

Phasen der Transformation des Energiesystems – Ein ganzheitlicher Blick auf alle Wandlungsketten und Verbrauchssektoren

Die Transformation des deutschen Energiesystems in Richtung signifikanter Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen kann durch eine Abfolge verschiedener Phasen beschrieben werden. Phasenübergänge ergeben sich dabei aus strukturellen Erfordernissen im Gesamtsystem bei kontinuierlichem weiteren Ausbau erneuerbarer Energiewandler, insbesondere Sonne und Wind. Die anstehende zweite Phase der Transformation ist durch eine umfassende Systemintegration volatiler erneuerbarer Energien insbesondere im Bereich der Strombereitstellung geprägt. Dies erfordert sowohl eine flexible komplementäre Erzeugung als auch die Aktivierung von Flexibilitätsoptionen auf der Verbrauchsseite.

Wesentlicher Antrieb für den Umbau des deutschen Energiesystems sind die klimapolitischen Ziele der Bundesregierung. Übergreifendes Langfristziel ist dabei die Absenkung der deutschen Treibhausgasemissionen bis 2050 um mindestens 80 %, bezogen auf den Referenzwert des Kyoto-Protokolls im Jahr 1990.

Langfristszenarien der Entwicklung des deutschen Energiesystems

In den vergangenen Jahren wurde von unterschiedlichen Institutionen eine Vielzahl von Szenarien zur Entwicklung des deutschen Energiesystems erstellt, die eine Absenkung der energiebedingten CO₂-Emissionen um mindestens 80 % bis zum Jahr 2050 abbilden. Diese Szenarien unterscheiden sich teilweise erheblich sowohl hinsichtlich des methodischen Vorgehens als auch hinsichtlich der zugrunde gelegten Technologien.

Eine Übersicht gibt *Abbildung 1*, in der die jährliche Bruttostromproduktion und deren Zusammensetzung für insgesamt 29 Szenarien, davon 24 Klimaschutzszenarien, zusammengestellt ist [1]. Die Mehrzahl der Szenarien sieht erneuerbare Energien als die wichtigsten Quellen der Energiebereitstellung; daneben spielt bei allen Szenarien effiziente Wandlung und Verbrauchsreduktion eine wesentliche Rolle zur Zielerreichung. Auch bei den Szenarien mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien gibt es wichtige Unterschiede, und zwar hinsichtlich der Zusammensetzung von erneuerbaren Energien aus heimischer



Fraunhofer ISE
Prof. Dr. Hans-Martin Henning
hans-martin.henning@ise.fraunhofer.de

Andreas Palzer
andreas.palzer@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES
Dr. Carsten Pape
carsten.pape@iwes.fraunhofer.de

DLR
Frieder Borggreffe
frieder.borggreffe@dlr.de

ZSW
Henning Jachmann
henning.jachmann@zsw-bw.de

Wuppertal Institut
Prof. Dr. Manfred Fischedick
manfred.fischedick@wupperinst.org

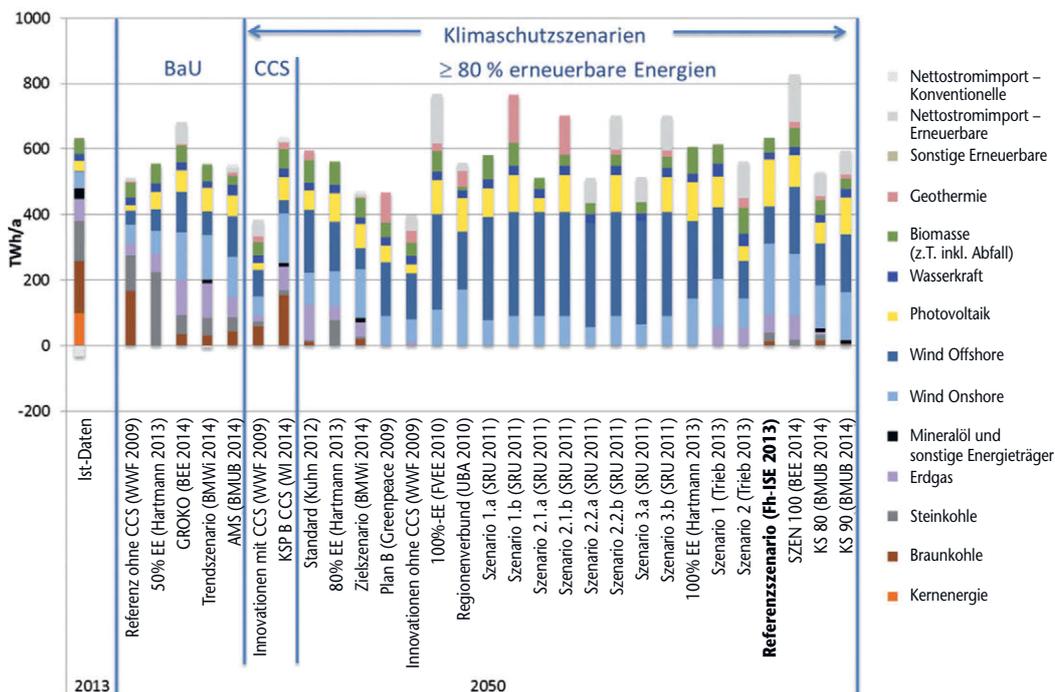


Abbildung 1
Szenarienvergleich Bruttostromzusammensetzung
Bruttostromerzeugung und deren Zusammensetzung in 29 unterschiedlichen Szenarien, davon 24 Klimaschutzszenarien (zum Vergleich Ist-Daten 2013)

Produktion und aus Import. Import kann entweder in Form von Energieträgern (Biomasse, Brenn-/Kraftstoffe) oder in Form von Stromimporten über Hochspannungsübertragungsnetze erfolgen. Je höher der Import erneuerbarer Energien, desto geringer kann die heimische Produktion ausfallen. Ein Beispiel für ein Szenario mit hohem Anteil an regelbarem Strom, der u.a. aus Nordafrika (15 %) importiert wird, ist das „Szenario 2, Trieb 2013“ (fünftes von rechts in *Abbildung 1*) [2]. Da hier die Stromproduktion vor allem auch durch solarthermische Kraftwerke mit integriertem Speicher und ggf. fossiler Zusatzfeuerung erfolgt, ist eine regelbare Strombereitstellung möglich.

Betrachtung eines ausgewählten Szenarios

Anhand eines Beispielszenarios wird die Entwicklung des Ausbaus erneuerbarer Energien dargestellt, aus der sich die Strukturierung der Transformation des Energiesystems in Phasen ergibt. Das ausgewählte „Referenzszenario (Fh-ISE 2013)“ (in *Abbildung 1* das vierte von rechts) basiert auf einer Sektor- und Energieträger-übergreifenden, stundengenauen Modellierung und Strukturoptimierung des deutschen Energiesystems unter der Annahme einer Absenkung der energiebedingten CO₂-Emissionen um 81 % [3].

Wesentliche Ergebnisse dieser Optimierung:

- Erneuerbare Energien decken rund 80 % der Stromerzeugung bei leicht steigendem Strombedarf. Im Zielsystem beträgt die installierte Leistung der Photovoltaik 147 GW, von Windenergieanlagen

an Land 120 GW und von Windenergieanlagen auf See 32 GW.

- Durch Verbrauchsreduktion, insbesondere im Bereich der klassischen Stromverbraucher (z. B. Beleuchtung, Pumpen und Antriebe) und beim Raumwärmebedarf des Gebäudesektors, sowie erheblicher Effizienzgewinne durch effiziente Wandler erfolgt eine Absenkung des Primärenergiebedarfs um knapp 50 % bezogen auf den Wert in 2008 (s. auch weiter unten).
- Kraftwärmekopplungsanlagen, insbesondere im mittleren (Quartiers-KWK) und großen Leistungsbereich (große Heizkraftwerke) decken nahezu vollständig die residuale Stromerzeugung. Die installierte elektrische Leistung der KWK-Anlagen beträgt insgesamt knapp 60 GW.
- Wärmepumpen mit elektrischem Antrieb und Gas-Wärmepumpen sind die dominante Heiztechnik in Einzelgebäuden.
- Die jährlichen Vollkosten des Gesamtsystems liegen in der gleichen Größenordnung wie heute.

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung des Ausbaus der erneuerbaren Energien Photovoltaik und Wind in diesem Szenario. Die Mehrzahl der betrachteten Szenarien sieht eine insgesamt installierte Leistung von 300 GW oder mehr an fluktuierenden erneuerbaren Energien vor, wobei sich der Mix aus Photovoltaik, Wind Onshore und Wind Offshore jeweils unterscheidet. Dieser Wert kann allerdings geringer ausfallen, wenn der Anteil regelbarer erneuerbarer Energien höher ist, z. B. wie im oben erwähnten Szenario (Trieb 2013) [2] mit hohem Anteil an Importstrom.

Abbildung 2
Ausbau der erneuerbaren Energien
Photovoltaik und Wind
bis 2050 im
Beispielszenario

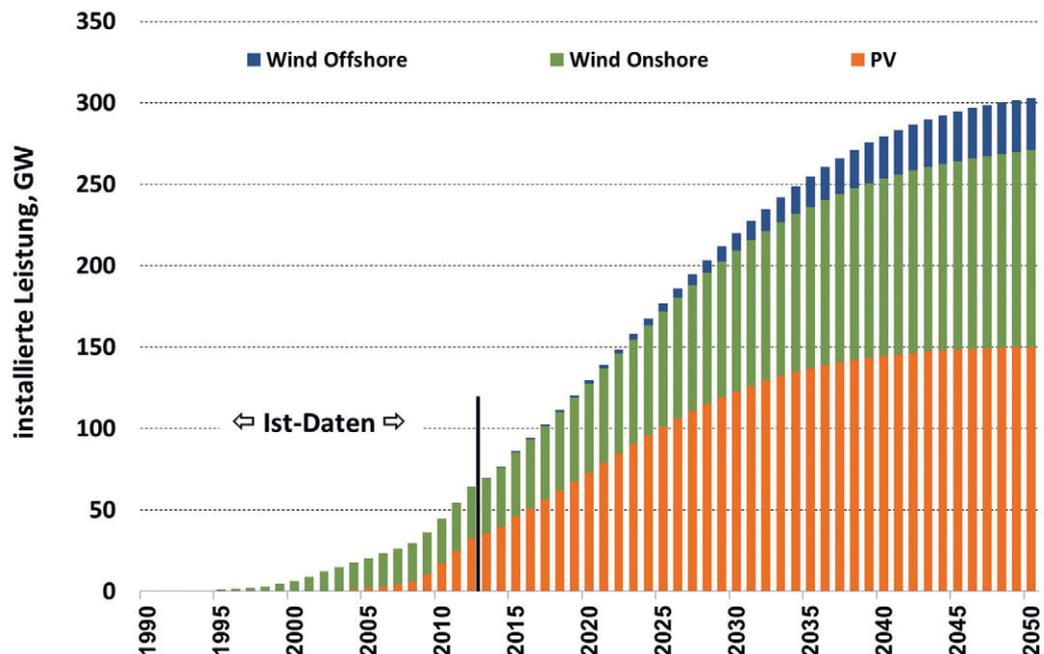




Abbildung 3
Flexibilitätsoptionen
bei Strombereitstellung
und -nutzung

Phasen der Transformation des Energiesystems

Der kontinuierliche Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien ist in der Mehrzahl der Szenarien ein Schlüsselement der Transformation des Energiesystems. Dieser Ausbau erfolgte seit den späten 1990er Jahren bis heute ohne wesentliche Anpassung des Gesamtsystems. Heute beträgt der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromproduktion mehr als 27%, wovon gut die Hälfte aus Photovoltaik und Wind stammt. Innerhalb dieser *ersten Phase* der Transformation des Energiesystems wurden signifikante Fortschritte bei der Technologieentwicklung und Kostenreduktion dieser Energiewandler erreicht.

Die anstehende *zweite Phase* der Systemtransformation erfordert nun eine umfassende Systemintegration fluktuierender erneuerbarer Energien. Wesentliche Elemente sind einerseits die zunehmende Flexibilisierung der komplementären (residualen) Stromerzeugung und andererseits der flexible Betrieb von Anlagen auf der Nutzungs- bzw. Verbrauchsseite. Dabei erfordert der wachsende Anteil erneuerbarer Energien im Strommix auch die Aktivierung von Flexibilitätspotenzialen außerhalb der klassischen Stromverbraucher, zunächst insbesondere im Bereich der Wärmebereitstellung und anschließend auch im Bereich der Mobilität. Eröffnet sich mittelfristig die Option relevante Anteile Stroms aus regelbarer erneuerbarer Erzeugung z. B. aus Nordafrika zu importieren, fällt der Anteil notwendiger Flexibilisierung geringer aus.

Abbildung 3 zeigt in qualitativer Darstellung wichtige Flexibilitätsoptionen und ihre Bedeutung auf der Zeitachse.

Die Analyse der Entwicklung der Residuallastkurve zeigt, dass zunächst die Aktivierung von Flexibilitätsoptionen, die eine Anpassung von Erzeugung und Verbrauch im Zeitbereich unterhalb von Stunden bis einige Stunden – also Lastverschiebungen im Tagesverlauf und Einsatz von Kurzzeitspeichern einschließlich Batterie-basierter Elektrofahrzeuge – ausreichen.

Neben Demand Side Management und Flexibilitätsoptionen im KWK-Bereich mit vergleichsweise geringem Investitionsaufwand können mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien auch investitionsintensive Maßnahmen wirtschaftlich sinnvoll sein. Beispiele hierfür sind Batteriespeicher in Kombination mit PV- oder Wind-Anlagen oder Importe regelbarer erneuerbarer Energien.

Ab Durchdringungsgraden von rund 60–70% fluktuierender Energien für die Strombereitstellung und darüber hinaus werden zunehmend Langzeitspeicher notwendig. (Wobei durch den Import regelbarer erneuerbarer Energien Phase 2 ausgedehnt und der Aufwand für Langzeitspeicher reduziert werden könnte.)

Hier beginnt die *dritte Phase* der Transformation des Energiesystems, in der wachsende Mengen erneuerbaren Stroms in synthetische Energieträger (Wasserstoff, Methan, flüssige synthetische Brenn- und Kraftstoffe) gewandelt werden. Vor einer Verwendung dieser Energieträger in den Bereichen Strom oder Wärme ist aber ihr Einsatz als Kraftstoffe für den Verkehr sinnvoller, da hier direkt fossile Energieträger, die heute für den Antrieb in Verbrennungsmotoren ver-

Abbildung 4
Hauptphasen
der Transformation des
Energiesystems

Phase 1 „Entwicklung EE“	Phase 2 „Systemintegration“	Phase 3 „Synth. Brennstoffe“	Phase 4 „EE-Import“
CO ₂ -Reduktion ~ 0-20%	CO ₂ -Reduktion ~ 20-50%	CO ₂ -Reduktion ~ 50-75%	CO ₂ -Reduktion ~ 75-100 %
<ul style="list-style-type: none"> ■ Entwicklung Basistechnologien ■ Wesentliche Kostenreduktionen ■ Markteinführung und Ausbau ohne signifikante Implikationen für Gesamtsystem 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aktivierung von Flexibilitäten bei residualer Stromerzeugung und -nutzung ■ Kurzzeitspeicher ■ Demand Side Management 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Signifikante negative Residuallasten ■ Nutzung von EE-Strom zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe ■ Verwendung vorrangig für Mobilität 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Vollständige Verdrängung fossiler Ressourcen in allen Nutzungsbereichen ■ Import von erneuerbaren Energieträgern, z.B. aus sonnenreichen Regionen
<p>Fortwährend kontinuierliche Erhöhung der Effizienz auf der Nutzungsseite</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ baulicher Wärmeschutz Gebäude ■ Reduktion Stromverbrauch in klassischen Verbrauchsbereichen (z.B. Beleuchtung, Pumpen und Antriebe, ...) 			

wendet werden, ersetzt werden können. Dabei sind unterschiedliche Antriebskonzepte denkbar, wie z. B. Wasserstoff/Brennstoffzellen-Konzepte oder Gasmotoren, die einen Mix aus Erdgas, Bioerdgas und synthetischem Methan verwenden.

Schließlich sehen wir eine *vierte Phase* der Transformation des Energiesystems, die durch die Verdrängung der letzten noch im System genutzten fossilen Energieträger – insbesondere Erdgas – gekennzeichnet ist. Hier ist es schwierig abzusehen – aber aus heutiger Sicht auch noch nicht relevant – ob Energieträger auf Basis erneuerbarer Energien aus lokaler Erzeugung zum Tragen kommen oder importierte Energieträger wie z. B. Flüssiggas aus sonnenreichen Regionen, die dort im großen Stil hergestellt werden.

Abbildung 4 zeigt eine Übersicht über die vier Hauptphasen der Transformation des Energiesystems. Dabei ist wichtig anzumerken, dass neben den strukturellen Phasen der Systemtransformation wesentliche Elemente vor allem im Bereich der Nutzungseffizienz kontinuierlich ablaufen müssen. Hierzu gehört insbesondere eine kontinuierliche Absenkung des Raumwärmebedarfs durch Maßnahmen des baulichen Wärmeschutzes sowie die Erhöhung der Nutzungseffizienz bei der Stromnutzung.

Effizienzgewinne

Wesentliche Elemente der Effizienz der Energiewandlung sind transformationsimmanent, d. h., der Systemumbau führt quasi „automatisch“ zu einer Steigerung der Effizienz.

Wichtige Beispiele für transformationsimmanente Effizienzgewinne:

- Die Kombination aus fluktuierenden erneuerbaren Energien und flexiblen Residualkraftwerken möglichst mit Kraft-Wärme-Kopplung zur Stromerzeugung bedingt die Vermeidung großer Primärenergieverluste, die heute beim Betrieb thermischer Kraftwerke auftreten.
- Der Ersatz von einfacher Verbrennung zur Wärmebereitstellung durch elektrische Wärmepumpen in Verbindung mit hohen Anteilen CO₂-armen Stroms stellt eine wesentlich effizientere Wärmebereitstellung dar.
- Das Gleiche gilt für den Ersatz von Verbrennungsmotoren durch strombasierte Systeme (Elektromotoren mit Batterie oder Brennstoffzelle).

Zusätzliche, nicht transformationsimmanente Effizienzgewinne sind Steigerungen der Nutzungseffizienz in den weiter oben genannten Feldern wie dem baulichen Wärmeschutz des Gebäudebestands oder der Reduktion des Stromverbrauchs in klassischen Anwendungen.

Nutzung von Strom im Wärmesektor

Der Wärmesektor bietet bereits heute technische Optionen zur Nutzung von (Überschuss-)Strom aus erneuerbaren Energien, meist in Verbindung mit thermischen Speichern. Hier sind unterschiedliche Anwendungsfälle zu unterscheiden:

- Bereitstellung negativer Regelenergie oder
- Nutzung heute abgeregelten Stroms aus erneuerbaren Energien.

Abregelung erfolgt im heutigen System auf Grund von zwei Hauptursachen, nämlich entweder auf Grund von Netzrestriktionen, die eine direkte Nutzung verhindern, oder auf Grund von negativen Preisen an der Strombörse. Aus technischer Sicht können noch in der Nutzung befindliche Nachtspeicherheizungen, Wärmepumpen, elektrische Warmwasserbereiter, Wärmespeicher in Verbindung mit KWK-Anlagen aber auch neue Konzepte wie Elektrodenheizkessel in Fernwärmenetzen oder der Industrie als flexible Lasten genutzt werden. Der regulatorische Rahmen liefert heute allerdings nur in wenigen Fällen ausreichende Anreize, um diese Potenziale zu aktivieren. Wichtig für die Entwicklung dieser Anwendungen ist der Einsatz hybrider Lösungen, um flexibel je nach Stromangebot den Energieträger wechseln zu können. Ein Beispiel sind hybride Wärmepumpen, die heute von vielen Heizungsherstellern angeboten werden. Hier bietet sich mittelfristig ein großes Potenzial zur effizienten Nutzung erneuerbaren Stroms zur Wärmebereitstellung mit Umstellung des Betriebs auf Erdgas zu Zeiten geringer Stromerzeugung mit Sonne und Wind. Im Rahmen einer Studie für die Agora Energiewende wurden Potenziale zur zeitnahen Nutzung von Flexibilitätsoptionen im Wärmemarkt ermittelt und Empfehlungen für die Anpassung des regulatorischen Rahmens gegeben, um diese Potenziale zu erschließen [4].

Zusammenfassung

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung sind neben der Verringerung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern im Verbund mit ihren volatilen Energiepreisen der wesentliche Antrieb für den Umbau des deutschen Energiesystems. Der kontinuierliche Ausbau erneuerbarer Energien mit wesentlichen Anteilen fluktuierender Wandler (Sonne, Wind) bedingt die Notwendigkeit einer Anpassung des Gesamtsystems. Dabei sind vier wesentliche Hauptphasen sichtbar, wobei die anstehende zweite Phase durch eine umfassende Systemintegration gekennzeichnet ist. Die Betrachtung der Transformation des Energiesystems in Phasen hilft dabei, die Transformation zu strukturieren und Prioritäten auf der Zeitachse zu benennen. Phasenwechsel benötigen dabei eine begleitende Anpassung der regulatorischen Rahmenbedingungen. Für die anstehende zweite Phase ist hier insbesondere die Schaffung von Marktanreizen für Flexibilisierung zu nennen. So steht im kürzlich veröffentlichten Grünbuch des Bundeswirtschaftsministeriums [5]: „Der Markt muss dabei – sowohl in statischer als auch in dynamischer Sicht – die richtigen Anreize zur Entwicklung und Nutzung der Flexibilitätsoptionen setzen.“

Literatur

[1] Die Darstellung wurde vom Wuppertal Institut im Zuge einer Analyse wichtiger Szenarien zur Entwicklung des deutschen Energiesystems im Rahmen des Projektes „Energiesysteme der Zukunft“ erstellt. Dieses Projekt wird gemeinsam von den Akademien Leopoldina, acatech und der „Union der deutschen Akademien der Wissenschaft“ durchgeführt. Die Darstellung ist bislang noch unveröffentlicht.

[2] Trieb, F.: Integration erneuerbarer Energiequellen bei hohen Anteilen an der Stromversorgung, Fachzeitschrift *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 63, Heft 7 (2013) 28–32

[3] Henning, H-M., Palzer, A., *Energiesystem Deutschland 2050 – Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien*. Studie Fraunhofer ISE, November 2013. Download unter: <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien-und-positionspapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050>

[4] Gerhardt, N., Richts C., Hochloff, P., Müller, T., Hilpert, J., Antoni, O., Schulz, W.: *Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien – Handlungsvorschläge basierend auf einer Analyse von Potenzialen und energiewirtschaftlichen Effekten*. Studie für Agora Energiewende, Juni 2014

[5] BMWi 2014: *Ein Strommarkt für die Energiewende*. Diskussionspapier des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (Grünbuch). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin, Oktober 2014. Download unter: <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Strommarkt-der-Zukunft/gruenbuch.html>