

# Methodische Aspekte der Systemanalyse zur Energiewende

Martin Robinius<sup>1</sup>, Thomas Grube<sup>1</sup>, Sebastian Schiebahn<sup>1</sup>, Detlef Stolten<sup>1,2</sup> <sup>1</sup> Institut für elektrochemische Verfahrenstechnik, Forschungszentrum Jülich GmbH, <sup>2</sup> RWTH Aachen

## Kurzfassung

Dieser Beitrag beschreibt die methodischen Aspekte der Systemanalyse zur Energiewende. Dazu werden einleitend die wesentlichen Schritte und Ziele der Energiewende benannt sowie die Herausforderungen der Systemanalyse zur Energiewende beschrieben. Eine wesentliche Methode der Systemanalyse zur Energiewende - die Szenario-Analyse - wird auf ihre Vor- und Nachteile hin untersucht. Abschließend werden anhand von zwei Beispielen die Möglichkeiten zur Komplexitätsreduktion in der Modellierung vorgestellt.

## 1. Einleitung

Jede Generation wird durch ökologische und ökonomische Veränderungen herausgefordert, ihre bisherige Lebensweise neuen Bedingungen anzupassen. In England wurden zu Zeiten der Industrialisierung um 1780 höhere Schornsteine gebaut, um die Luftverunreinigung aus den Wohngebieten fern zu halten. In den 1980er Jahren führte das sogenannte Waldsterben in Deutschland zum Einbau von Rauchgasentschwefelungsanlagen in Kraftwerken. Im Jahr 1985 zeigte die Entdeckung des Ozonlochs die Gefährlichkeit der Fluorkohlenwasserstoffe auf, die dann im Jahr 1990 auf der internationalen Londoner Konferenz verboten wurden.

Für die heutige Generation ist der Treibhauseffekt zu der zentralen Herausforderung geworden. Dieser wird durch anthropogene Klimagase, wie beispielsweise Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) oder Methan (CH<sub>4</sub>), verursacht. Sie absorbieren einen Teil der Infrarotstrahlung, welcher sonst von der Erdoberfläche ins Weltall entweichen würde. Anschließend emittieren sie einen Teil dieser Wärmestrahlung zurück zur Erdoberfläche, wodurch diese sich erwärmt.

Zur Eindämmung der Auswirkungen des anthropogenen Treibhauseffektes hat sich Deutschland im Jahr 2009 auf das „zwei Grad Ziel“ des IPCC, welches eine Begrenzung der Erderwärmung auf zwei Grad Celsius verlangt, verständigt [1]. Dieses Ziel wurde im Jahr 2010 auf der Klimakonferenz in Cancún erstmals in einer UN-Entscheidung offiziell anerkannt [2]. Die Weltklimakonferenz in Paris im Jahr 2015 hat das zwei Grad Ziel bestätigt sowie festgehalten, dass Anstrengungen von den Staaten unternommen werden sollen, den Temperaturanstieg auf 1,5 Grad Celsius zu begrenzen. Weiterhin ist beabsichtigt, Klimaneutralität der anthropogenen Emissionen in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zu erreichen. [3, 4]

Von der Europäischen Union (EU) wurden messbare Ziele für das Jahr 2020 beschlossen:

- Treibhausgasemissionen werden um 20 % bzw. um 30 %, falls andere Industrieländer vergleichbare Ziele vereinbaren, gemindert.
- Die Nutzung erneuerbarer Energien wird auf 20 % des gesamten Endenergieverbrauches gesteigert.
- Die Energieeffizienz wird um 20 % gesteigert im Vergleich zu einer Entwicklung ohne weitere Effizienzanstrengungen.

Deutschland hat sich selbstverpflichtend höhere Ziele im Rahmen der sogenannten Energiewende gesetzt. Diese umfassen insbesondere folgende vier Hauptziele: Ausstieg aus der Kernenergie bis zum Jahr 2022, den stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien,

Steigerung der Energieeffizienz und des Klimaschutzes durch Reduktion der Treibhausgasemissionen [5]. Diese Ziele sind bis zum Jahr 2050 quantitativ definiert, wie beispielsweise für die erneuerbaren Energien (EE) in Tabelle 1 zu sehen [6, S. 11].

	2020	2030	2040	2050
<b>Treibhausgasemissionen</b>				
Reduzierung gegenüber dem Jahr 1990	Mindestens 40 %	Mindestens 55 %	Mindestens 70 %	Mindestens 80 % bis 95 %
<b>Erneuerbare Energien</b>				
Anteil am Bruttostromverbrauch	Mindestens 35 %	Mindestens 50 %	Mindestens 65 %	Mindestens 80 %
Anteil am Bruttoendenergieverbrauch	18 %	30 %	45 %	60 %

*Tabelle .1: Quantitative Ziele der Erneuerbaren Energien [6, S. 11]*

Unter dem Begriff “Energiewende” wird bisher hauptsächlich der Stromsektor als System subsumiert [7]. Dieses Begriffsverständnis wird sich langfristig zu einer dem Wort entsprechenden systemübergreifenden Energiewende hin transformieren müssen. [8] Daher sollten sich auch die methodischen Aspekte zur Systemanalyse der Energiewende mitentwickeln.

## **2. Herausforderungen der Systemanalyse zur Energiewende**

Ein System [9] ist eine „[...] Gesamtheit von Elementen, die so aufeinander bezogen sind und in einer Weise wechselwirken, dass sie als eine aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden können und sich in dieser Hinsicht gegenüber der sie umgebenden Umwelt abgrenzen.“[10, S. 20]. Es ist daher gekennzeichnet durch [11]:

- Grenze gegenüber der Umwelt (Systemgrenze)
- Schnittstellen zum Austausch von Materie, Energie und Informationen
- Komponenten, die sich weiter zerlegen lassen (Subsysteme)
- Komponenten, die sich nicht weiter zerlegen lassen (Systemelemente)
- Ablaufstruktur in den Komponenten
- Relationen, die Systemkomponenten miteinander verbinden (Aufbaustruktur)
- Zustände der Komponenten, die durch Zustandsgrößen beschrieben werden
- Zustandsübergänge der Komponenten

Ein System kann weiterhin durch komplizierte Systemstrukturen und hohe Komplexität des dynamischen Verhaltens geprägt sein [11]. Die Systemanalyse untersucht daher die Struktur und die Funktion von solchen Systemen beispielsweise anhand von Modellen [12]. Diese Modelle stellen dabei die zweckgebundene Abbildung von Systemen dar und entstehen als Ergebnis einer Modellbildung. Inwieweit beispielsweise die Komplexität des Systems reduziert wird bzw. wo die Systemgrenzen definiert werden, richtet sich nach dem Modellzweck. Bei einem Modell kann es sich um eine isomorphe oder homomorphe

Abbildung handeln. Bei einer isomorphen Abbildung steht jedem Systembestandteil eindeutig ein Modellbestandteil gegenüber und umgekehrt. Bei einer homomorphen Abbildung ist jedem Systembestandteil ein Modellbestandteil zugeordnet, jedoch nicht umgekehrt. Diese Form ist die häufigste in der Systemanalyse [12, S. 36].

Der Prozess der Systemanalyse lässt sich grob zusammengefasst in die Abschnitte Analyse und Abstraktion aufteilen. Bei der Analyse wird das System in seine Systemstrukturen aufgelöst und zergliedert, die Systemobjekte und Objektattribute bestimmt, zwischen internen und externen Aktivitäten und Ereignissen unterschieden, auf einzelne Merkmale hin untersucht sowie wichtige Kenngrößen und deren Zielorientierung untersucht. Bei dem Abschnitt Abstraktion werden Eigenschaften durch Idealisierung verallgemeinert, Gesetzmäßigkeiten abgeleitet, unbedeutende Größen vernachlässigt und die Systemkomplexität reduziert, indem auf verschiedenen Hierarchieebenen unterschiedliche Abstraktionsstufen Anwendung finden. [11] Somit werden in der Systemanalyse oft zueinander konkurrierende Ziele behandelt. Beispielsweise werden durch eine Vereinfachung in der Modellierung die Rechengeschwindigkeit und die Nachvollziehbarkeit erhöht jedoch die Genauigkeit verringert.

### 3. Methoden der Systemanalyse zur Energiewende

Es gibt zahlreiche Methoden, welche bei der allgemeinen Systemanalyse Anwendung finden, beispielsweise:

- Ishikawa
- Wirkdiagramme
- Intensitäts-Beziehungsmatrix
- Fehlerbaumanalyse
- Mind-Map
- Portfolio Analyse
- Relationsdiagramm
- Agentenbasierte Modellierung
- Multikriterielle Analyse
- Prozesskettenanalyse

In der Systemanalyse zur Energiewende hat sich insbesondere die Szenario-Analyse, welche im folgenden Kapitel detaillierter beschrieben wird, etabliert.

#### 3.1. Szenario-Analysen

Ein Szenario ist eine Darstellung einer möglichen zukünftigen Situation (Zukunftsbild), inklusive der Entwicklungspfade, die zu dieser Zukunft führen können [13, S. 10]. Zur theoretischen Einordnung siehe beispielsweise das Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) (2008) [13, S. 10]. Der Vorteil einer Szenario-Analyse – die Vielzahl von Entwicklungen, die berücksichtigt werden können – ist auch oft gleichzeitig deren Nachteil. Beispielsweise wird in der Szenario-Analyse der Szenario-Transfer oft nicht implementiert [13] bzw. aufgrund der Vielzahl an analysierten Entwicklungen können oft keine konkreten Handlungsempfehlungen genannt werden. Weitere Vor- und Nachteile der Szenario-Analyse sind Reger und Mietzner (2010) [14, S. 156 ff.] zu entnehmen.

Ein Energieszenario beschreibt, in Anlehnung an die Definition eines allgemeinen Szenarios, somit eine zukünftige Entwicklung bzw. einen zukünftigen Zustand eines Energiesystems. Bei Energieszenarien werden in der Regel keine Wahrscheinlichkeiten für die jeweiligen Entwicklungen angegeben [15]. Acatech (2015) nennt beispielsweise drei Anforderungen an solche Energieszenarien [15]: wissenschaftlich valide, transparent, ergebnisoffen.

Die zukünftigen Entwicklungen eines Energiesystems sollten dabei das energiepolitische Zieldreieck berücksichtigen. Dieses hat die Dimensionen [6, S. 5 ff.]:

- Versorgungssicherheit: jederzeit ausreichende, sichere und verlässlichen Zugang zu Energiequellen.

- Wirtschaftlichkeit: Energiewende nicht zum Nulltarif. Nicht nur Kosten sondern auch Vorteile sehen. Umsetzung der Energiewende Kostendynamik bremsen.
- Umweltverträglichkeit: Klima- und Umweltschutz sind Grundbedingungen einer zukünftigen Energieversorgung.

Insbesondere auf Seiten der Umweltverträglichkeit sind zahlreiche quantifizierte Ziele zu finden (siehe [6] S. 11 bzw. Kapitel 1). Abb. 1 zeigt beispielsweise einen Szenariotrichter für die Energiewende auf. Wie zu sehen, kann aus dem IST-Zustand ein Trendszenario für das Jahr 2050 entwickelt werden. Neben diesem Trendszenario lassen sich beliebig viele Szenarien (N-Szenarien) definieren und analysieren. Da für jedes dieser analysierten Szenarien, wie oben erwähnt, auch ein Szenario-Transfer entwickelt werden sollte, muss die Anzahl möglicher Entwicklungen auf sinnvolle Möglichkeiten reduziert werden. Dazu werden nachfolgend zwei Ansätze beispielhaft erläutert. Zum einen die Reduzierung der Komplexität, um sinnvolle Technologieentwicklungen vor der Szenario-Analyse zu identifizieren (vgl. Kapitel 0) und zum anderen die Berücksichtigung der Zeitachse (vgl. Kapitel 3.3). Diese Analyse ermöglicht den Beitrag der Technologie für das Zieljahr 2050 zu bemessen.

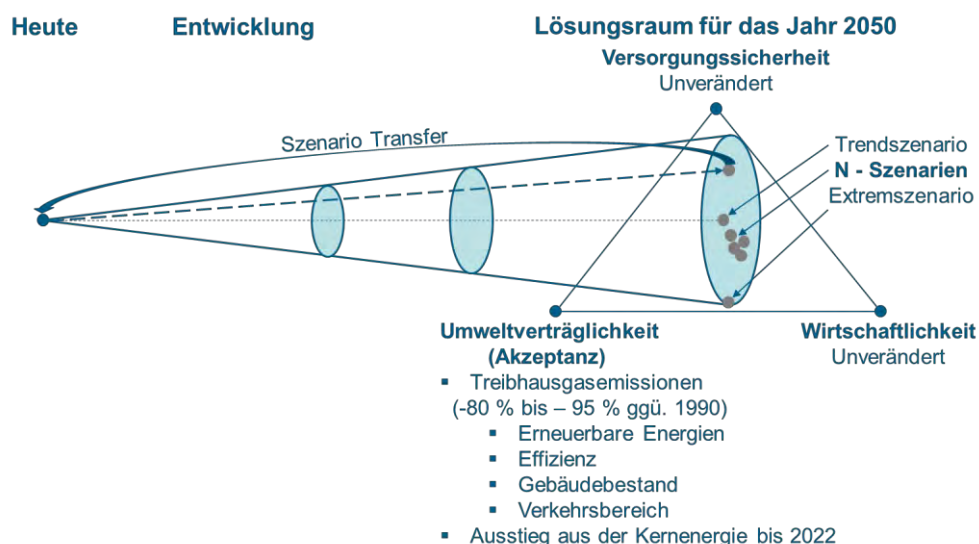


Abbildung 1: Szenariotrichter für die Energiewende, in Anlehnung an IZT (2008) [13, S. 40]

### 3.2. Reduzierung der Komplexität

In diesem Kapitel wird anhand von zwei Beispielen die Methodik der Reduzierung der Komplexität aufgezeigt. Diese ermöglicht es geeignete Technologien zu identifizieren, die in Modellen bzw. Szenarien berücksichtigt werden sollten.

#### 3.2.1. Beispiel 1: Stoffliche Nutzung von Braunkohle

In diesem Abschnitt wird ohne detaillierte Informationen über Investitionskosten und Energiebedarf der Technologien zur Braunkohlenutzung am Beispiel der Synthese von Methanol (MeOH) abgeschätzt, wie die stoffliche Nutzung von Braunkohle ökologisch und ökonomisch im Vergleich zu dem konventionellen Verfahren der Chemieindustrie zu bewerten ist, welches großtechnisch über die Reformierung von Erdgas erfolgt, vgl. Tabelle 2. Bei der Reaktion von Erdgas zu Methanol, entstehen aufgrund des gleichen H/C Verhältnis

(= 4) von Edukten und Produkten keine prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen, da der komplette Kohlenstoff des Erdgases im Produkt Methanol gebunden wird. Braunkohle hingegen weist ein H/C Verhältnis von ungefähr 0.8 auf. Dies hat zur Folge, dass nach der Braunkohlevergasung der Wasserstoffanteil im Synthesegas durch eine Wassergas Shift-Reaktion und anschließende CO<sub>2</sub>-Abtrennung erhöht werden muss. Damit werden bei der MeOH-Synthese über Braunkohle 2 tCO<sub>2</sub>/tMeOH prozessbedingt freigesetzt, Dies überschreitet bereits die gesamten Emissionen des konventionellen Prozesses (Referenz: Lurgi MegaMethanol Prozess), inklusive dessen Wärmebedarf und der Erdgas-Vorkette [16]. Aus ökonomischer Sicht hat die MeOH-Synthese über Braunkohle das Potential geringerer Herstellkosten. Diese betragen im konventionellen Prozess etwa 333 €/tMeOH, wobei das eingesetzte Erdgas 80 % der Kosten ausmacht. Bei der Braunkohlevergasung sind die Kosten der benötigten Braunkohle etwa 46 €/tMeOH. Obwohl noch Investitions- und Betriebskosten der Anlage aufgeschlagen werden müssen, ist die Differenz zum konventionellen Prozess hoch genug, um geringere Herstellkosten zu erwarten. Um die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Synthese von MeOH über Braunkohle komplett zu vermeiden, kann das H/C Verhältnis auch durch die externe Zugabe von Wasserstoff erhöht werden (siehe [17]). Durch diese Maßnahme besteht theoretisch das Potential die CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem konventionellen Prozess zu reduzieren. Da der Wasserstoff dafür jedoch aus regenerativen Quellen stammen muss, ist mit deutlich höheren Herstellkosten allein durch den Rohstoffeinsatz (H<sub>2</sub> und Kohle) zu rechnen. Es kann also am Beispiel der MeOH-Synthese gezeigt werden, dass die Nutzung von Braunkohle entweder zu höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen oder höheren Herstellkosten gegenüber dem konventionellen Prozess führt.

	Reaktionsbedingte CO <sub>2</sub> -Emissionen	Gesamte CO <sub>2</sub> -Emissionen	Herstellkosten
Konventionell: Erdgasreformierung zu MeOH $CH_4 + 0,5O_2 \rightarrow MeOH$	0,00 t <sub>CO2</sub> /t <sub>MeOH</sub>	<i>MegaMethanol</i> 0,51 t <sub>CO2</sub> /t <sub>MeOH</sub> <sup>[16]</sup> (Input: nur Erdgas $\eta = 63\%$ )	<i>MegaMethanol</i> 333 €/t <sub>MeOH</sub> <sup>[16]</sup>
Braunkohlevergasung zu MeOH $C_1H_{0,8}O_{0,16} + 0,52O_2 + 0,4H_2 \rightarrow 0,6CO_2 + 0,4CO + 0,8H_2 \rightarrow 0,4 MeOH + 0,6CO_2$	2,06 t <sub>CO2</sub> /t <sub>MeOH</sub> (bereits höher als konv. Prozess insgesamt)	keine CO <sub>2</sub> -Reduktion gegenüber konv. Prozess möglich	nur Kohle: 46 €/t <sub>MeOH</sub> <sup>a</sup>
Braunkohlevergasung zu MeOH unter Zugabe von H <sub>2</sub> aus EE $C_1H_{0,8}O_{0,16} + 0,42O_2 + 1,6H_2 \rightarrow 1CO + 2 H_2 \rightarrow MeOH$	0,00 t <sub>CO2</sub> /t <sub>MeOH</sub>	mit erneuerbarem H <sub>2</sub> CO <sub>2</sub> -Reduktion gegenüber konv. Prozess möglich	nur H <sub>2</sub> und Kohle: 446 €/t <sub>MeOH</sub> <sup>a,b</sup>
Preis Rohbraunkohle (rheinisches Revier): $\approx 15$ €/t [17] $\rightarrow$ trocken + aschefrei $\approx 38$ €/t Wasserstoffpreis: 4280 €/t <sub>H2</sub> (Zins: 8%, 3000 h, 500 €/kW <sub>el</sub> , $\eta = 70\%$ , 10 Jahre, 6 Cent/kWh)			

Tabelle 2: Abschätzung zur stofflichen Nutzung von Braunkohle am Beispiel der Methanolsynthese.

### 3.2.2. Beispiel 2: Prozesskettenanalyse Power-to-Gas

Power-to-gas (PtG) ist eine im Zusammenhang mit der der Energiewende vielfach diskutierte und inzwischen auch praktisch erprobte Technologie. Kerngedanke ist es, erneuerbaren Strom, der aufgrund von Netzengpässen oder fehlender Nachfrage nicht direkt genutzt werden kann, mithilfe der Elektrolyse in Wasserstoff umzuwandeln. Dieser Wasserstoff kann direkt genutzt beziehungsweise gespeichert oder mit CO<sub>2</sub> zu Methan weiterverarbeitet werden. Vorangegangene Analysen haben gezeigt, dass die direkte Wasserstoffnutzung als Kraftstoff

für den Straßenverkehr gegenüber der Einspeisung ins Gasnetz energetisch und wirtschaftlich vorteilhaft ist [18], [8]. Die wesentlichen Argumente hierfür liefern das vergleichsweise hohe Kostenniveau von Kraftstoffen gegenüber Erdgas sowie der Wirkungsgradvorteil von Brennstoffzellenfahrzeugen bei direktem Wasserstoffbetrieb gegenüber heutigen Pkw des Massenmarkts [18].

Abb.2 verdeutlicht dies anhand eines vereinfachten *Well-to-wheel* Vergleichs von Brennstoffzellen-Pkw (Fuel cell vehicle, FCV) im Direktwasserstoffbetrieb mit Verbrennungsmotor-Pkw auf Erdgasbasis (Internal combustion engine vehicle, ICV). Gemäß den dargestellten Werten kann, ausgehend von einer Strommenge von 100 kWh aus Windkraft und von spezifischen Stromkosten von 6 ct/kWh, eine Reichweite von knapp 200 km im Falle des FCV erzielt werden. Im Falle des ICV sind aufgrund des zusätzlichen Umwandlungsschrittes zur Methanherzeugung sowie des geringeren Antriebswirkungsgrads nur etwas mehr als die Hälfte dessen möglich. Die spezifischen Kraftstoffkosten sind für den FCV etwa halb so hoch, verglichen mit dem ICV.

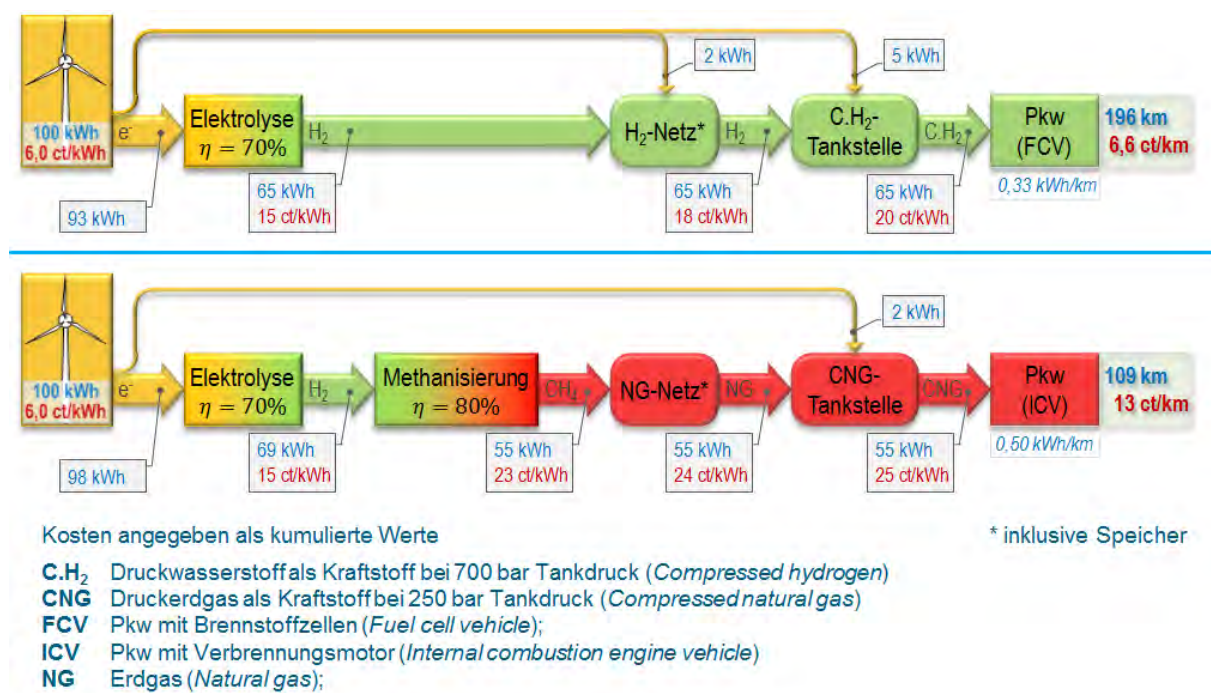


Abbildung 2: Prozesskettenanalyse der Power-to-Gas Kraftstoffoptionen Wasserstoff und Erdgas (Methan) [19]

Diese Analyse zeigt, dass bereits mithilfe von einfachen, für heute gültigen Zahlen unter Nutzung der Methodik der *Well-to-wheel* Bilanzierung Vor- und Nachteile neuer Technologieansätze aufgezeigt werden können. Unter der Voraussetzung, dass auch zukünftig die anlegbaren Kosten im Kraftstoffmarkt höher sind als im Gasmarkt und dass FCV einen ungefähr halbierten Kraftstoffbedarf gegenüber ICV aufweisen, könnten die genannten Vorteile der Nutzung von PtG-Wasserstoff gegenüber PtG-Methan bestehen bleiben.

### 3.3. Berücksichtigung der Zeitachse

Eines der wesentlichen Ziele der Bundesregierung ist die Reduzierung der Treibhausgasemissionen für das Jahr 2050 um mindestens 80 bis 95 % gegenüber 1990. Abbildung 1 berücksichtigt die Zeitachse zur Erreichung dieser Ziele. Damit das Ziel im Jahr 2050 erreicht wird, müssen die entsprechenden Technologien in diesem Jahr einen sehr hohen Marktanteil



aufweisen. Somit muss spätestens im Jahr 2040 mit dem Start der Marktdurchdringung begonnen werden. Dafür muss die Industrie geeignete Technologien zur Serienreife bringen, wofür optimistische 10 Jahre angenommen werden. Daher kann die Forschung bis zum Jahr 2030 geeignete Technologien weiterentwickeln, welche einen Technology Readiness Level (TRL) von mindestens 4 aufweisen. Robinius und Stolten (2015) analysieren daher beispielhaft zur Potentialermittlung der Windenergie an Land nur solche Anlagenkonzepte, die bestehende Technologien berücksichtigen [20, S. 5]. Dies heißt nicht, dass Forschung mit einem niedrigeren TRL nicht sinnvoll wäre, sie trägt nur nicht zum Erreichen der 2050er Ziele bei.

- **2050:** Reduktion um 80 % komplett erreicht
- **2040:** Start der Marktdurchdringung
- **2030:** Fertigstellung der Forschung für Technologien der 1. Generation

**Entwicklungsperiode:** bis 2040

**Forschungsperiode:** bis 2030

⇒ 16 Jahre für weitere Forschung ⇒

TRL\* 5 und höher

TRL 4 mindestens

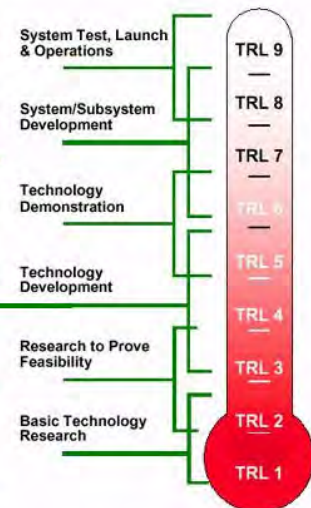


Abbildung 3: Zeitachse der Forschung und Entwicklung zur Erreichung der Klimaziele im Jahr 2050 (\*TRL: Technology Readiness Level)

#### 4. Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Systemanalyse zur Energiewende hat zahlreiche Herausforderungen durch in Konkurrenz zueinander stehender Ziele zu bewältigen. Das energiepolitische Zieldreieck reduziert den Lösungsraum für das Jahr 2050, dennoch sind zahlreiche potentielle Optionen denkbar. Fundamentale Veränderungen erfordern technologieneutralen Blick in die Zukunft. Die potentiellen Optionen lassen sich oft durch einfache bilanzielle Thermodynamik-basierte Ansätze und durch die Analyse des zeitlichen Beitrags der Technologie bewerten und einordnen. Dabei sollte die Komplexität reduziert werden wo möglich und nur dort erhöht werden wo nötig. Weiterhin sollten Methoden nach der Art der zu beantwortenden Frage gewählt werden und die Modellierung nicht zum Selbstzweck angewandt werden.

#### Literatur

- [1] UNITED NATIONS. *Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009*. 2009 02.02.2015]; Available from: <http://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf>.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *UN-Klimakonferenzen*. 2013 02.02.2015]; Available from: <http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/un-klimakonferenzen/ergebnisse-der-un-klimakonferenzen/>.
- [3] United Nations. *ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Proposal by the President*. 2015 21.03.2016]; Available from: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.

- [4] Bundesministerium für Umwelt, N.u.R. *Klimaschützer schreiben Geschichte*. 2015 21.03.2016]; Available from: [http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/klimaschuetzer-schreiben-geschichte/?tx\\_ttnews\[backPid\]=4141&cHash=ab8898c3963d70df00fa01986a83bf03](http://www.bmub.bund.de/presse/pressemitteilungen/pm/artikel/klimaschuetzer-schreiben-geschichte/?tx_ttnews[backPid]=4141&cHash=ab8898c3963d70df00fa01986a83bf03).
- [5] Umweltbundesamt. *Ziele der Energiewende*. 2014 02.02.2015]; Available from: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/ziele-der-energiewende>.
- [6] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, *Zweiter Monitoring-Bericht "Energie der Zukunft"*. 2014.
- [7] *Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Von der Stromwende zur Energiewende*. 64, 2014. 5: p. 32-36.
- [8] Robinius, M., *Strom- und Gasmärktedesign zur Versorgung des deutschen Straßenverkehrs mit Wasserstoff*, in *RWTH Aachen University*. 2015: Forschungszentrum Jülich GmbH Zentralbibliothek, Verlag. p. 255.
- [9] Hügli, A., et al., *Philosophielexikon: Personen und Begriffe der abendländischen Philosophie von der Antike bis zur Gegenwart*. 2013: Rowohlt E-Book.
- [10] Sedlacek, K.D., *Emergenz: Strukturen der Selbstorganisation in Natur und Technik*. 2013: Books on Demand.
- [11] Wiedemann, T., *Systemanalyse bei der Entwicklung von Simulationsmodellen*. 2014.
- [12] Schwefel, H.-P., *Systemanalyse - Epistemologische Grundlagen*. 2004.
- [13] Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, *Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse - Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien*. 2008.
- [14] Reger, P.D.G. and D. Mietzner, *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen: Methodenevaluation und neue Ansätze*. 2010: Gabler Verlag.
- [15] acatech, *Mit Energieszenarien gut beraten - Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung*. 2015.
- [16] Otto, A., *Chemische, verfahrenstechnische und ökonomische Bewertung von Kohlendioxid als Rohstoff in der chemischen Industrie*. 2015: Forschungszentrum Jülich GmbH, Energie & Umwelt 268.
- [17] *Abschlussbericht der Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren (Enquetekommission II)*. 2015, Der Landtag NRW Enquetekommission.
- [18] Schiebahn, S., et al., *Power to gas: Technological overview, systems analysis and economic assessment for a case study in Germany*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015. 40(12): p. 4285-4294.
- [19] Grube, T. *Die Rolle elektrochemischer Wandler und Speicher in der Energiewende*. in *FGE-Kolloquium*. 2014. Aachen.
- [20] Robinius, M. and D. Stolten, *Power-to-Gas: Quantifizierung lokaler Stromüberschüsse in Deutschland anhand unterschiedlicher Windenergie-Ausbaustufen*, in *9. Internationale Energiewirtschaftstagung 2015*: Wien.

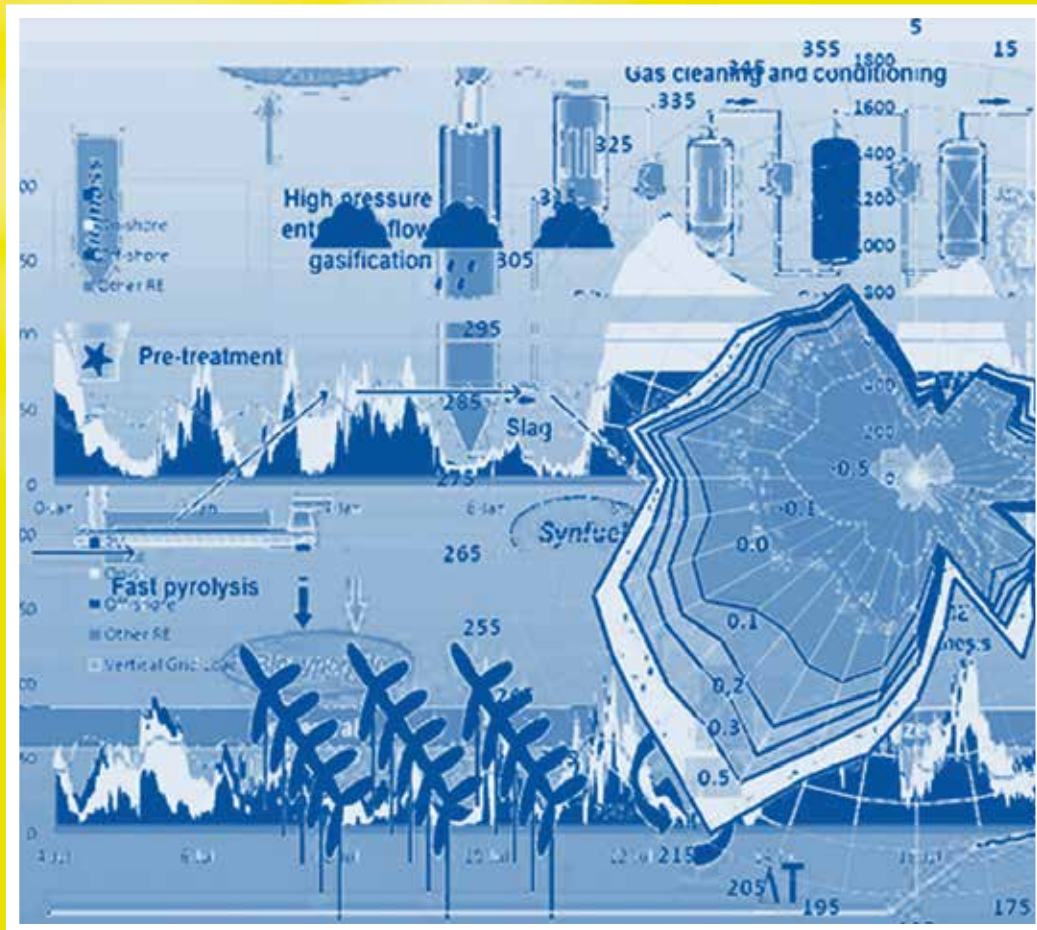
Dr. Martin Robinius<sup>1</sup> (+49 2461 61 3077, E-Mail: [m.robinius@fz-juelich.de](mailto:m.robinius@fz-juelich.de)), Dr. Thomas Grube<sup>1</sup>, Dr. Sebastian Schiebahn<sup>1</sup>, Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institut für elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3), Forschungszentrum Jülich GmbH, Wilhelm-Johnen-Str., D-52428 Jülich

<sup>2</sup> RWTH Aachen Universität, Lehrstuhl für Brennstoffzellen, Fakultät für Maschinenwesen, D-52056 Aachen

**Keywords:** Szenarien, Systemanalyse, Methodik, Energiewende





## Energie

### Forschung und Perspektiven

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung  
Regensburg 2016

Herausgegeben von Hardo Bruhns

# Energie

## Forschung und Perspektiven

Vorträge auf der DPG-Frühjahrstagung in Regensburg 2016

Arbeitskreis Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Herausgegeben von Hardo Bruhns

Bad Honnef, August 2016

# Frühjahrstagung des Arbeitskreises Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Regensburg, 6. bis 9. März 2016

## Haupt- und Fachvorträge

### Inhaltsverzeichnis / Table of Contents

Introduction	7
Fachsitzungen / Sessions	8
Abstracts	9
Globale Klimavariabilität im Industriezeitalter – Phänomene und Ursachen - vorgetragen von Ch. Schönwiese	23
The 2°C climate policy goal: Chances & Challenges - presented by H. Held	35
The reactor accident of Fukushima Dai-ichi and its radiological consequences for the Japanese population - presented by R. Michel	53
Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells - presented by St. Albrecht	69
Processes for Advanced Fuel Production from Biomass - presented by J. Sauer	83
Methodische Aspekte der Systemanalyse zur Energiewende - vorgetragen von M. Robinius	95

Wasserstoff als Energieträger: Eine Systemanalyse - vorgetragen von S. Schiebahn	103
Offshore Wind Energy - Chances, Challenges, and Impact from a Meteorological Point of View - presented by S. Emeis	113
Wärmepumpe oder KWK – was passt zur Wärmewende? - vorgetragen von G. Luther	123
Impressum	140

Der vorliegende Band versammelt schriftliche Ausarbeitungen von Vorträgen auf der Tagung des Arbeitskreises Energie in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft des Jahres 2016 in den Räumen der Universität Regensburg. Leider ist es nicht gelungen, von allen Vortragenden Manuskripte zu erhalten. Die Präsentationsfolien der meisten Hauptvorträge können auf der Webseite des Arbeitskreises über:

<http://www.dpg-physik.de/dpg/organisation/fachlich/ake.html>

(von dort gelangt man zum Archiv des AKE) eingesehen werden. Allen, die zu diesem Sammelband beigetragen haben, sei an dieser Stelle sehr herzlich gedankt.

Düsseldorf, im August 2016

Hardo Bruhns