rahmenbedingungen sowie Potenziale und Grenzen von Energieszenarien sollten jedoch bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

Letztlich liefern die Szenarien Erkenntnisse darüber, wie aus systemischer Perspektive – basierend auf dem heutigen Wissensstand über grundsätzlich verfügbare Technologien und deren Kosten – die Entwicklung eines kosteneffizienten Energiesystems, das die anvisierten energie- und klimapolitischen Ziele erreicht, aussehen könnte. Aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten wird dabei jedoch davon abgesehen, ein einzelnes normatives „Leitszenario“ zu entwickeln. Ebenso sollte bei der Interpretation der Ergebnisse nicht die „einzelne Zahl“ (z. B. installierte Photovoltaikkapazität in 2050) in einem bestimmten Szenario im Vordergrund stehen. Es geht vielmehr darum, ein besseres Verständnis für *Wirkungszusammenhänge* im Energiesystem zu gewinnen. Dieses Verständnis und damit der wesentliche Erkenntnisgewinn werden insbesondere aus dem *Vergleich* der verschiedenen Szenarien generiert. Auf diese Weise sollen schließlich möglichst robuste Handlungsempfehlungen für den weiteren Transformationsprozess des Energiesystems abgeleitet werden.

4 Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Studie stellen dar, wie sich der Technologiemarkt auf der Angebots- und Nachfrageseite des Energiesystems bei einer kostenminimalen Zielerreichung bzw. bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen zusammensetzt. Die Studie trifft jedoch keine Aussagen darüber, wie die Energiewende instrumentell ausgestaltet werden sollte. Es können daher nur begrenzt Aussagen zur Art und konkreten Gestaltung des notwendigen Instrumentenkanons gemacht werden.

Die Schlussfolgerungen der Forschungsnehmer, die aus den Szenarien abgeleitet werden können, ergeben sich insbesondere aus dem Vergleich der Szenarien. Insofern wird in den Projekten „Langfrist- und Klimaszenarien“ ein szenarienübergreifendes Dokument gepflegt, in dem die wesentlichen Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Forschungsnehmer zusammengefasst werden (*Modul 0*). Dieses Dokument wird im Projektverlauf mit dem zunehmenden Erkenntnisgewinn ergänzt und aktualisiert. Die jeweils aktuelle Version kann auf der BMWi-Webseite heruntergeladen werden.