

# Transformationsszenarien für das deutsche Energiesystem



**DLR**  
Dr. Tobias Naegler  
tobias.naegler@dlr.de

**DBFZ**  
Dr. Nora Szarka  
nora.szarka@dbfz.de

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

**ISFH**  
Prof. Dr. Rolf Brendel  
rolf.brendel@isfh.de

Dr. Raphael Niepelt  
niepelt@isfh.de

**UFZ**  
Dr. Franziska Taubert  
franziska.taubert@ufz.de

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

## Die Rolle von Szenarien für die Transformation des Energiesystems

Szenarien spielten und spielen eine zentrale Rolle für die Gestaltung der Energiewende. Sie beschreiben dabei auf konsistente Weise die mögliche zukünftige Entwicklung des Systems unter bestmöglicher Berücksichtigung des aktuellen Wissens bezüglich des Systems, d. h. der internen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der Systemkomponenten, aber auch die Abhängigkeit der Systementwicklung von äußeren Faktoren. Damit liefern Szenarien Leitplanken für zentrale technisch-strukturelle, energiepolitische, ökonomische und gesellschaftliche Weichenstellungen, die einen zielgerichteten Transformationsprozess flankieren müssen.

Diesem Verständnis nach treffen Szenarien weder Aussagen über die *Wahrscheinlichkeit*, mit der die skizzierte Entwicklung des Systems eintritt, noch über die *Wünschbarkeit* der dargestellten Zukunft. Ein Sonderfall von Szenarien sind normative Szenarien (Zielszenarien), die mögliche Wege beschreiben, wie bestimmte gesellschaftlich festgelegte Ziele erreicht werden können, welche Maßnahmen hierzu ergriffen werden müssen und welche technischen, ökonomischen und ökologischen Konsequenzen der dargestellte Pfad nach sich zieht.

Das Energiesystem, dessen Transformation in Szenarien beschrieben wird, ist ein komplexes System, das durch technische, ökonomische und gesellschaftliche Faktoren charakterisiert werden muss, die auf komplexe Art und Weise miteinander wechselwirken. Konsequenterweise werden gesellschaftliche Faktoren, die den Transformationsprozess bedingen, hemmen oder fördern, in jüngster Zeit zunehmend in Szenarien berücksichtigt.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass es vielfältige mögliche Transformationspfade gibt, die (weitgehend) konform mit den Zielen der Energiewende sind. Dabei können verschiedene Szenarien deutlich unterschiedliche technische Wege einschlagen, um die Ziele zu erreichen. Die unterschiedlichen technischen Entwicklungspfade spiegeln dabei einerseits Unwissenheit bzgl. der zukünftigen Entwicklung verschiedenster treibender und hemmender Faktoren wider (wie z. B. der Entwicklung der Brennstoff- und Technologiekosten, dem Eintritt der Marktreife neuer

Technologien etc., der Akzeptanz verschiedenster Technologien etc.). Andererseits spielen auch unterschiedliche Präferenzen der Auftraggeber oder der Autoren von Studien dort eine Rolle, wo Unsicherheiten bzgl. zukünftiger Entwicklungen unter Berücksichtigung des heute verfügbaren Wissens einen Ermessensspielraum belassen.

## Nationale und internationale Zielvorgaben für die Transformation des Energiesystems in Deutschland

Die Ziele für den Transformationsprozess in Deutschland ergeben sich maßgeblich aus den Zielen, wie sie im Energiekonzept der Bundesregierung (2010) gesetzt wurden. Neben den übergeordneten Zielen einer „bezahlbaren, zuverlässigen und umweltschonenden Energieversorgung“ sind dort quantitative Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien (EE), die Reduktion der Treibhausgas-(THG)-Emissionen, Energieeffizienz, Elektromobilität etc. bis 2050 definiert.

Weitere, oft detailliertere, aber kurzfristigere Ziele auf nationaler Ebene finden sich z. B. im „Gesetz für den Ausbau Erneuerbarer Energien“ (EEG), im „Gesetz zur Förderung Erneuerbarer Energien im Wärmebereich“ (EEWärmeG), im Atomgesetz etc.

Seitens der EU liegen verbindliche Ziele für den nationalen EE-Ausbau aus der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (2009) vor, die zumindest teilweise in das Energiekonzept mit eingeflossen sind. Auf der UN-Klimakonferenz in Paris („COP 21“) hat sich die EU zudem international verpflichtet, ihre THG-Emissionen bis 2030 um 40% zu reduzieren. Derzeit werden innerhalb der EU Vorschläge diskutiert, wie das EU-Ziel auf einzelne Sektoren und Mitgliedstaaten heruntergebrochen werden kann. Konkret sollen Emissionen derjenigen Sektoren, die am Europäischen Emissionshandel (ETS) teilnehmen, europaweit um 43% gegenüber 2005 gesenkt werden. Für die Nicht-ETS-Sektoren steht für Deutschland derzeit eine Reduktion der Emissionen um 38% gegenüber 2005 in der Diskussion.

## Zielszenarien für Deutschland: Grundlegende Ansätze

Unterschiedliche Szenarien für die Energiewende stellen idealerweise verschiedene mögliche Pfade für die Transformation des deutschen Energiesystems dar, die mit dem aktuellen Stand des Wissens vereinbar sind. Dabei zeigt der Vergleich der Studien, dass in allen Studien (zumindest qualitativ) Einigkeit darüber herrscht, dass eine Reihe von Entwicklungen unumgänglich ist, um die gesetzten Ziele zu erreichen. So wird erwartet, dass alle Sektoren (Strom, Wärme, Mobilität) einen signifikanten Beitrag zur Zielerfüllung leisten müssen – sowohl durch Verbrauchsminderungen infolge gesteigerter Effizienz als auch durch EE-Ausbau. Die Nutzung von EE in den Sektoren Wärme und Verkehr wird zum Teil indirekt über eine Elektrifizierung (E-Mobilität, elektrische Wärmepumpen etc.) erreicht.

Zentrale Stützen der Stromerzeugung werden Windenergie – insbesondere an Land – und Photovoltaik sein. Der hohe Anteil an fluktuierender Stromerzeugung erfordert eine Flexibilisierung der Verbraucher, eine flexible Betriebsführung der verbleibenden thermischen Kraftwerke und KWK-Anlagen und den Einsatz von Speichern, um Stromerzeugung und -bedarf jederzeit miteinander in Deckung zu bringen. Biomasse wird aufgrund begrenzter nachhaltiger he-

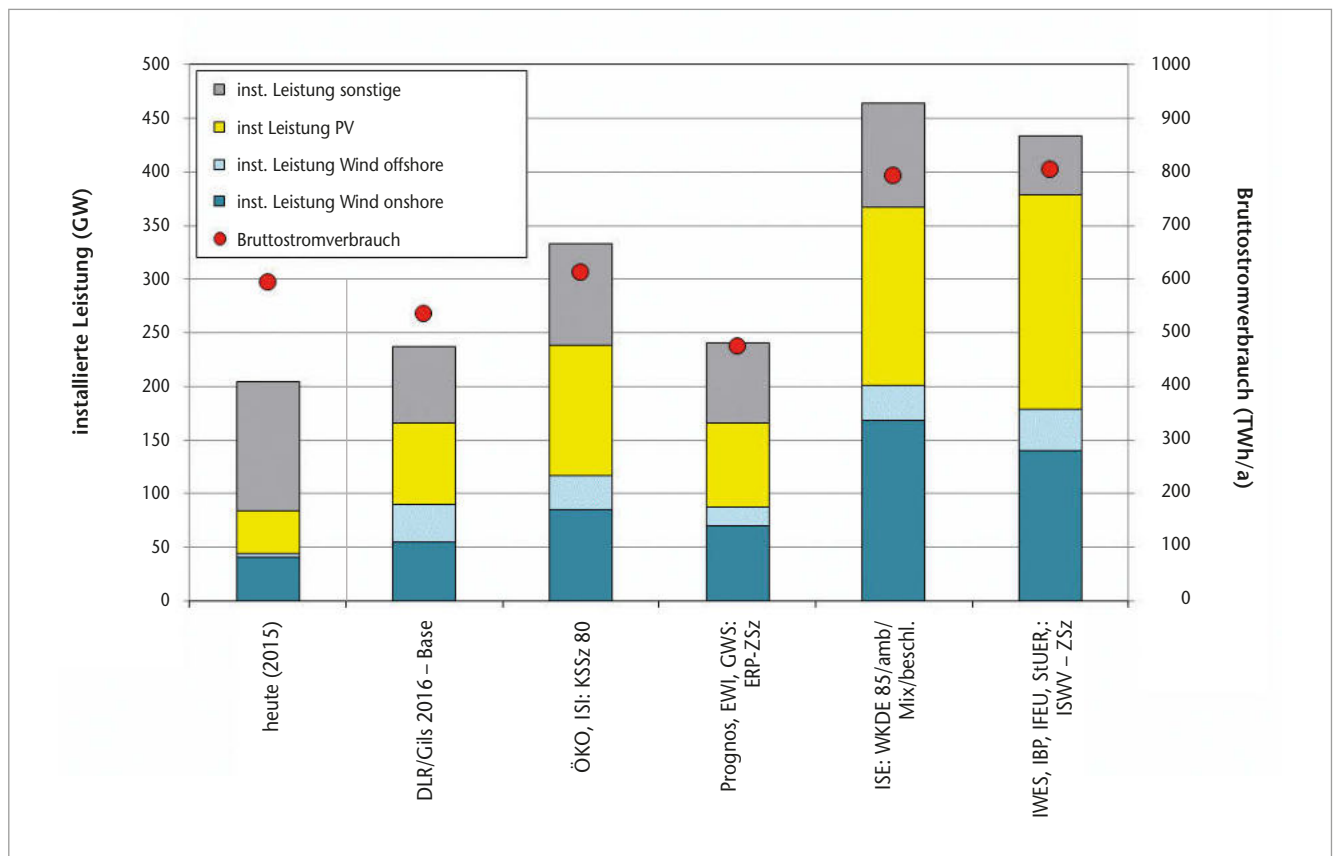
mischer Potenziale im Energiesystem nur eine untergeordnete Rolle spielen.

## Differenzen verschiedener Szenarienstudien

Trotz dieser qualitativen Übereinstimmung unterscheiden sich Szenarien zum Teil deutlich in der konkreten Ausgestaltung dieser Aspekte. In ihrer Unterschiedlichkeit spiegeln sie die Unsicherheit wesentlicher technischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Entwicklungen in der Zukunft wider. In diesem Beitrag sollen exemplarisch Ergebnisse unterschiedlicher Szenarienstudien kurz präsentiert und diskutiert werden. Alle hier dargestellten Szenarien erfüllen das Ziel, zwischen 1990 und 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80–85 % zu verringern.

Abbildung 1 zeigt Resultate zum Bruttostrombedarf und zur installierten Leistung zur Stromerzeugung ausgewählter Szenarien. Die teils sehr unterschiedlichen Ergebnisse illustrieren die Unsicherheit, wie weit der Verbrauch „klassischer“ Stromverbraucher durch Effizienzmaßnahmen verringert werden kann. Außerdem treffen die Szenarien unterschiedliche Aussagen darüber, wie sehr der Verkehrssektor, die Gebäude- und die Prozesswärmeversorgung bis 2050 elektrifiziert werden können.

Abbildung 1  
**Bruttostromverbrauch und installierte Leistung heute und in verschiedenen Zielszenarien bis 2050**



Darüber hinaus differieren die Szenarien bei der Einschätzung, in welchem Umfang bei einer angestrebten Emissionsminderung um 80 % synthetische Brennstoffe (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, synthetische flüssige Kohlenwasserstoffe) in welchem Sektor nötig sind. Da synthetische Brennstoffe zumeist auf Basis elektrolytisch erzeugten Wasserstoffs hergestellt werden, geht mit der Nutzung von synthetischen Brennstoffen ein entsprechend höherer Strombedarf einher.

Unterschiedliche Strategien werden auch bei der Gebäudewärmeversorgung verfolgt: Zum Beispiel sieht eine Studie des FhG ISE (ISE 2015) im Jahr 2050 einen Anteil von ca. 80% an Wärmepumpen in der Gebäudewärmeversorgung; der verbleibende Wärmebedarf wird über Wärmenetze gedeckt. Im Gegensatz dazu geht das Klimaschutzszenario 80 (ÖKO 2015) davon aus, dass neben Wärmepumpen und Wärmenetzen auch dezentrale Solarthermie, Biomasse und fossil befeuerte Einzelanlagen eine wichtige Rolle spielen werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt in Transformationsszenarien ist die energetische Nutzung von Biomasse. Aktuelle Fragestellungen beschäftigen sich mit den nachhaltigen nationalen Potenzialen, Importmöglichkeiten für nachhaltige Biomasse, technisch-ökonomische Nutzungspfade bis 2050 und die Allokation der limitierten Potenziale auf die Sektoren Strom, Wärme und Mobilität. Eine Meta-Studie des DBFZ (Szarka et al. 2016) zeigt, dass verschiedene Studien hier sehr unterschiedliche Aussagen treffen: Annahmen zu nachhaltigen nationalen Potenzialen reichen von 350 PJ bis 1700 PJ, der Anteil der Biomasse am Endenergieverbrauch 2050 liegt zwischen 5 % und über 25%. Die Strategien, Biomasse auf die Sektoren zu verteilen, sind ebenfalls höchst unterschiedlich: Während einige Szenarien den Großteil der Biomasse für Biokraftstoffe einsetzen, wird in anderen Szenarien über die Hälfte im Wärmesektor eingesetzt. Diesen Szenarien stehen wiederum Szenarien gegenüber, in denen Biomasse im Wärmesektor kaum mehr eine Rolle spielt. Im Rahmen des Projektes „Meilensteine 2050“ (Thrän et al. 2050) hat das DBFZ zusammen mit Partnern detaillierte Szenarien entwickelt und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie identifiziert, die eine Diskussionsgrundlage für die energetische Nutzung von Biomasse in zukünftigen Szenarien für das Gesamtsystem darstellen können.

Um die Robustheit und Validität der in Szenariestudien getroffenen Aussagen bewerten zu können, ist ein wissenschaftliches Verständnis der Ursachen der unterschiedlichen Ergebnisse nötig. Unterschiede zwischen Szenarien können mehrere Ursachen haben:

- unterschiedliche Annahmen zur Entwicklung von Treiberfaktoren (Bevölkerung, Wirtschaftsleistung, Kosten von Brennstoffen und Technologien, ...)
- Unterschiede bzgl. der Abbildung des untersuchten Systems im Modell
- unterschiedliche Modellierungsansätze
- unterschiedliche Berücksichtigung qualitativer Aspekte (z. B. der Akzeptanz einzelner Technologien) in einem Szenario etc.

Ein Beispiel für einen Ansatz, der zum besseren Verständnis von Modellergebnissen beitragen kann, ist das Projekt RegMex (Wuppertal Institut, DLR-TT, FhG ISE und IZES). Ziel des Projektes ist es zunächst, einen gemeinsamen Satz von Rahmenannahmen festzulegen, der für die Szenarienmodellierung mit verschiedenen Energiesystemmodellen verwendet werden kann. Die Analyse anschließender Modellexperimente ermöglicht es, Stärken und Schwächen einzelner Modelle und Modellierungsansätze zu identifizieren und robuste Aussagen zur Transformation des Energiesystems sowie ggf. zur Robustheit der Szenarien in Bezug auf ausgewählte disruptive Entwicklungen abzuleiten.

### Einbeziehung gesellschaftlicher Faktoren bei der Erstellung von Energieszenarien

Die deutsche Energiewende wird zunehmend nicht nur als technische und ökonomische Herausforderung verstanden, sondern auch als gesellschaftlicher Partizipations- und Transformationsprozess. Der folgende Abschnitt illustriert anhand von Forschungsprojekten von FVEE-Mitgliedsinstituten, wie gesellschaftliche Aspekte in systemanalytischen Untersuchungen und Szenariestudien zunehmend Berücksichtigung finden.

Abschätzungen von Ausbaupotenzialen für erneuerbare Energiequellen stellen wichtige Randbedingungen für Energieszenarien dar: Die Nutzung prinzipiell wirtschaftlicher Potenziale unterliegt jedoch oft weiteren Beschränkungen. Für Windenergieanlagen gelten z. B. Abstandsregelungen von Siedlungsflächen, die Beeinträchtigungen durch Schallemissionen und Schattenwurf der Anlagen abmildern sollen und insofern sowohl Gesundheits- als auch Akzeptanz-Aspekte berücksichtigen. Eine Studie des UFZ in Leipzig (Masurowski et al. 2016) zeigt nun auf, dass die Mindestabstände von Windkraftanlagen zu Siedlungsflächen signifikant das Ausbaupotenzial von Windkraft an Land beeinflussen, wobei die Stärke dieses Effektes wiederum von der regionalen Siedlungsdichte und der Siedlungsstruktur abhängt.

Die Einbeziehung gesellschaftlicher Faktoren kann ganz direkt durch die Beteiligung von Stakeholdern bei der Erstellung von Szenarien erfolgen. Es steht dabei zu erwarten, dass hierbei andere Schwerpunkte gesetzt und andere Faktoren berücksichtigt werden als in rein wissenschaftlichen Studien. Ein Beispiel ist ein Szenario für 100% EE-Versorgung in Niedersachsen, das unter Mitwirkung des ISFH für den „Runden Tisch Energiewende“ erstellt wurde (NDS 2016). Das für den mit vielen gesellschaftlichen Akteuren besetzten runden Tisch erstellte Szenario zeichnet sich dadurch aus, dass über 50% des Endenergiebedarfs in Niedersachsen über PV-Strom gedeckt werden sollen, deutlich mehr als im kostenminimalen Fall (20–40% PV). Gleichzeitig wird jedoch der besonders kritisch diskutierte Flächenverbrauch für Windkraft signifikant reduziert. Da das Kostenminimum in dieser Analyse sehr flach ist, fallen für die höhere Akzeptanz des PV-Szenarios nur moderate Mehrkosten gegenüber dem kostenminimalen Fall an.

Stakeholder- und Bürgerbeteiligung muss sich nicht auf die Ebene der Szenarienerstellung beschränken. Begleitend zum aktuell in der Bundesregierung diskutierten „Klimaschutzplan 2050“, fand über mehrere Monate ein Beteiligungsprozess, in dem die Bundesländer, Kommunen, Verbände sowie Bürgerinnen und Bürger Maßnahmenvorschläge für den Klimaschutz entwickelten und beurteilten. Am Ende des Prozesses standen 96 Klimaschutzmaßnahmen über alle treibhausgasrelevanten Sektoren, konkrete Ausgestaltungshinweise zu jeder Maßnahme sowie jeweils eine Empfehlung (oder Nichtempfehlung) der einzelnen beteiligten Gruppen, ob die diskutierte Maßnahme so in den Klimaschutzplan 2050 aufgenommen werden soll (WI 2016).

Ein weiterer Ansatz, den gesellschaftlichen Kontext in Energieszenarien mit einzubeziehen, sind die sozio-technischen Szenarien, die innerhalb der HGF-Allianz EnergyTrans von der Universität Stuttgart (ZIRIUS), dem DLR, dem KIT und dem FZJ entwickelt wurden. Der EnergyTrans-Ansatz geht davon aus, dass der Transformationsprozess von gesellschaftlichen Faktoren mit beeinflusst wird, die zu einem Gelingen (oder Nicht-Gelingen) der Energiewende beitragen. Dazu gehören quantitative Größen wie BIP- und Bevölkerungsentwicklung oder Energieträgerpreise, aber auch qualitative Größen wie Akzeptanzfragen, der mediale Diskurs, Nutzerverhalten bzgl. Energietechnologien etc. Gesellschaftlicher Kontext und technische Komponenten des Energiesystems bilden ein sozio-technisches System, in dem sich die einzelnen Komponenten gegenseitig beeinflussen, so dass der Einfluss einzelner Systemkomponenten auf das (sozio-technische) Gesamtsystem nicht unabhängig vom restlichen System untersucht werden kann.

Ziel des EnergyTrans-Ansatzes ist es einerseits, konsistente gesellschaftliche Rahmenannahmen (Storylines) für Energieszenarien zu entwickeln. Andererseits soll systematisch analysiert werden, welche zentralen gesellschaftlichen Faktoren für ein Gelingen (oder Nicht-Gelingen) der Energiewende Relevanz haben.

Methodische Herausforderungen bestehen dabei einerseits in der Synthese von vielfältigem Expertenwissen zu konsistenten Kontext-Szenarien, die den Systemcharakter berücksichtigen. Hierfür bietet sich der Ansatz der CIB-Analyse an (s. Weimer-Jehle et al. 2016). Die zweite methodische Herausforderung besteht in der Kopplung der weitgehend qualitativen Kontextszenarien an die quantitativen Energiesystemmodelle, die im Wesentlichen auf Experteneinschätzungen basiert. Als Ergebnis dieses Ansatzes stehen sozio-technischen Szenarien für die Entwicklung des Energiesystems, die sowohl eine qualitative Storyline bezüglich der gesellschaftlichen Rahmenbedingungen als auch ein quantitatives „klassisches“ Energieszenario umfassen. Dabei sind die intrinsische Konsistenz der Storyline sowie die Konsistenz von Storyline und Energieszenario im Rahmen des vorhandenen Expertenwissens durch den gewählten Ansatz gewährleistet.

## Zusammenfassung und Fazit

Normative Energieszenarien spielen eine wichtige Rolle im wissenschaftlichen Begleit- und Steuerungsprozess für die Energiewende. Sie zeigen unterschiedliche mögliche Entwicklungen des Energiesystems, deren Voraussetzungen und Konsequenzen auf.

Die Analyse verschiedener Zielszenarien für Deutschland zeigt dabei zweierlei: Einerseits herrscht weitgehend Einigkeit bezüglich notwendiger grundlegender Entwicklungen (z. B. Effizienzsteigerung, Ausbau erneuerbarer Energien, Elektrifizierung Mobilitäts- und Wärmesektor). Andererseits gibt es auf der Basis dieser grundlegenden Tendenzen vielfältige mögliche Konkretisierungen des Systems, die konform mit den Zielen der Energiewende sind, in ihrer Unterschiedlichkeit aber die Unsicherheit bezüglich zukünftiger technischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Randbedingungen widerspiegeln.

Für eine wissenschaftlich fundierte Begleitung und Steuerung der Energiewende ist ein exaktes Verständnis für die Ursachen unterschiedlicher Szenarienergebnisse von großer Bedeutung.

Der Transformationsprozess des Energiesystems wird zunehmend nicht nur als technisch-ökonomische

Herausforderung gesehen, sondern als Prozess, in dem gesellschaftliche Aspekte als hemmende und fördernde Größen Berücksichtigung finden müssen. Innerhalb des FVEE werden vielfältige Ansätze verfolgt, um gesellschaftliche Akteure in die Erstellung von Szenarien und in die Entwicklung von Maßnahmen zur Steuerung der Energiewende mit einzubeziehen. Darüber hinaus ermöglicht es das Konzept der sozio-technischen Szenarien, integrierte konsistente Szenarien für den gesellschaftlichen Kontext und die Transformation des Energiesystems zu entwickeln.

## Referenzen

- **DLR 2012:** Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. DLR, FhG IWES, IfnE. Studie im Auftrag des BMU. Stuttgart, Kassel, Teltow, März 2012.
- **Gils 2015:** Balancing of Intermittent Renewable Power Generation by Demand Response and Thermal Energy Storage. Dissertation Hans-Christian Gils. DLR und Universität Stuttgart, Institut für Energiespeicherung (IES). Stuttgart, November 2015.
- **ISE 2015:** Was kostet die Energiewende? – Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050. FhG ISE, Freiburg, Oktober 2015.
- **IWES 2015:** Interaktion EE-Strom, Wärme und Verkehr. FhG IWES, FhG IBP, IFEU, Stiftung Umweltenergierecht. Studie gefördert durch das BMWi. September 2015.
- **Masurovski et al. 2016:** A spatially explicit assessment of the wind energy potential in response to an increased distance between wind turbines and settlements in Germany. F. Masurovski, M. Drechsler, K. Frank. *Energy Policy* 97, doi: 10.1016/j.enpol.2016.07.021
- **NDS 2016:** Energieszenarien 2050 – Zusatzgutachten. CUTEK, efzn, IfES, ISFH. Studie im Auftrag des niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimaschutz, Hannover, Oktober 2016.
- **ÖKO 2015:** Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht. Öko-Institut, FhG ISI, H.-J. Ziesing. Studie im Auftrag des BMUB. Berlin, Dezember 2015.
- **Prognos 2014:** Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Prognos, EWI, GWS. Studie im Auftrag des BMWi. Berlin, Köln, Osnabrück, Juni 2014.
- **Szarka et al. 2016:** N. Szarka, M. Eichhorn, R. Kittler, A. Bezama, D. Thrän, Interpreting long-term energy scenarios and the role of bioenergy in Germany. *Ren. Sust. Energ. Rev.* (2016), doi: 10.1016/j.rser.2016.02.016
- **Thrän et al. (2015):** Meilensteine 2030. Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie. Gefördert durch das BMWi. Schriftenreihe des Förderprogramms „Energetische Biomasse-nutzung“ Band 18.
- **WI 2016:** Maßnahmenkatalog – Ergebnis des Dialogprozesses zum Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung. Wuppertal Institut (WI), IFOK, IFEU, Öko-Institut, FhG ISI, März 2016.
- **Weimer-Jehle et al. 2016:** Context scenarios and their usage for the construction of socio-technical energy scenarios. W. Weimer-Jehle, J. Buchgeister, W. Hauser, H. Kosow, T. Naegler, W.-R. Poganietz, T. Pregger, S. Prehofer, A. von Recklinghausen, J. Schippl, S. Vögele, *Energy* 111, 956–970. doi: 10.1016/j.energy.2016.05.073.