

Lösungspfade aus der Systemforschung – Pfade für das Gesamtsystem und Modellierungsansätze



DLR
Dr. Sonja Simon
sonja.simon@dlr.de

Dr. Thomas Pregger
thomas.pregger@dlr.de

Fraunhofer ISE
Dr. Thomas Schlegl
thomas.schlegl@ise.fraunhofer.de

Dr. Christoph Kost
christoph.kost@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich
Dr. Martin Robinius
m.robinius@fz-juelich.de

Dr. Peter Markewitz
p.markewitz@fz-juelich.de

UFZ
Prof. Dr. Daniela Thrän
daniela.thraen@ufz.de

Dr. Markus Millinger
markus.millinger@ufz.de

WI
Dr. Peter Viebahn
peter.viebahn@wupperinst.org

1. Einleitung

Ziel der Energiesystemanalyse ist es, technische, ökonomische und politische Entscheidungen im Energiesystem wissens- und informationsbasiert zu unterstützen. Die Energiesystemanalyse beschäftigt sich mit der künftigen Gestaltung des Energiesystems und nutzt Detailinformationen aus allen Bereichen des Energiesystems, um Zusammenhänge und Wechselwirkungen zu analysieren. Mit Hilfe von meist komplexen Modellen werden diese Zusammenhänge quantifiziert und gegenläufige Abhängigkeiten (trade-offs), aber auch win-win-Situationen identifiziert. Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, das Energiesystem über die Summe aller Einzelperspektiven hinaus zu verbessern und mögliche Transformationspfade aufzuzeigen.

Ein thematischer Schwerpunkt der deutschen Energiesystemanalyse ist die Energiewende. Im Fokus stehen mittel- bis langfristige Transformationspfade des Energiesystems. Wie die Herausforderungen dieser Transformation aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet werden, stellt der folgende Beitrag vor. Neben einem Überblick der aktuell verwendeten und entwickelten Methoden werden einige Transformationsstrategien beleuchtet, die geeignet sind, diese Herausforderungen zu bewältigen.

2. Perspektiven auf die Transformationspfade

Seit langem liegt der Fokus der Systemanalyse auf der techno-ökonomischen Optimierung des Energiesystems: eine Reihe von Modellen optimiert hinsichtlich der volkswirtschaftlich kostengünstigsten Optionen und Technologiekombinationen einer künftigen Energieversorgung. Die Erreichung gesetzter Ziele der Transformation steht hier im Vordergrund, wie z.B. eines vorgegebenen Anteils an erneuerbaren Energien oder Treibhausgasminderungsziele.

Die Modelle REMix (Gils, Scholz et al. 2017), Fine-NESTOR (Lopion, Markewitz et al. 2019) oder REMod (Palzer, Kost et al. 2018, Sterchele, Henning et al. 2019) setzen unterschiedliche Schwerpunkte. Kontinuierlich wurden und werden sie verbessert: Eine feinere technologische Auflösung ermöglicht, die unterschiedlichen Charakteristika v.a. der neu hinzukommenden Energietechnologien abzubilden

(z.B. fluktuierende Erneuerbare, flexible Stromerzeuger, Speichertechnologien und Elektromobilität). Außerdem wird eine Verbesserung der Modelle durch Abbildung zusätzlicher Restriktionen und eine höhere räumliche und zeitliche Auflösung angestrebt. Auch erhöhen sich die Anforderungen an die Zielgenauigkeit der Optimierung gegenüber realen Entwicklungen, z.B. durch Berücksichtigung von Unsicherheiten oder die Bewertung der Erreichbarkeit errechneter Energieszenarien.

Beides erhöht die Komplexität der Modellierung, die damit an physische Grenzen der Berechenbarkeit auf üblichen Computern stößt, auf welchen in langwierigen Modellläufen wenige Szenarien errechnet werden. Daher werden derzeit alternative Berechnungsansätze und Beschleunigungsverfahren entwickelt (Parallelisierung, Hochleistungsrechner), die eine schnellere Berechnung einer Vielzahl von Szenarien über einen breiten Parameterraum ermöglichen (Breuer, Bussieck et al. 2019).

Darüber hinaus werden bereits bestehende Modelle gekoppelt und integrierte Modellierungsansätze verstärkt. Dadurch können weitere gesellschaftliche Perspektiven auf die Energiewende betrachtet werden, z.B. ökologische Wirkungen, Akzeptanz oder der Nutzen auf der Ebene von Verbrauchern und Anlagenbetreibern.

Simulationsmodelle untersuchen die Wirkung politischer Maßnahmen auf Märkte und Stakeholder. Das Modell Inve2st (Senkpiel und Berneiser 2019) analysiert die explorative Technologiediffusion innerhalb des Energiesystems und überprüft so die Machbarkeit von Szenarien.

Mit dem agentenbasierten Modell AMIRIS (Deissenroth, Klein et al. 2017) wird z.B. überprüft, wieweit die betriebswirtschaftlich agierenden Akteure im Energiesystem tatsächlich von den volkswirtschaftlich kostenoptimalen Entscheidungen abweichen. Im Sinne der Perspektivenerweiterung nimmt auch die Akzeptanzforschung einen immer größeren Raum in der Energiesystemanalyse ein. Ein Ansatz hier ist die Identifizierung von sozialen Auswirkungen auf lokale Stakeholder sowie die partizipative Bewertung dieser Auswirkungen (Terrapon-Pfaff, Fink et al. 2019) oder die multikriterielle Bewertung von Energieszenarien durch Stakeholder zur Erhöhung der Akzeptanz in der Umsetzung (Zelt, Krüger et al. 2019).

Neben dem globalen Fokus auf CO₂ ist es aber auch Aufgabe der Energiesystemanalyse, ökologische Wirkungen in ihrer Breite zu beleuchten. Denn es ist klar, dass der Umstieg auf erneuerbare Energien zwar vom Verbrauch an fossilen Energieträgern wegführt, gleichzeitig aber mit einer höheren Anlagenzahl und damit einem höheren Materialbedarf einhergeht. Insbesondere der neue Speichersektor führt zu zusätzlichen Umweltwirkungen, die quantifiziert und Verbesserungen in anderen Sektoren gegenüber gestellt werden müssen. Eine methodische Herausforderung ist dabei, die einzelnen Lebenszyklusanalysen für Bewertungen von Gesamtenergiesystemen zu ertüchtigen und viele Dimensionen konsistent abzubilden. Ein Beispiel dafür ist die Kopplung bestehender LCA-Datenbanken mithilfe von OpenLCA mit dem Energiesystemmodell Mesap (Junne, Simon et al. 2019).

Eine künftige Herausforderung ist es, die verschiedenen gesellschaftlichen Optionen gemeinsam zu bewerten. Die Quantifizierung aller Dimensionen wird derzeit durch die Weiterentwicklung und Kopplung der verschiedenen Modelle angestrebt. Künftig werden Methoden der multikriteriellen Bewertung und der multikriteriellen Optimierung hinzukommen, welche die gesellschaftliche Gesamtperspektive abbilden (Junne, Haas et al. 2019). Die Herausforderung liegt hier insbesondere in der Wertung verschiedener Dimensionen zueinander, die eine noch stärkere Integration sozialwissenschaftlicher Methoden und die Übertragung der Ergebnisse in die klassischen Modelle voraussetzt.

3. Technologische Strategien in Energieszenarien für Deutschland

Der methodische Überblick zeigt bereits die Fülle und Bandbreite der von der Energiesystemanalyse adressierten Fragen. Das Folgende konzentriert sich auf Modellierungsergebnisse, die miteinander korrespondieren: Sehr ambitionierte Klimaziele und verschiedene Transformationsoptionen im Verkehrssektor.

3.1 Klimaziel CO₂-Reduktion: vom 80%- zum 95%-Ziel (1.5 °C)

Die Erkenntnis, dass für die Einhaltung des 1.5 °C Ziels bis zur Mitte des Jahrhunderts das Energiesystem seine Klimaemissionen auf Null zurückführen muss, hat in den vergangenen fünf Jahren zu einer Reihe sehr ambitionierter Szenarien geführt, welche Treibhausgase bis zu 95% reduzieren. Ein zentraler Ansatzpunkt der Szenarien bleiben Effizienzmaßnahmen, welche die technischen Verbrauchsreduktionspotenziale heben und als Schlüssel für ein Gelingen der Energiewende darstellen.

► **Abbildung 1** zeigt, welche Potenziale in diesem Bereich noch gehoben werden können und müssen, um die Vereinbarung des Pariser Klimaabkommens einzuhalten. Eine gegenüber Unsicherheiten robuste Maßnahme, die bekanntermaßen auch bei ambitionierteren Szenarien greift, ist hier die energetische Sanierung von Gebäuden (Palzer, Kost et al. 2018, Sterchele, Henning et al. 2019).

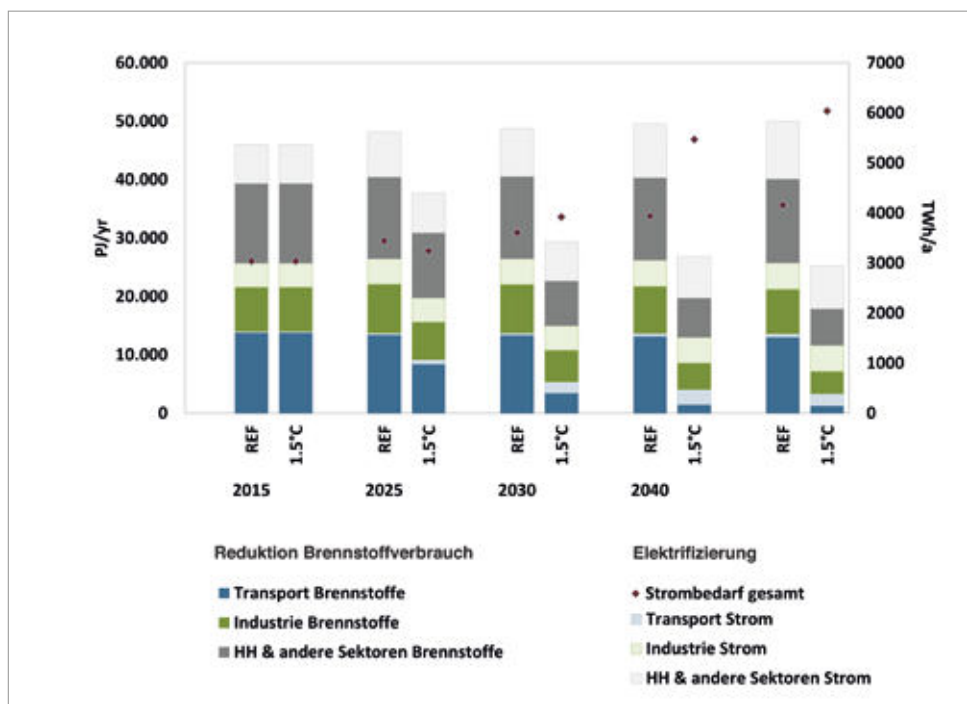


Abbildung 1
Nötige Reduktion des Endenergiebedarfs und Elektrifizierung in Europa zur Erreichung der Pariser Klima-Ziele
 (Teske, Pregger et al. 2019)

Der zweite wichtige Ansatzpunkt ambitionierter Klimaschutz-Szenarien ist die Elektrifizierung auf Basis erneuerbarer Energien.

- Aus den beschriebenen Modellierungen fließt die Erkenntnis, dass immer ambitioniertere Ziele zur Integration erneuerbarer Energien die Komplexität der Wechselwirkungen im Energiesystem erhöhen und die Optimierungsergebnisse stark durch eine Verschärfung von Klimazielen beeinflusst werden.
- Für Deutschland zeigen Optionen flexibler Sektorenkopplung (z.B: Elektrolyseure zur Erzeugung von H₂) unter diesen Rahmenbedingung positive Wechselwirkungen und gewinnen stark an Bedeutung (Gils und Gardian 2019).
- Im Bereich der Biomasse wird durch ambitioniertere Klimaziele eine Verschiebung ihres Einsatzes von der Wärme hin zum Verkehr deutlich – insbesondere unter Einbindung elektrischer Energie zur Bereitstellung von Strom/Biomasse-basierten Kraftstoffen (Thrän, Lauer et al. 2019).
- Als robust gegenüber sich verändernden Klimazielen zeigen sich jedoch Wärmepumpen und Wärmenetze, die in Verbindung mit Wärmespeichern günstige Sektorenkopplung gewährleisten (Palzer, Kost et al. 2018, Gils und Gardian 2019, Sterchele, Henning et al. 2019).

3.2 Energiebereitstellung für den Verkehr

Der Verkehr und die Bereitstellung klimaneutraler Kraftstoffe – auch zur Speicherung von Strom aus erneuerbaren Quellen – stellen innerhalb der Szenarien Schlüsseltechnologien für >95% CO₂-Vermeidung dar. Dabei gilt: eine geringe direkte Elektrifizierung der Nutzenergie wird mit einem Vielfachen an benötigter Leistung zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe „bezahlt“. Soll die Energieversorgung

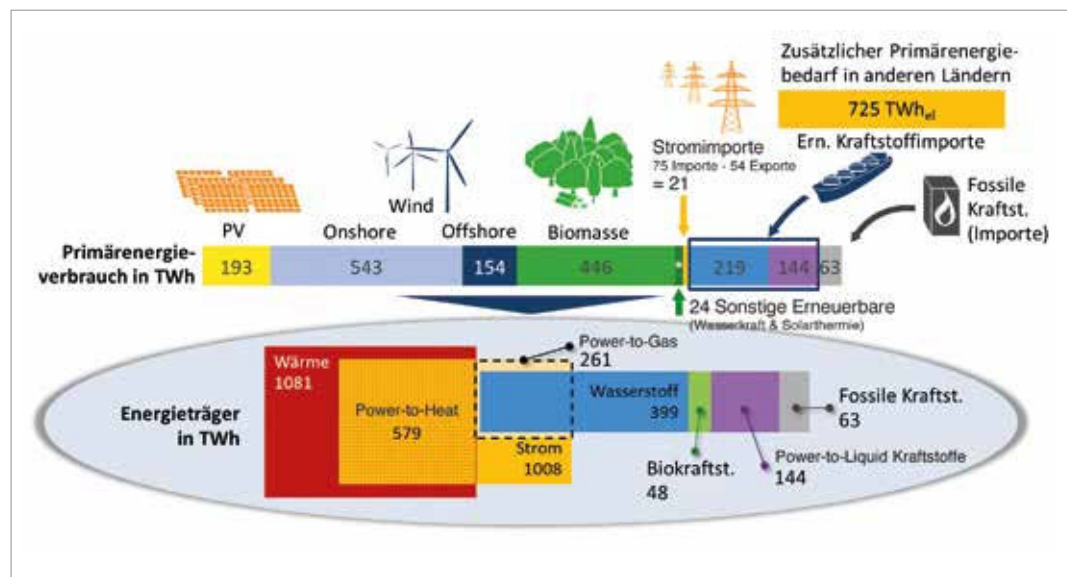
komplett auf Basis erneuerbarer Energien bereitgestellt werden, so werden erhebliche Anteile an strombasierten Kraftstoffen importiert werden müssen (▶ vgl. *Abbildung 2*). Wo und mit welchen Auswirkungen deren Erzeugung erfolgen kann – etwa in Nordafrika und dem Nahen Osten – wird derzeit unter anderem im Projekt MENA-Fuels vertieft untersucht (Wuppertal Institut 2019). Darüber hinaus ist der globale Handel und der Import von Wasserstoff, synthetischen Kraftstoffen und synthetischen Gasen Gegenstand von weiteren Forschungsarbeiten (Heuser et al. 2019).

4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Diese Übersicht über aktuelle Methoden und Ergebnisse zeigt, wie die Fragestellungen in der Energiesystemanalyse immer komplexer und kleinteiliger werden. Eine verstärkte Integration simulierender und optimierender Modelle ist unabdingbar, ebenso wie eine Erweiterung der techno-ökonomischen Perspektive auf ökologische, soziale und Akzeptanzaspekte. In allen Forschungseinrichtungen wird dies derzeit mit unterschiedlichen Schwerpunkten vorangetrieben.

Dabei bearbeitet die Energiesystemanalyse zunehmend Fragestellungen für CO₂-Reduktion weit jenseits der heute anvisierten 80%. Damit adressiert sie heute die Herausforderungen der Zukunft, wenn zur Einhaltung der Pariser Klimaziele eine komplette CO₂-Vermeidung im Energiesystem notwendig wird. Die internationale Perspektive ist elementar, weil neue Energiekooperationen die alten Importabhängigkeiten ablösen müssen, um eine vollständige Transformation zu ermöglichen.

Abbildung 2
Beispiel einer Energieversorgung für Deutschland im Jahr 2050 mit 95% reduziertem CO₂-Ausstoß:
 Für eine komplett erneuerbare Energieversorgung würden erhebliche Mengen strombasierter Kraftstoffe importiert werden müssen.
 (Robinius, Markewitz et al. 2019)



Die Energiewende ist heute technisch machbar. Eine Vielzahl von Technologieoptionen steht bereits zur Verfügung oder wird mit Hochdruck entwickelt. Aktuell bestehen die Herausforderungen für die Energiewende vor allem auf gesellschaftlicher Ebene, wobei Akzeptanz sowie die Bewertung sozialer und ökologischer Auswirkungen eine wichtige Rolle spielen. Auch die Verbindung von energiepolitischen und klimapolitischen Herausforderungen – wie sie beispielsweise bei der Entnahme von CO₂ aus der Atmosphäre bestehen – sind bisher in den Energieszenarien nicht beachtet (Klepper und Thrän 2019). Die zentrale Herausforderung für die Gesellschaft ist, diese verschiedenen Aspekte in eine Gesamtbewertung zu integrieren. Für die Energiesystemanalyse bedeutet das, die Indikatoren zu erweitern und neue Methoden wie Multicriteria decision analysis (MCDA) und die Modellierung sozialer Impacts zu entwickeln bzw. zu kombinieren und mit einer partizipativen Bewertung von Energieszenarien zusammen mit Stakeholdern den Weg für eine breite gesellschaftliche Unterstützung zu bereiten.

Für die Forschenden in der Systemanalyse ist daher die wichtigste Herausforderung, die immer komplexeren Zusammenhänge in verständliche Botschaften zu übersetzen, damit Entscheidungstragende und Bevölkerung die Lösungen verstehen, akzeptieren, abwägen und schließlich auch anwenden können.

5. Quellen

- Breuer, T., M. Bussieck, F. Fiand, K.-K. Cao, H. C. Gils, M. Wetzel, A. Gleixner, T. Koch, D. Rehfeldt und D. Khabi (2019). „BEAM-ME – Ein interdisziplinärer Beitrag zur Erreichung der Klimaziele“ OR news : das Magazin der GOR(66): 6–8.
- Deissenroth, M., M. Klein, K. Nienhaus und M. Reeg (2017). „Assessing the Plurality of Actors and Policy Interactions: Agent-Based Modelling of Renewable Energy Market Integration“ Complexity. 2017: 24.
- Gils, H. C. und H. Gardian (2019). Integrated modelling of the future electricity and gas supply in Germany. 5th International Conference on Smart Energy Systems,. Copenhagen, 10–11 September 2019.
- Gils, H. C., Y. Scholz, T. Pregger, D. Luca de Tena und D. Heide (2017). „Integrated modelling of variable renewable energy-based power supply in Europe.“ Energy 123: 173–188.
- Junne, T., J. Haas, J. Wang, S. Moreno, T. Naegler, J. Buchgeister und W. Nowak (2019). Considering Ecological Sustainability in Planning the Future Electricity Supply of Chile – How Much More Does it Cost? . IRES 2019. Düsseldorf, Deutschland.
- Junne, T., S. Simon, J. Buchgeister, M. Saiger und T. Naegler (2019). Integrating future background scenarios for prospective LCA – method and case study on the German energy system. SETAC Europe 29th Annual Meeting. Helsinki, Finland.
- Klepper, G. und D. Thrän, Eds. (2019). Biomasse im Spannungsfeld zwischen Energie- und Klimapolitik. Potenziale – Technologien – Zielkonflikte. Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft. München.
- Lopion, P., P. Markewitz, D. Stolten und M. Robinius (2019). „Cost Uncertainties in Energy System Optimisation Models: A Quadratic Programming Approach for Avoiding Penny Switching Effects.“ Energies 12(20).
- Palzer, A., C. Kost und P. Sterchele (2018). Rechtliche Rahmenbedingungen für ein integriertes Energiekonzept 2050 und die Einbindung von EE-Kraftstoffen. Berlin.
- Robinius, M., P. Markewitz, P. Lopion und et al. (2019). Kosteneffiziente und klimagerechte Transformationsstrategien für das deutsche Energiesystem bis zum Jahr 2050, Forschungszentrum Jülich GmbH.
- Senkpiel, C. und J. Berneiser (2019). Simulating the adoption of electric vehicles under consideration of person-related variables. Social simulation for Policy. Mainz, Deutschland. .
- Sterchele, P., H.-M. Henning und A. Weidlich (2019). Analysis of Technology Options to Balance Power Generation from Variable Renewable Energy. Freiburg, Fraunhofer ISE.
- Terrapon-Pfaff, J., T. Fink, P. Viebahn und E. M. Jamea (2019). „Social impacts of large-scale solar thermal power plants: Assessment results for the NOORO I power plant in Morocco.“ Renewable and Sustainable Energy Reviews 113: 109259.
- Teske, S., T. Pregger, T. Naegler, S. Simon, J. Pagenkopf, B. van den Adel und Ö. Deniz (2019). Energy Scenario Results. Achieving the Paris Climate Agreement Goals: Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C. S. Teske. Cham, Springer International Publishing: 175–401.
- Thrän, D., M. Lauer, M. Dotzauer, J. Kalcher, K. Oehmichen, S. Majer, M. Millinger und M. Jordan (2019). Technoökonomische Analyse und Transformationspfade des energetischen Biomassepotentials (TATBIO), DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, UFZ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.
- Wuppertal Institut. (2019). „MENA-Fuels – Roadmaps zur Erzeugung nachhaltiger synthetischer Kraftstoffe im MENA-Raum zur Dekarbonisierung des Verkehrs in Deutschland.“ Retrieved 21.10.2019, von <http://www.wupperinst.org/Mena-Fuels/>
- Zelt, O., C. Krüger, M. Blohm, S. Bohm und S. J. E. Far (2019). „Long-term electricity scenarios for the MENA region: assessing the preferences of local stakeholders using multi-criteria analyses.“ Energies 12(16): 3046.