

Autoren: Dr. Hans-Martin Henning, Andreas Palzer, Fraunhofer ISE

Medium: BWK die Ausgabe Juni 2013, Erneuerbare Energien Spezial

Redaktionsschluss: 24.4.2013 (verschoben am 18.4.13)

Umfang: Soll 13.000 bis 15.000 Zeichen  
Ist 15.092 Zeichen (mit Leerzeichen)

Rückfragen der Redaktion bitte richten an: Dr. Klaus Heidler, Tel. 0761/38 09 68-20  
heidler@solar-consulting.de

## **Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland – Eine ganzheitliche Modellierung des Energiesystems für das Jahr 2050**

Die Energiewende ist ins Gerede gekommen. Über den Diskussionen zu Strompreisen, Erneuerbare Energien-Gesetz und Stromnetztrassen wird manchmal das Ziel vergessen: substantielle Senkung der Kohlendioxidemissionen und Stabilisierung des Klimas auf einem ökologisch und sozial verträglichen Temperaturniveau. Immer wieder wird bezweifelt, dass es überhaupt möglich ist, ein derartiges System zu bezahlbaren Kosten in einem dicht besiedelten Industrieland der nördlichen Hemisphäre zu realisieren. Mit der hier beschriebenen Studie zeigen die Autoren des Freiburger Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, wie der Strom- und Wärmebedarf in Deutschland bis zu 100 % mit Erneuerbaren Energien gedeckt werden kann. Es werden unterschiedliche Szenarien dargestellt, die mit den Zielen der Bundesregierung zur Absenkung der Treibhausgas-Emissionen um mindestens 80 % bis 95 % bis 2050 kompatibel sind.

### **Ziel und Rahmen**

Das Ziel unserer Studie ist es zu prüfen, wie ein Energiesystem im Jahr 2050 aussehen müsste, um die CO<sub>2</sub> Reduktionsziele der Bundesregierung einzuhalten und Deutschland sicher mit Wärme und Strom zu versorgen. Zugleich soll dafür diejenige Kombination aus Energiewandlern, Energiespeichern und energetischer Sanierung des Gebäudesektors ermittelt werden, die zu minimalen Kosten für die Volkswirtschaft führt. Dabei sollen nur heimische Träger erneuerbarer Energien zum Tragen kommen.

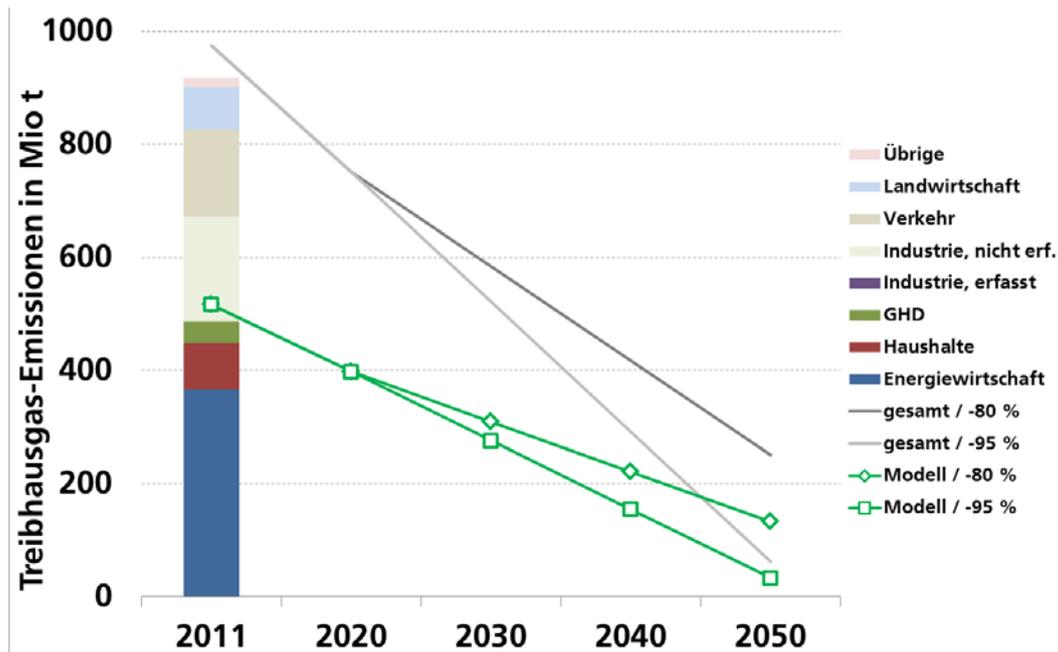


Abb. 1 Die Säule links zeigt die Zusammensetzung der 917 Mio t Treibhausgas-Emissionen Deutschlands im Jahr 2011 nach Angaben des Umweltbundesamtes. Als graue Linien dargestellt sind das Verpflichtungsziel Deutschlands laut Kyoto-Protokoll für das Mittel der Jahre 2008-2012, das Minus-40-%-Ziel für 2020 sowie der weitere Zielkorridor bis 2050, wonach die Treibhausgas-Emissionen um mindestens 80 % bis 95 % bezogen auf den Wert von 1990 abgesenkt werden sollen. Die grünen Linien beziehen sich auf den Anteil des Energiesystems und der korrespondierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen, der durch die Modellrechnungen abgedeckt wird.

### Das Modell REMod-D

Wir haben das Strom-Wärme-Modell REMod-D (Regenerative Energien Modell – Deutschland) für Erzeugung, Speicherung und Verbrauch erstellt, das die Quellen der Emissionen für die Energiewirtschaft, die Sektoren Haushalte und GHD (Gewerbe, Handel und Dienstleistungen) sowie für Industriegebäude erfasst; der Stromverbrauch all dieser Sektoren ist in dem Wert der Energiewirtschaft enthalten. Entsprechend wurde der Zielkorridor für die im Modell abgedeckten Sektoren proportional ermittelt. Alle Zahlen und Grafiken des Artikels beziehen sich auf diesen Anteil von rund 53 % der Emissionen.

Um die Frage zu beantworten, wie ein zuverlässiges Energiesystem Deutschlands aussehen kann, das zu einem hohen Anteil auf erneuerbaren Energiequellen für die Versorgung mit Strom und Wärme basiert, haben wir zunächst ein Rechenmodell erstellt mit allen Komponenten, die in einem solchen Energiesystem aus heutiger Sicht vorkommen werden. Abbildung 2 zeigt das Modellsystem mit Ergebnissen, die im Abschnitt „Energiesystem im Jahr 2050“ beschrieben werden. Das Modell bildet bei der Erzeugung die herkömmlichen und künftigen Erzeuger und Wandler im Detail nach. Bei den Erneuerbaren sind das Wind, Sonne, Biomasse und Wasserkraft<sup>1</sup>. Die fossilen Kraftwerke werden nach Energieträgern unterschieden.

<sup>1</sup> Die Nutzung oberflächennaher Geothermie wird in unserem Modell durch Wärmepumpen berücksichtigt. Tiefen-Geothermie zur Strombereitstellung wird zukünftig – vor allem weltweit betrachtet – auch eine wichtige Rolle

Bei den Wärmeverbrauchern betrachten wir Einzelgebäude, Quartier-Wärmenetze mit BHKW und großstädtische Netze mit GuD-KWK. Einzelgebäude können mit elektrischen Wärmepumpen, Gas-Wärmepumpen, Brennwertkesseln oder Klein-BHKW versorgt werden. Bei den elektrischen Wärmepumpen differenzieren wir Sole und Luft als Wärmequelle.

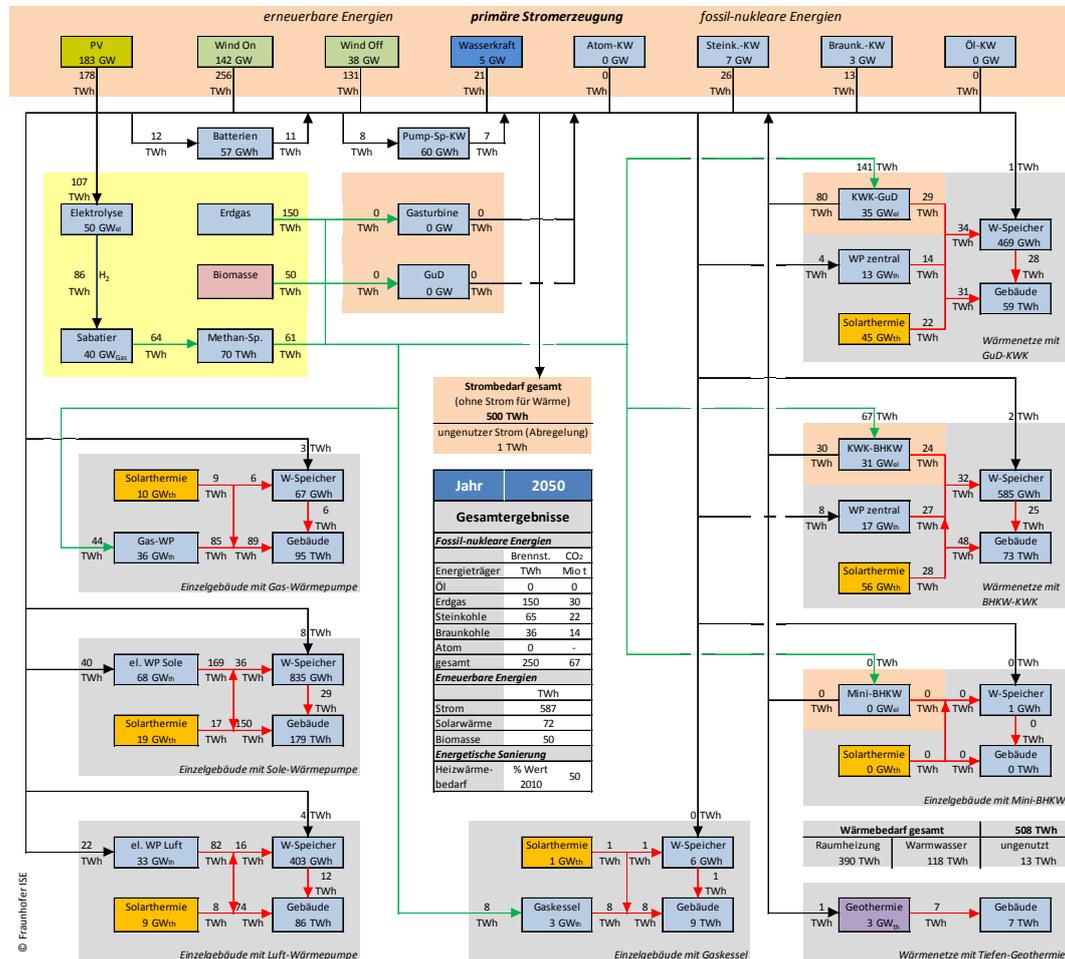


Abb. 2: Das zu Grunde gelegte Modellsystem. Stromerzeugung ist rosa hinterlegt, Gasbereitstellung bzw. -erzeugung gelb, Wärmebereitstellung und -nutzung grau. Sabatier = Umwandlung von Wasserstoff in Methan, WP = Wärmepumpe, Sp. = Speicher, BHKW = Blockheizkraftwerk, KWK = Kraft-Wärme-Kopplung. Zu den Zahlenwerten siehe Abschnitt „Energiesystem im Jahr 2050“.

Speicherkomponenten sind Pumpspeicher-Kraftwerke und Batterien und Wärmespeicher in unterschiedlichen Größen auf Basis von Wasser als Speichermedium. Große zentrale Wärmespeicher, wie sie in Dänemark seit vielen Jahren in der Fernwärmeversorgung erfolgreich im Einsatz sind, können ein wichtiges Element der Flexibilisierung der Stromnutzung darstellen. Außerdem haben wir als Option für einen Langzeitspeicher die Umwandlung von Strom in synthetisches Methan in Power-to-Gas-Anlagen (Sabatier-Prozess) berücksichtigt. Dieses Gas weist eine neutrale Kohlendioxid-Bilanz auf, da bei seiner Herstellung

spielen, hat in Deutschland auf nationaler Ebene allerdings ein geringes Potenzial. Tiefen-Geothermie für die direkte Wärmebereitstellung hat auch an vielen Orten Deutschlands ein großes theoretisches Potenzial. Allerdings sind Aussagen über Kosten mit großen Ungewissheiten versehen, so dass wir nur von einem vergleichsweise kleinen Anteil ausgegangen sind.

Kohlendioxid und Wasserstoff zu Methan synthetisiert werden. Es kann zusammen mit entsprechend aufbereitetem Biogas in vorhandenen Kavernen gespeichert und über die existierende Erdgasinfrastruktur genutzt werden. Eine Alternative ist eine Wasserstoffwirtschaft, die einige Vorteile wie höhere Umwandlungseffizienz und niedrigere Kosten der Wandler aufweist, allerdings eine umfängliche Anpassung der heute für Erdgas verwendeten Infrastruktur erfordert.<sup>2</sup> Für die Rückverstromung haben wir effiziente Gas- und Dampf (GuD)-Kombikraftwerke und Anlagen der Kraftwärmekopplung (KWK) in Form zentraler KWK-Anlagen und dezentraler Blockheizkraftwerke (BHKW) einbezogen.

Für die Biomasse haben wir nur einen konstanten, vergleichsweise geringen Anteil von 50 Terrawattstunden pro Jahr für den Strom- und Wärmesektor angesetzt. Damit sind immer noch erhebliche Mengen Biomasse verfügbar, die zum Beispiel für den Verkehrssektor oder Hochtemperatur-Prozesse in der Industrie sinnvoller eingesetzt werden können als für die Niedertemperaturheizung in Gebäuden<sup>3</sup>.

Für die Optimierung wird in vielen Millionen Simulationsläufen jeweils ein vollständiges Jahr stundenaufgelöst durchgerechnet und das Minimum der jährlichen Gesamtkosten zum Erhalt und Betrieb des Energiesystems als Zielfunktion verwendet. Diese jährlichen Gesamtkosten ergeben sich in unserem Modell wie folgt: für die erneuerbaren Anteile fallen keine Brennstoffkosten an, bei den fossilen Energien haben wir eine Erhöhung der Weltmarktpreise um jährlich 2 % angesetzt. Wir haben für alle Systemkomponenten einschließlich der Netze die Kosten für Erhalt bzw. Erneuerung nach abgelaufener Lebenszeit sowie Betrieb und Wartung auf jährliche Kosten umgerechnet. Für die Finanzierungskosten wurde ein Zinssatz von 4 % für alle dezentralen und von 7 % für zentrale Technologien angesetzt. Dabei haben wir für neue Technologien die Kosten nach Erreichen der Marktreife und hoher Marktdurchdringung zu Grunde gelegt.

Eine Besonderheit des Modells ist, dass zusätzlich zu Energiebereitstellung und – wandlung auch die energetische Sanierung des Gebäudebestands mit berücksichtigt wird. Für die Kosten der energetischen Sanierung wurden auf Basis verschiedener Studien eine Funktion ermittelt, die die mittleren Mehrkosten für energetische Sanierung im Vergleich zu Sanierung ohne energetische Maßnahmen darstellt.

## **Energiesystem im Jahr 2050**

Bei diesen Rechnungen wurden die konventionellen Kraftwerke berücksichtigt, die aus heutiger Sicht in 2050 noch in Betrieb sein werden. Dabei haben wir folgende Szenarien untersucht:

- Für den Strombedarf wurden zwei Werte verwendet, ein unveränderter Strombedarf in Höhe von 500 TWh und ein entsprechend den Zielen der Bundesregierung bis 2050 um 25 % abgesenkter Strombedarf von 375 TWh. Dabei ist zu berücksichtigen, dass beide Werte ohne den Strom gelten,

---

<sup>2</sup> Die Kosten für eine Änderung bzw. Ergänzung der Erdgas-Infrastruktur für die Nutzung mit reinem Wasserstoff sind sehr schwer abschätzbar. Wir haben deshalb in den Rechnungen sowohl hinsichtlich der Umwandlungseffizienzwerte als auch der Kosten die Methan-Kavernen-Erdgasnetz-Kette verwendet.

<sup>3</sup> In 2010 betrug die Gesamtenergiemenge aus Biomasse, einschließlich Deponiegase und energetischer Müllverwertung, mehr als 300 Terrawattstunden.

der für Niedertemperaturwärme verwendet wird, also insbesondere für Wärmepumpen oder direkte Verheizung von Überschussstrom.

- Für Erdgas haben wir 0 TWh, 150 TWh und 500 TWh angenommen, die in 2050 noch verwendet werden. Wird keinerlei Erdgas verwendet, kommt neben Biomasse nur in Power-To-Gas-Anlagen erzeugtes Gas für die komplementäre Stromerzeugung in Frage.

Ergebnisse von Optimierungsrechnungen für diese Szenarien zeigt Tabelle 1. Bei niedrigerem Strombedarf sind entsprechend weniger Wandler fluktuierender erneuerbarer Energien notwendig. Die notwendige installierte Leistung von Power-To-Gas-Anlagen sinkt deutlich ab, wenn noch Erdgas verwendet wird; bei der Verwendung von 500 TWh Erdgas wird die Herstellung synthetischen Gases aus erneuerbarem Strom nicht benötigt. Der Optimalwert der Absenkung des Heizwärmebedarfs liegt zwischen einer Absenkung auf nur 87 % des heutigen Wertes (375 TWh Strombedarf, 500 TWh Erdgas) und 44 % des heutigen Wertes (500 TWh Strombedarf, 0 TWh Erdgas). Es resultiert außerdem, dass ohne die Verwendung von Erdgas eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 95 % erfolgt, während bei Verwendung von noch 500 TWh der Mindestwert der Reduktion von 80 % knapp nicht erreicht wird.

<b>Strombedarf</b>	<b>TWh</b>	<b>375</b>			<b>500</b>		
<b>Erdgas</b>	<b>TWh</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>500</b>	<b>0</b>	<b>150</b>	<b>500</b>
<b>Wind Offshore</b>	<b>GW</b>	50	43	33	50	50	37
<b>Wind Onshore</b>	<b>GW</b>	150	120	78	150	150	90
<b>Photovoltaik</b>	<b>GW</b>	183	132	69	222	213	101
<b>Power-to-Gas</b>	<b>GW</b>	73	23	0	106	50	0
<b>Heizwärmebedarf</b>	<b>%<sub>2010</sub></b>	73%	79%	87%	44%	73%	84%
<b>CO<sub>2</sub>-Emissionen</b>	<b>Mio t</b>	36	66	137	40	66	137
<b>Reduktion</b>	<b>%<sub>1990</sub></b>	95%	90%	79%	94%	90%	79%

Tabelle 1: Installierte elektrische Leistung von Wandlern fluktuierender erneuerbarer Energien, von Elektrolyseuren für die Erzeugung synthetischen Gases, optimierter Heizwärmebedarf bezogen auf den Wert in 2010 sowie resultierende CO<sub>2</sub>-Emissionen und Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bezogen auf das Bezugsjahr 1990

Abbildung 2 zeigt installierte Leistungen und korrespondierende Energieflüsse aller Wandler für ein Szenario mit einem Strombedarf von 500 TWh, einer Nutzung von Erdgas in Höhe von 150 TWh und einem Umfang der energetischen Gebäudesanierung mit resultierendem Heizwärmebedarf von 50 % des heutigen Wertes. Wir haben dieses Zielsystem aus folgenden Gründen für die weitere Betrachtung ausgewählt:

- Effizienzgewinne im Bereich des Strombedarfs werden vermutlich durch Rebound-Effekte und steigenden Bedarf im Bereich der Unterhaltungs- und Kommunikationstechnik, insbesondere aber durch Zunahme von Elektromobilität – sei es auf Basis Batterietechnik oder auf Basis Wasserstoff – kompensiert werden.

- Eine höhere Aktivität im Bereich der energetischen Sanierung scheint – selbst wenn sie nicht kosten-optimal ist – aus Akzeptanzgründen wahrscheinlicher als ein entsprechend höherer Ausbau von Wandlern erneuerbarer Energien.
- Da die Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Strom-Wärme-Sektor vergleichsweise leichter fällt als im Bereich des Verkehrs und der Industrieprozesse ist vermutlich eine höhere Absenkung hier sinnvoll.

Die installierten Leistungen der Wandler fluktuierender erneuerbarer Energien in Abbildung 2 sind 183 GW Photovoltaik, 142 GW Wind Onshore, 38 GW Wind Offshore und 140 GW Solarthermie-Anlagen - davon etwa zwei Drittel zentrale Anlagen, die in Wärmenetze einspeisen und ein Drittel dezentrale Anlagen. Große Wärmespeicher sind wichtig für die Flexibilisierung der Stromerzeugung, ebenso dezentrale Wärmespeicher in Einzelgebäuden. In der Jahressumme werden rund 18 TWh Strom mit Widerstandsheizung zur Speicherladung verwendet, nämlich dann, wenn die Temperatur des Speichers für Beladung mit Wärmepumpen zu hoch ist. Monovalente Nur-Strom-Heizungen sind dagegen nicht systemdienlich, da diese auch dann Strom benötigen, wenn keine direkte Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien gegeben ist.

Sowohl große KWK-Anlagen in großstädtischen Fernwärmenetzen als auch kleinere Anlagen für die Versorgung von Kleinstädten oder Quartieren übernehmen die komplementäre Strombereitstellung; Klein-BHKWs in Einzelgebäuden spielen dagegen keine Rolle. Interessant ist, dass auch große Wärmepumpen, die in zentrale Wärmenetze einspeisen, eine zusätzliche Flexibilisierung der Stromnutzung eröffnen und dabei Wärme-geführten Betrieb von KWK-Anlagen in Zeiten vermeiden, zu denen ausreichend erneuerbarer Strom zur Verfügung steht. Einzelgebäude werden vorrangig von elektrischen und zu einem kleineren Teil von Gas-Wärmepumpen versorgt. Für Gas aus erneuerbarem Strom sind rund 70 TWh Speicher nötig, eine Größe die problemlos mit heute für Erdgas genutzten Kavernen zur Verfügung steht.

Abbildung 3 stellt für drei vorgegebene Werte der energetischen Sanierung die summarische installierte Leistung der Wandler fluktuierender erneuerbarer Energien (Wind, Photovoltaik) sowie die jährlichen Gesamtkosten dar. Dabei wurden die Kosten auf den Wert des günstigsten Systems (Heizwärmebedarf 60 % des Wertes in 2010) normiert. Es zeigt sich, dass bei starker Reduktion des Heizwärmebedarfs auf 40 % die summarische installierte Leistung fluktuierender erneuerbarer Energien um mehr als 100 GW kleiner ausfällt als bei sehr geringer Reduktion des Heizwärmebedarfs auf nur 80 % des heutigen Wertes. Gleichzeitig steigen die jährlichen Gesamtkosten um rund 7 % gegenüber dem Bezugswert.

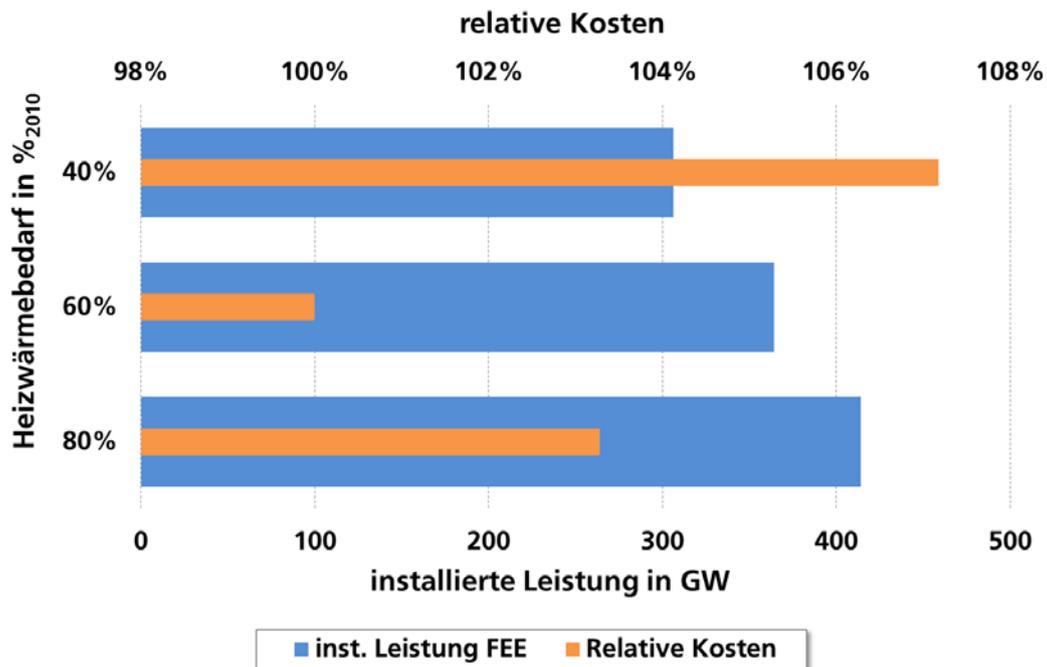


Abbildung 3: Abhängigkeit der jährlichen Gesamtkosten sowie der Wandler fluktuierender erneuerbarer Energien von dem Umfang energetischer Sanierung für das Szenario mit einem Strombedarf von 500 TWh und der Verwendung von 150 TWh Erdgas

Den zeitlichen Verlauf von Strombereitstellung und –verwendung in einer Winterwoche zeigt Abbildung 4. Während in den ersten vier Tagen der Woche komplementäre Stromerzeugung in zentralen KWK-Anlagen zur Lastdeckung erforderlich ist, reicht an den letzten drei Tagen die Produktion aus fluktuierenden erneuerbaren Energiewandlern aus. Überschüsse werden in synthetisches Gas umgewandelt und sowohl mit Wärmepumpen als auch direkt zur Ladung von Wärmespeichern verwendet. Kurzzeit-Stromspeicher wie Batterien und Pumpspeicherkraftwerke kommen insbesondere an sonnenreichen Tagen in Verbindung mit Photovoltaik zum Einsatz.

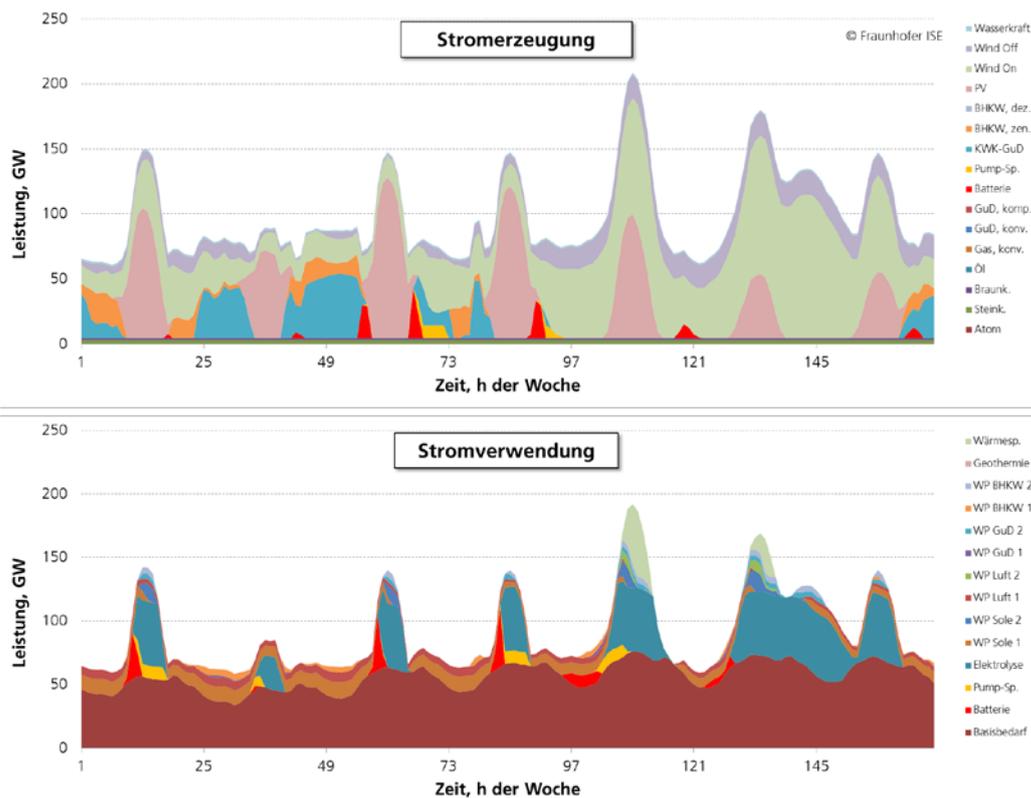


Abb. 4: Zeitverlauf von Stromerzeugung und –verwendung in einer Winterwoche (System entsprechend Abbildung 2; Simulation der Situation im Jahr 2050).

## Fazit

Die erste Phase der Energiewende wurde mit dem Ausbau von Wandlern erneuerbarer Energien ohne wesentliche Begleitmaßnahmen im Netz und am Gesamtsystem vollzogen. Für den weiteren Ausbau von Wandlern fluktuierender erneuerbarer Energien muss nun in der zweiten Phase das Gesamtsystem weiterentwickelt werden. Dies bedeutet vor allem eine Flexibilisierung der Stromnutzung und einen gleichzeitigen Aufbau von effizienten, schnell reagierenden Erzeugungsanlagen, die zunächst vor allem mit Erdgas und später zunehmend mit Biomasse und synthetischem Gas aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Power-To-Gas wird jedoch nur bei weitgehender Reduktion der Nutzung von Erdgas benötigt.

Strom- und Wärmesektor konvergieren zunehmend. Unsere ganzheitliche Modellierung des Strom-Wärme-Systems ist deshalb ein wichtiger Schritt, um die Zusammensetzung des künftigen Energiesystems zu optimieren. Biomasse spielt wegen ihrer Speicherbarkeit eine zentrale Rolle und sollte nicht direkt für Niedertemperaturwärme in Gebäuden, sondern in KWK-Anlagen genutzt werden, um Fluktuationen erneuerbarer Energien auszugleichen.

Die Verbrauchsreduktion ist eine zentrale Komponente der Energiewende. Unsere Ergebnisse lassen vermuten, dass eine Absenkung des Heizwärmebedarfs auf maximal 40 %, eher 50 bis 60 % des heutigen Wertes sinnvoll ist. Letztlich ist der „Mix“ aus Erneuerbaren Energien und Effizienz eine gesellschaftliche Entscheidung, bei der neben technischen und ökonomischen auch andere Gesichtspunkte wie beispielsweise Natur- und Landschaftsschutz sowie gesellschaftliche Akzeptanz eine Rolle spielen.

### **Über die Autoren**

Dr. Hans-Martin Henning ist stellvertretender Leiter des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE und Leiter des Bereichs Thermische Anlagen und Gebäudetechnik

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Andreas Palzer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer ISE im Bereich Thermische Anlagen und Gebäudetechnik. Er ist spezialisiert auf Energiesystem Analysen und Optimierungen.

**Bildrechte:**

Alle Grafiken im Artikel und Fotos wenn nicht anders angegeben Quelle: Fraunhofer ISE

Bilder zur Illustration



Solarthermische Anlagen auf einem Mehrfamilienhaus



Photovoltaikanlage auf einer Automobilfabrik



Zu einem Solarpassivhaus saniertes Hochhaus



Windrad (Quelle: Fraunhofer Gesellschaft)