

Phasen der Energiesystemtransformation



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

Sascha Samadi
sascha.samadi@wupperinst.org

Fraunhofer IWES
Prof. Dr. Clemens Hoffmann
clemens.hoffmann@iwes.fraunhofer.de

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

DLR
Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de

IZES
Prof. Dr. Uwe Leprich
leprich@izes.de

ZSW
Maïke Schmidt
maïke.schmidt@zsw-bw.de

Die Energiewende stellt einen ambitionierten und zugleich hochkomplexen Transformationsprozess dar. Der vorliegende Artikel stellt acht Thesen auf, die dabei helfen können, die Herausforderungen besser zu verstehen und Ansatzpunkte für zukünftiges Handeln zu identifizieren sowie Forschungsbedarf aufzuzeigen.

These 1: Ein allgemeines Verständnis von Transformationsprozessen kann wertvolle Hinweise zur Gestaltung der Energiewende liefern.

Sowohl in der Forschung als auch in der Politik besteht mittlerweile ein breiter Konsens über die Notwendigkeit einer grundlegenden Transformation des gegenwärtigen, überwiegend auf fossilen Energieträgern basierenden Energiesystems. Insbesondere die Risiken des Klimawandels führen zu einem zeitlichen Handlungsdruck, der weltweit eine weitgehende Umstellung des Energiesystems bis etwa Mitte des laufenden Jahrhunderts erforderlich macht.

Zumindest in Deutschland gibt es aktuell eine weitgehend übereinstimmende Vorstellung über die gewünschte Ausgestaltung des zukünftigen Energiesystems: Die Nutzung von Energie soll gegenüber heute deutlich effizienter werden und die Energieversorgung bis zum Jahr 2050 überwiegend und perspektivisch vollständig auf Basis erneuerbarer Energien erfolgen (Fischedick u. a. 2012, Hennische u. a. 2012).

Mit zunehmendem zeitlichen Handlungsdruck rückt nunmehr die Frage in den Vordergrund, welche Schritte Politik bzw. Gesellschaft konkret ergreifen müssen, um die Vision eines klimaverträglichen, wettbewerbsfähigen, sicheren und gleichzeitig effizienten Energiesystems Wirklichkeit werden zu lassen.

Dabei hat in Deutschland die in Teilbereichen des Energiesystems beschleunigte Transformationsdynamik in den vergangenen Jahren die hohe Komplexität des Transformationsprozesses deutlich werden lassen. Daraus wächst die Einsicht, dass ein möglichst detailliertes Verständnis des Systems, seiner Elemente und sozio-technischen Interdependenzen und daraus abgeleitet der Veränderungsmöglichkeiten für eine erfolgreiche Gestaltung der Transformation von hoher Bedeutung ist.

These 2: Transformationsphasen des Energiesystems sind kein neues Phänomen, aber Dimension und Geschwindigkeit des notwendigen Wandels stellen eine neue wesentliche Herausforderung dar.

Wesentliche Merkmale des Energiesystems haben sich bereits in der Vergangenheit innerhalb weniger Jahrzehnte deutlich verändert. So lag beispielsweise der Anteil der Kohle an der globalen Primärenergieversorgung noch im zweiten Jahrzehnt des vergangenen Jahrhunderts bei rund 70% und der Anteil von Erdöl bei unter 10%. 60 Jahre später lag der Anteil der Kohle nur noch bei rund 25% und der von Öl hingegen bei etwa 45% (Nakicenovic u. a. 1998). Auch die Stromversorgung Westdeutschlands hat innerhalb relativ kurzer Zeit wesentliche Umbrüche erlebt: Innerhalb von nur 15 Jahren – zwischen 1970 und 1985 – stieg beispielsweise der Anteil der Kernenergie von 2% auf 31% (Statistik der Kohlenwirtschaft 2014).

Zweifelsohne ist die in den kommenden Jahrzehnten für eine erfolgreiche Dekarbonisierung notwendige Transformation umfassender als die genannten historischen Umbrüche. Zum einen muss der Anteil der erneuerbaren Energien stetig weiter ansteigen. Somit müssen etablierte Energieträger nicht nur ergänzt, sondern perspektivisch vollständig verdrängt werden. Zum anderen unterscheidet sich der Großteil der erneuerbaren Energiequellen fundamental (u. a. in Bezug auf Energiedichte und Speicherbarkeit) von fossilen und atomaren Energiequellen. Dennoch verdeutlichen die genannten historischen Beispiele, dass trotz der relativ langen Investitionszeiträume für neue Technologien und energierelevanten Infrastrukturen innerhalb von nur wenigen Jahrzehnten wesentliche Veränderungen im Energiesystem bzw. in Teilbereichen des Energiesystems erreicht werden können und neue Energieträger zur dominierenden Energiequelle heranwachsen können. Für den in den kommenden Jahrzehnten anstehenden Transformationsprozess legt dies nahe, dass aus den Umständen dieser historischen Umbrüche im Energiesystem gelernt werden sollte (Grubler 2012).

Dabei können auch erfolgreiche Transformationsprozesse aus anderen Bereichen wichtige Erkenntnisse für die zukünftigen Herausforderungen im Energiesystem liefern. So gilt allgemein, dass weitreichende Umbrüche häufig in der Folge von Krisen oder Knappheitssituationen eingetreten sind, d. h., wenn bestehende Strukturen an ihre Grenzen gestoßen

sind und bisherige Verhaltensmuster nicht mehr tragbar respektive etablierte Geschäftsfelder rückläufig waren. Transformationsprozesse sind vor allem dann erfolgreich, wenn hinreichende technologische Möglichkeiten verfügbar sind und es gelingt, diese in adäquate institutionelle, soziale und kulturelle Kontexte einzubinden. Sie werden befördert durch innovative Ideen, die in Demonstrationsvorhaben erfolgreich getestet werden und als Kristallisationskeime bestehende Strukturen (z. B. Marktstrukturen) verändern. Gesellschaftlicher Diskurs, Partizipation und Teilhabe auf unterschiedlichen Ebenen wirken ebenso beschleunigend auf die Umsetzung komplexer Veränderungsprozesse wie die Orientierung an einer gemeinsamen Vision. Paradebeispiel dafür ist der Ruf nach dem „Blauen Himmel über der Ruhr“ vor gut 50 Jahren von dem damaligen deutschen Kanzler Willy Brandt.

These 3: Energiewende ist mehr als Stromwende, auch wenn die Stromerzeugung bei der Dekarbonisierung vorangehen muss.

Die Energiewende muss als ganzheitliche Aufgabe der Umgestaltung des gesamten Energiesystems verstanden werden und Synergieeffekte und negative Rückkopplungen zwischen den verschiedenen Teilbereichen des Energiesystems müssen im Blick gehalten werden. Die Energiewende ist vor diesem Hintergrund deutlich mehr als eine Stromwende, auch wenn der Bereich der Stromerzeugung derzeit bei Weitem die größte Aufmerksamkeit in Gesellschaft, Politik und auch Forschung genießt.

Allerdings hat der Stromsektor in Bezug auf die Dekarbonisierung des gesamten Energiesystems auch zweifelsfrei eine Vorreiterfunktion (IPCC 2014). Die natürlichen Potenziale zur direkten Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien – nicht zuletzt über Windkraft- und Photovoltaikanlagen – sind in Deutschland und auch in anderen Regionen der Welt hoch und zunehmend wettbewerbsfähig erschließbar. Die direkte Einbindung von erneuerbaren Energien (etwa in Form von Brenn- und Kraftstoffen) für die Wärmebereitstellung und den Verkehrssektor sowie industrielle Anwendungen ist demgegenüber grundsätzlich begrenzt oder aber noch vergleichsweise teuer.

Entsprechend einheitlich gehen die vorliegenden Szenariostudien davon aus, dass in den nächsten Jahren und Jahrzehnten die CO₂-Emissionen des Stromsektors überdurchschnittlich stark reduziert werden. Dies gilt im Übrigen nicht nur für Deutschland, sondern auch europa- und weltweit. Beispielsweise ergeben die Berechnungen für die Klimaschutz-„Roadmap“ der EU aus dem Jahr 2011 (Europäische Kommission 2011), dass die CO₂-Emissionen im europäischen Stromsektor – je nach Szenario – bis zum Jahr 2030

(gegenüber 1990) um 54 bis 68 % sinken sollten, während alle Sektoren zusammen bis dahin nur eine Reduktion von 40 bis 44 % erreichen würden. Auch bis 2050 wäre der Stromsektor der klare Vorreiter beim Klimaschutz und sollte der Roadmap zufolge seine CO₂-Emissionen deutlich überdurchschnittlich – um 93 bis 99 % – reduzieren.

These 4: Direkte Stromnutzung gewinnt im Laufe der Energiewende stark an Bedeutung. Indirekte Stromnutzung (über „Power to X“) wird zeitversetzt in den Endenergiesektoren wichtiger werden.

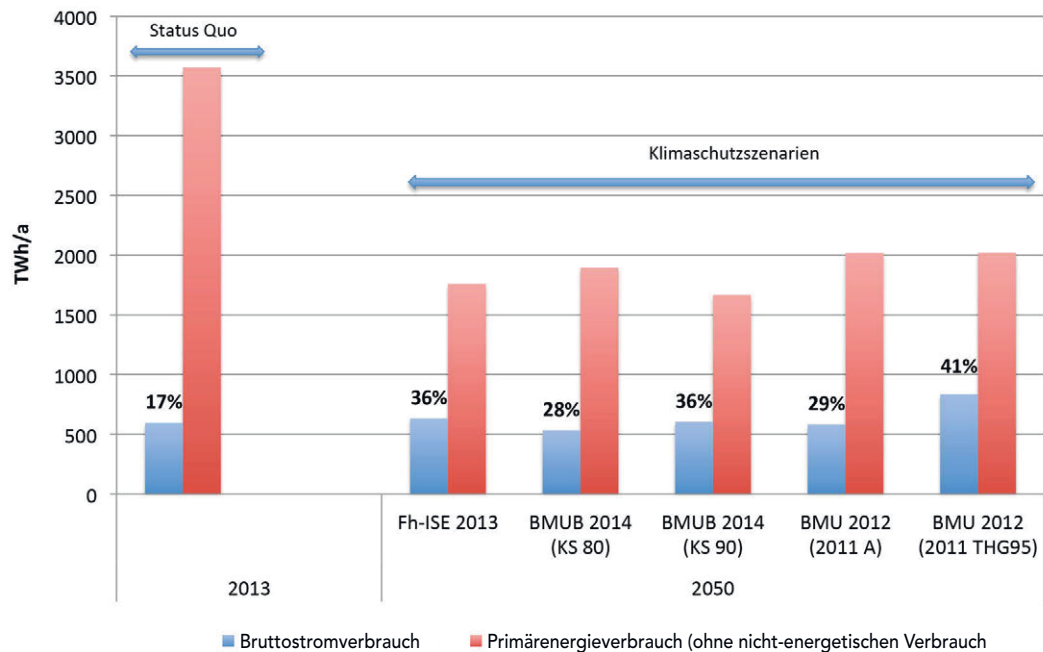
Die in Bezug auf Potenziale und Kosten vorteilhaften Rahmenbedingungen für eine Transformation der Stromerzeugung werden zukünftig nicht nur zur der in These 3 genannten Pionierrolle des Stromsektors bei der Dekarbonisierung des Energiesystems führen, sondern auch zu einem Bedeutungsgewinn des Endenergieträgers Strom gegenüber anderen Endenergieträgern. Infolge des weiteren Ausbaus von Stromerzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energien und deutlicher Verbesserungen der Energieeffizienz auf Seiten der Stromnachfrage steht mittelfristig in steigendem Maße CO₂-freier bzw. -armer Strom zur Verfügung, um insbesondere in Elektroautos und Wärmepumpen fossile Kraft- und Brennstoffe zu ersetzen. Der Stromsektor trägt auf diese Weise indirekt zu einer Dekarbonisierung des Verkehrs- und des Wärmesektors bei.

Längerfristig könnte der aus erneuerbaren Energien erzeugte Strom (indirekt) auch in solchen Anwendungen fossile Brenn- und Kraftstoffe ersetzen, in denen dies auf direkte Weise nicht oder nur zu sehr hohen Kosten möglich wäre. Beispiele hierfür sind der Flugverkehr und die Bereitstellung von Hochtemperaturwärme in der Industrie. Diese Anwendungen könnten mit Wasserstoff oder aus Wasserstoff gewonnenen synthetischen Gasen bzw. Kraftstoffen betrieben werden, während der benötigte Wasserstoff wiederum – über den Prozess der Elektrolyse – aus Strom erzeugt wird. Aufgrund der mit diesen Umwandlungsprozessen verbundenen energetischen Verluste wird aus heutiger Sicht mit einer breiten Einführung einer solchen „Power-to-Gas“- bzw. „Power-to-Liquid“-Strategie erst nach 2030 oder 2040 gerechnet.

Diverse Energieszenarien der vergangenen Jahre für Deutschland, Europa und die Welt erwarten einheitlich einen starken Bedeutungsgewinn für Strom (z. B. Fraunhofer ISE 2013, BMUB 2014, BMU 2012, IEA 2014, Europäische Kommission 2011).

Abbildung 1 verdeutlicht, dass der Bruttostromverbrauch in Deutschland gegenwärtig 17 % des deutschen Primärenergiebedarfs entspricht (AG Energiebilanzen 2014), dieser Anteil (der sowohl den

Abbildung 1
Steigender Anteil des
Bruttostromverbrauchs
am Primärenergiebedarf
in Deutschland



endenergetischen Verbrauch als auch den Verbrauch zur Umwandlung in Wasserstoff umfasst) wird jedoch bis zum Jahr 2050 verschiedenen Klimaschutzenszenarien zufolge auf etwa 30 bis 40 % ansteigen.

These 5: Sektorgrenzen verschwimmen zunehmend. Das Stromsystem erhält vermehrt zentrale Verknüpfungen zu den anderen Bereichen des Energiesystems.

Aus den in These 4 beschriebenen Entwicklungen ergeben sich gegenüber heute deutlich stärkere Verknüpfungen zwischen den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr. So wird eine Vielzahl an Ladestationen die Ladung – und möglicherweise auch die Entladung – von Elektroautos ermöglichen. Niedertemperaturwärme wird verstärkt elektrisch über Wärmepumpen gewonnen.

Damit die Potenziale dieser neuen Stromanwendungen zur Unterstützung hoher Anteile fluktuierender erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung optimal genutzt werden können, sind bestimmte technische Auslegungen rechtzeitig mitzudenken und umzusetzen (z. B. Ladestationen, an denen sowohl auf als auch entladen werden kann sowie – wo dies sinnvoll ist – Nutzung von Wärmespeichern in Kombination mit Wärmepumpen und KWK-Anlagen). Eine optimale Vernetzung erfordert zudem eine intelligente Kommunikation zwischen den Sektoren und damit informations- und kommunikationstechnologische Lösungen.

Längerfristig werden die Sektorgrenzen zusätzlich durch die ebenfalls in These 4 angesprochene Erzeugung und Nutzung von Wasserstoff bzw. daraus

gewonnene künstliche Brenn- und Kraftstoffen verschwimmen. Die Sektoren Strom, Wärme und Verkehr sind dann eng miteinander verknüpft. Dies ist eine entscheidende Voraussetzung, um eine hinreichende Flexibilität im Energiesystem zu generieren und die stark fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Energien mit Blick auf eine möglichst günstige Reduktion der CO₂-Emissionen optimal zu nutzen. Zukünftig sind damit sektoralen Partialanalysen nicht mehr ausreichend, sondern ganzheitliche Optimierungsansätze erforderlich.

These 6: Die Transformationsphasen des Energiesystems betreffen verschiedene Ebenen: Angebot, Nachfrage, Infrastruktur, Markt und Gesellschaft.

Die Transformation des Energiesystems wird auf verschiedenen Ebenen mit weitreichenden Änderungen verbunden sein. Neben der Angebotsseite, die häufig im Vordergrund der Diskussion steht, werden auch auf der Nachfrageseite, im Infrastrukturbereich, in der Organisation der Märkte und innerhalb der Gesellschaft diverse Anpassungen stattfinden.

Tabelle 1 beschreibt für diese verschiedenen Ebenen wesentliche, aus heutiger Sicht plausible Entwicklungen. Dabei lassen sich verschiedene Phasen unterscheiden:

- **Phase 1** ist geprägt durch Bewusstseinsbildung, Entwicklung und Markteinführung neuer Technologien sowie durch den Aufbau neuer Strukturen. Hinzu kommt das Ausschöpfen von Kostendegressionseffekten (Stromerzeugung aus Erneuerbaren bei 25 % und mehr).

- **Phase 2** steht ganz im Zeichen des Systembaus hin zu einer intelligenten technischen und ökonomischen Organisation des Zusammenspiels der verschiedenen Energietechnologien und -sektoren (Stromerzeugungsanteilen aus Erneuerbaren von 25 bis 60 %).
 - In **Phase 3** stehen die (Langzeit-)Speicherung, die weitgehende Vervollständigung der europäischen Integration und der Aufbau sektorübergreifender Strukturen im Vordergrund (Marktanteile Erneuerbarer von 60–100 %). Überschussstrom aus erneuerbaren Energien wird zunehmend umgewandelt in Wasserstoff, synthetisches Erdgas oder Kraftstoffe (Power to X). Er kommt so vor allem dort zum Einsatz, wo die direkten Einsatzmöglichkeiten von Strom begrenzt sind, also in den Bereichen Verkehr und Industrie.
 - **Phase 4** ist geprägt durch den weitgehenden Ersatz fossiler Energieträger in den Endenergiesektoren. Strom aus erneuerbaren Energien und seine Umwandlungsprodukte stellen dann den zentralen Baustein für die Dekarbonisierung des gesamten Energiesystems. Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien übertrifft in dieser Phase die (klassische) Stromnachfrage aus den Nachfragesektoren deutlich.
- Insbesondere in den Phasen 3 und 4 sind viele der in *Tabelle 1* beschriebenen Entwicklungen mit besonderer Unsicherheit verbunden, da sie stark abhängig sind von aus heutiger Sicht noch offenen technologischen, politischen und gesellschaftlichen Entwicklungen.

	Phase 1 (ca. 1990–2014)	Phase 2 (ca. 2014–2025)	Phase 3 (ca. 2025–2040)	Phase 4 (ca. 2040–2060)
Angebot	<ul style="list-style-type: none"> • Dynamischer Ausbau der Erneuerbaren • Hoher Anteil privater Investitionen • Schrittweiser Ausstieg aus der Atomenergie • Auf- und Ausbau F&E-Kapazitäten 	<ul style="list-style-type: none"> • Fortgesetzter Ausstieg aus der Kernenergie • Fortgesetzter EE-Ausbau, durch Lernkurveneffekte befördert • Zunehmende EE-Investitionen von Energieunternehmen • EE erbringen Systemdienstleistungen • Flexibilisierung des Kraftwerksparcs • Zunahme der Eigenversorgung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abgeschlossener Ausstieg aus der Kernenergie • Fortgesetzter EE-Ausbau (verstärkt: Repowering) • Drastischer Rückgang Kohle-Verstromung • Schrittweise Substitution von Erdgas durch PtG 	<ul style="list-style-type: none"> • Fortgesetzter EE-Ausbau • Deckung des zusätzlichen Strombedarfs teilweise durch EE-Importe • Zunehmende Bereitstellung synthetischer Kraftstoffe
Nachfrage	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzliche Erkenntnis, dass Energieeffizienz die zweite strategische Säule der Energiewende ist • Moderate Bemühungen zur Beschleunigung der Effizienzsteigerung 	<ul style="list-style-type: none"> • Deutliche Effizienzsteigerungen • Zunahme neuer Stromanwendungen (wie E-Autos, Wärmepumpe) • Erschließung neuer DSM-Potenziale (proaktive Regelung auf der Nachfrageseite) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfrage aufgrund neuer Stromanwendungen (und evtl. auch wegen H₂/PtG/PtX) steigt kontinuierlich an, könnte Strombedarf trotz Effizienzfortschritten erhöhen 	<ul style="list-style-type: none"> • Fortgesetzte Verdrängung fossiler Energieträger (z. B. in der Industrie) durch Strom und evtl. auch H₂/PtG führt zu weiterem Anstieg der Bruttostromnachfrage (auf evtl. über 1.000 TWh/a)
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Noch kein wesentlicher zusätzlicher Infrastruktur- und Flexibilitätsbedarf 	<ul style="list-style-type: none"> • Modernisierung und Ausbau der Netze • Ausbau Grenzkuppelstellen • Einsatz Kurzzeitspeicher • Erprobung Langzeitspeicheroptionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Relevanter Zubau von Langzeitspeichern 	<ul style="list-style-type: none"> • Vervollständigung europäischer Integration (inkl. Netzausbau) • Stärkung der Verbindung zur MENA-Region • Aufbau einer H₂-(PtG)-Infrastruktur
Markt/Ökonomie	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe EE-Zubau-Investitionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassungen am Energie-/ Strommarktdesign 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher Investitionsbedarf für Speicher-/Wasserstoff-Infrastruktur • Neues Marktdesign für System mit Grenzkosten nahe Null 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Feed in Tarife als bevorzugtes Instrument (ergänzt durch Ausschreibungen) 			
Gesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Problembewusstsein wächst • Private Impulsgeber und Vorreiter wichtig (z. B. 100%-Regionen) • Akteursvielfalt steigt 	<ul style="list-style-type: none"> • Überwindung von Widerständen gegen Infrastrukturausbau durch verstärkte Information und Kommunikation 	<ul style="list-style-type: none"> • Sektor-Grenzen im Energiesystem verschwimmen, neue Kooperationsformen entstehen 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Flankierung des Transformationsprozesses durch Änderungen des Lebensstils (z. B. „shared economy“) und bürgerschaftliches Engagement (z. B. Quartierslösungen) 			

Tabelle 1
Die Transformationsphasen des Energiesystems

These 7: Aus der Betrachtung der Transformationsphasen lassen sich der für die Energiewende nötige Forschungsbedarf sowie die Anforderungen an die Gestaltung der notwendigen politischen Rahmenbedingungen ableiten.

Die Erkenntnis, dass es sich bei der angestrebten Energiewende um einen komplexen gesellschaftlichen Transformationsprozess handelt, rückt bezüglich des zukünftigen Forschungsbedarfs zunächst einmal übergeordnete Aspekte der Transformationsforschung in den Vordergrund. Ein besseres allgemeines Verständnis von Transformationsprozessen kann bei der energiepolitischen Flankierung der Energiewende von großer Hilfe sein. In der Transformationsforschung wird in Bezug auf das zu untersuchende System ein möglichst guter Erkenntnisstand über das so genannte „Zielwissen“, das „Systemwissen“ und das „Transformationswissen“ angestrebt (Brandt u. a. 2013).

Zur Verbesserung des Zielwissens sollte untersucht werden:

- Was sind gesellschaftlich erwünschte Zielzustände für die Zukunft (z. B. hohe Lebensqualität, Klimaschutz, Ressourcenschutz, Versorgungssicherheit) und wie stehen diese miteinander in Wechselwirkung (Synergieeffekte oder negative Rückkopplungen)?

Zur Verbesserung des Systemwissens sollte untersucht werden:

- Wie setzen sich Systeme zusammen, wie werden Entscheidungen getroffen und welche sozio-technischen Interaktionen sind relevant?
- Welche Kenntnisse haben wir über den Zusammenhang zwischen tiefgreifenden technologischen Änderungen auf der einen Seite und gesellschaftlichen Änderungsprozessen auf der anderen Seite?

Zur Verbesserung des Transformationswissens sollte untersucht werden:

- Welche Erfahrungen kann man aus realen Transformationsprozessen gewinnen?
- Welches Bündel an Politikinstrumenten ist besonders geeignet, die Transformation des Energiesystems voranzubringen?
- Wie können gesellschaftliche Akteure zu aktiven Gestaltern der Energiewende werden und wie kann bestehenden Vorbehalten/Ängsten begegnet werden?

In Bezug auf die unterschiedenen Phasen der Energiesystemtransformation können eine Reihe von kurz- bis mittelfristig relevanten Forschungsfragen abgeleitet werden, deren Beantwortung eine erfolgreiche Gestaltung des Transformationsprozesses wahrscheinlicher werden lässt. Hierzu zählen die folgenden Fragen:

- Wie muss ein fortschrittliches Energie-/Strommarktdesign aussehen und wie könnte es sich im Verlauf der späteren Transformationsphasen entwickeln (Grenzkosten weitgehend bei Null)?
- Kann der notwendige Wandel auf der Erzeugungsseite überwiegend durch den Markt organisiert werden oder bedarf es weitgehender staatlicher Lenkung?
- Wer übernimmt das Management im zukünftigen Energiesystem, einschließlich der notwendigen IKT-Strukturen? Wer hat die Verantwortung für Systemstabilität?
- Mit welchen Technologien und Instrumenten kann das vorhandene sowie das sich neu ergebende nachfrageseitige Flexibilitätspotenzial erschlossen werden?
- Wie hoch ist kurz- bis mittelfristig der Bedarf für Netzausbau und Speicherausbau und welche Alternativen (attraktiv in Bezug auf Kosten und Akzeptanz) gibt es jeweils?
- Wie kann Akzeptanz für den und Beteiligung an dem Wandel erhöht und Widerständen entgegengewirkt werden?

Da viele der Entwicklungen in den späteren Phasen der Transformation bereits frühzeitige Weichenstellungen erfordern, sind auch einige Forschungsfragen, die diese späteren Phasen der Transformation betreffen, bereits heute von hohem Interesse bzw. steigender Dringlichkeit. Hierzu zählen die folgenden Fragen:

- Wann müssen für die Realisierung langfristiger Systemoptionen (z. B. Power to X) entscheidende Schritte (v. a. in Bezug auf den Aufbau der Infrastruktur) gemacht werden?
- Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Transformationsphasen bestehen zwischen den verschiedenen Bundesländern?
- Welche „Kristallisationskeime“ sind dafür notwendig bzw. können genutzt werden (z. B. industrieller Rest-Wasserstoff) und welche Kippmomente sind zu beachten?
- Welche Vor- und Nachteile haben die verschiedenen langfristigen Systemoptionen (multikriterielle Bewertung)?
- Unterscheidet sich die optimale langfristige Systemstrategie für Deutschland in Abhängigkeit von der Energiesystementwicklung im europäischen Ausland?
- Welche Wirtschaftsleistung kann bei einer europäischen Energiesystemtransformation in Europa erbracht werden und somit Importe fossiler Brennstoffe ersetzen?
- Ist die Energiesystemtransformation global übertragbar oder stieße sie an Grenzen und was sind die potenziell begrenzenden Faktoren (z. B. Ressourcen-Verfügbarkeit)?

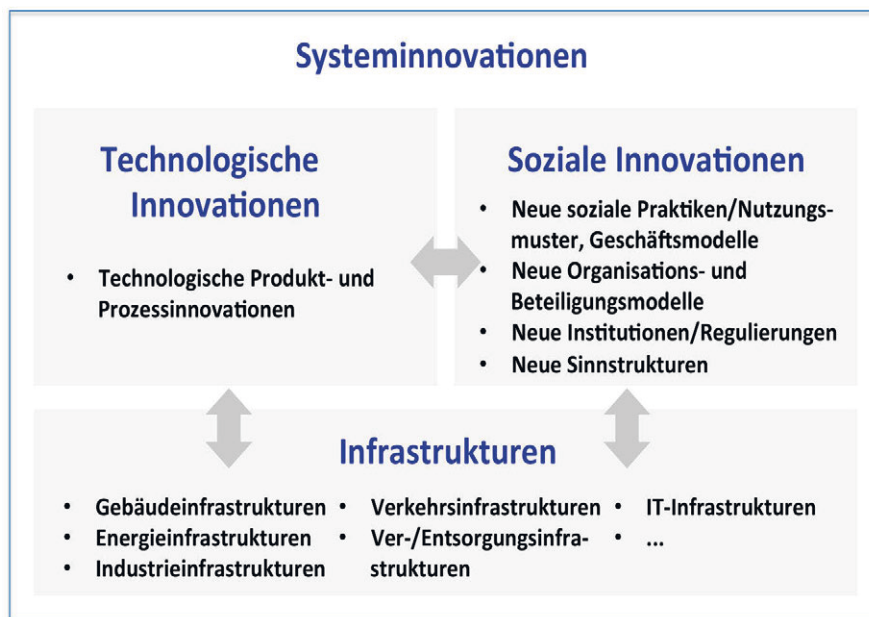


Abbildung 2

Systeminnovationen haben technologische, soziale und infrastrukturelle Innovationselemente.

- Welche kritischen Meilensteine müssten berücksichtigt werden?

These 8: Jenseits technischer Innovationen spielen Systeminnovationen eine entscheidende Rolle für die Umsetzung der Energiewende.

In der öffentlichen Diskussion über notwendige oder wünschenswerte Innovationen bei der weiteren Gestaltung der Energiewende liegt der Schwerpunkt eindeutig auf einzelnen Technologien. So wichtig entsprechende Innovationen – z. B. im Bereich der Speichertechnologien – auch sein mögen, so wichtig ist es auch zu betonen, dass der komplexe Transformationsprozess „Energiewende“ nicht ausschließlich mit technologischen Innovationen verwirklicht werden kann. Vielmehr werden technologische Innovationen nur im Zusammenspiel mit sozialen Innovationen und neuen Infrastrukturen ihr Potenzial ausspielen können (Howaldt/Schwarz 2014). Dieses Zusammenspiel zwischen einzelnen Technologien, den infrastrukturellen Gegebenheiten und den gesellschaftlichen Umständen ist sowohl bei der Forschung für ein nachhaltiges Energiesystem als auch bei entsprechenden energiepolitischen Entscheidungen zu berücksichtigen.

Ein Praxisbeispiel für Systeminnovationen ist die Verbindung technologischer Innovationen bei der Entwicklung von Elektroautos mit dem Aufbau passender Ladeinfrastrukturen sowie Abrechnungs- und Mobilitätskonzepten (z. B. Carsharing).

Abbildung 2 verdeutlicht, aus welchen Elementen sich Systeminnovationen zusammensetzen können.

Literatur

AG Energiebilanzen (2014); Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland – 1990 bis 2013; <http://www.ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>

BMU (2012); Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global; http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf

BMUB (2014); Klimaschutzszenario 2050 – 1. Modellierungsrunde; <http://www.oeko.de/oekodoc/2065/2014-638-de.pdf>

Brandt, P., Ernst, A., Gralla, F. u. a. (2013); A review of transdisciplinary research in sustainability science; in: Ecological Economics; Bd. 92; S. 1–15.

Europäische Kommission (2011); Fahrplan für den Übergang zu einer wettbewerbsfähigen CO₂-armen Wirtschaft bis 2050; <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0112&from=EN>

Fischedick, M., Samadi, S. und Venjakob, J. (2012); Die Rolle erneuerbarer Energien für den Klimaschutz am Beispiel Deutschlands; in: Müller, T. (Hrsg.); 20 Jahre Recht der Erneuerbaren Energien; S. 51–73, Baden-Baden

Fraunhofer ISE (2013); Energiesystem Deutschland 2050 – Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz Erneuerbarer Energien; <http://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/veroeffentlichungen-pdf-dateien/studien-und-konzeptpapiere/studie-energiesystem-deutschland-2050.pdf>

Grubler, A. (2012); Energy transitions research: Insights and cautionary tales; in: Energy Policy, Bd. 50, S. 8-16.

Hennicke, P., Schleicher, T. und Samadi, S. (2012); Die Rolle der Energieeffizienz in Szenarien und Realität; in: Müller, T. (Hrsg.); 20 Jahre Recht der Erneuerbaren Energien; S. 51-73, Baden-Baden

Howaldt, J. und Schwarz, M. (2014); Soziale Innovation – Eine Herausforderung und Chance für Wissenschaft und Gesellschaft, Wiesbaden.

IEA (2014); Energy Technology Perspectives 2014 – Harnessing Electricity's Potential, Paris

IPCC (2014); Summary for Policymakers; In: Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change – Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK und New York, USA

Nakicenovic, N., Grübler, A. und McDonald, A. (1998); Global Energy Perspectives, Cambridge, UK und New York, USA

Statistik der Kohlenwirtschaft (2014); Bruttostromerzeugung aller Kraftwerke – alte Bundesländer; <http://www.kohlenstatistik.de/17-0-Deutschland.html>