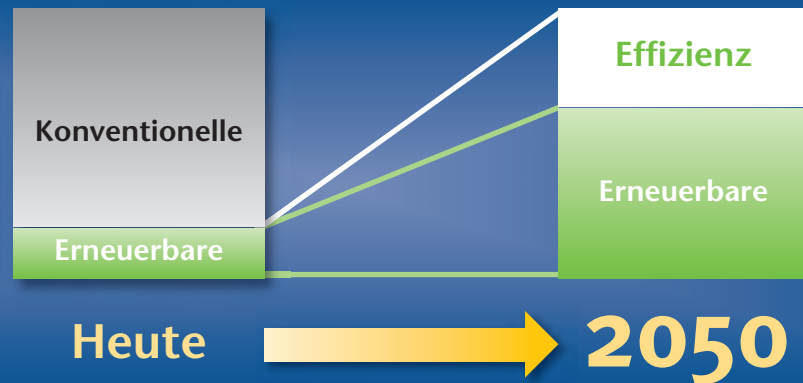


# FVEE-Themen



## Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem

Beiträge zur FVEE-Jahrestagung 2011



**FVEE** • Themen 2011

# Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem

Jahrestagung 2011 des  
Forschungsverbunds Erneuerbare Energien  
12. – 13. Oktober 2011  
Berlin • Umweltforum, Pufendorfstr. 11



Veranstalter



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

Schirmherrschaft  
Förderung

# Inhalt

## ■ Meilensteine der Transformation

- 7 Grußwort Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:  
**MinDir Dr. Urban Rid** • BMU
- 11 Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems  
**Staatssekretär Dr. Georg Schütte** • Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
- 16 Offene Fragen zur Transformation des Energiesystems  
**Prof. Dr. Eicke Weber** • Fraunhofer ISE  
Prof. Michael Nast • DLR  
Dr. Gerd Hauser • Fraunhofer IBP  
Prof. Dr. Jürgen Schmid • Fraunhofer IWES  
Prof. Dr. Uwe Rau • FZJ  
Dr. Ernst Huenges • GFZ  
Prof. Dr. Rolf Brendel • ISFH  
Prof. Dr. Horst Altgeld • IZES  
Prof. Dr. Vladimir Dyakonov • ZAE Bayern  
Maike Schmidt • ZSW
- 19 Systemanalyse zur Transformation der Energiesysteme bis 2050  
**Prof. Dr. Jürgen Schmid** • Fraunhofer IWES  
Prof. Dr. Frithjof Staiß • ZSW  
Dr. Thomas Pregger • DLR  
Dr. Matthias Günther • Fraunhofer IWES

## ■ Ökonomische und technologische Aspekte der Transformation

- 30 Ökonomische Aspekte: Chancen, Märkte und Arbeitsplätze  
**Prof. Dr. Frithjof Staiß** • ZSW  
Prof. Dr. Uwe Leprich • IZES  
Marlene O'Sullivan • DLR
- 37 Perspektiven für das Zusammenspiel von Energieeffizienz und Erneuerbaren  
sowie ihre Einbindung in das Energiesystem  
**Dr. Andreas Bett** • Fraunhofer ISE  
Prof. Dr. Bruno Burger, Dr. Günther Ebert, Gerhard Stryi-Hipp, Dr. Simon Philipps •  
Fraunhofer ISE  
Dr. Kurt Rohrig, Dr. Philipp Strauß, Dr. Bernd Krautkremer • Fraunhofer IWES  
Hans Christian Gils • DLR  
Prof. Dr. Gerd Hauser • Fraunhofer IBP  
Prof. Christoph J. Brabec, Dr. Hans-Peter Ebert, Dr. Andreas Hauer • ZAE Bayern

## ■ Politische Rahmenbedingungen

- 46 Neue Akzente der Forschungsförderung für einen rascheren Ausbau  
der Erneuerbaren  
**Kerstin Deller** • BMU
- 50 Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung  
**Dr. Rodoula Tryfonidou** • BMWi

56 Empfehlungen des FVEE für die Forschungspolitik der Bundesregierung  
**Dr. Gerd Stadermann** • FVEE

63 **Podiumsdiskussion:**  
Wie können Forschung und Politik die Systemtransformation vorantreiben?  
**Moderation: Michael Hustedt**  
Prof. Dr. Eicke Weber • Fraunhofer ISE  
Prof. Dr. Frithjof Staiß • ZSW  
Dr. Andreas Bett • Fraunhofer ISE  
Kerstin Deller • BMU  
Rodoula Tryfonidou • BMWi

## ■ **Strategien, Potenzialanalysen und Prognosen**

72 Das Energiesystem von morgen – Strategien und Forschung für die Transformation zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien  
**Dr. Wolfhart Dürrschmidt** • BMU

80 Langfriststrategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland  
**Dr. Joachim Nitsch** • DLR  
Dr. Thomas Pregger • DLR  
Dr. Bernd Wenzel • Ingenieurbüro für neue Energien

86 Ausbau von Speicherkapazitäten für eine effiziente Stromversorgung mit erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa bis 2050  
**Yvonne Scholz** • DLR  
Maika Schmidt • ZSW  
Dr. Michael Sterner • Fraunhofer IWES  
Dr. Andreas Hauer • ZAE Bayern

93 Prognosen der zeitlich-räumlichen Variabilität von Erneuerbaren  
**Dr. Bernhard Lange** • Fraunhofer IWES  
Dr. Kurt Rohrig, Jan Dobschinski, Arne Wessel, Yves-Marie Saint-Drenan • Fraunhofer IWES  
Dr. Martin Felder • ZSW

## ■ **Transformationsprozesse und Strukturwandel im Energiesystem**

104 Smart Grids – Transformation unserer elektrischen Energieversorgung  
**Dr. Günther Ebert** • Fraunhofer ISE  
Bernhard Wille-Hausmann, Dr. Christof Wittwer • Fraunhofer ISE  
Dr. Jann Binder • ZSW  
Diego Luca de Tena • DLR  
Prof. Dr. Martin Braun, Reinhard Mackensen • Fraunhofer IWES

112 Modellregionen für intelligent vernetzte Energiesysteme  
**Dr. David Nestle** • Fraunhofer IWES  
Dr. Philipp Strauß, Dr. Kurt Rohrig, Sina Pezeshki, Florian Schlögl • Fraunhofer IWES  
Ludwig Karg • B.A.U.M. Consult GmbH  
Andreas Kießling • MVV Energie AG  
Dr. Christof Wittwer, Raphael Hollinger • Fraunhofer ISE  
Dr. Dietrich Schmidt • Fraunhofer IBP

- 119 Städte und Quartierskonzepte – Modellstädte  
**Dr. Dietrich Schmidt** • Fraunhofer IBP  
 Christina Sager, Hans Erhorn • Fraunhofer IBP  
 Prof. Dr. Horst Altgeld • IZES  
 Dr. David Nestle, Wolfram Heckmann • Fraunhofer IWES  
 Dr. Christof Wittwer • Fraunhofer ISE  
 Dr. Hans-Peter Ebert • ZAE Bayern
- **Ökonomische Konversionsprozesse**
- 126 Transformation des bundesdeutschen Stromsystems zur dezentralen Regenerativwirtschaft  
**Prof. Dr. Uwe Leprich** • IZES  
 Norman Gerhardt • Fraunhofer IWES  
 Prof. Dr. Frithjof Staiß • ZSW  
 Gerhard Stryi-Hipp • Fraunhofer ISE
- 131 Änderung von Rahmenbedingungen für neue Anreizmodelle, Wärmegesetze, Gebäudesanierung  
**Maïke Schmidt** • ZSW  
 Juri Horst • IZES  
 Michael Nast, Kristina Nienhaus, Nils Roloff • DLR  
 Prof. Dr. Gerd Hauser • Fraunhofer IBP  
 Dr. Hans-Martin Henning, Dr. Thomas Schlegl • Fraunhofer ISE  
 Thorsten Müller • Uni Würzburg
- **Akzeptanz- und Transformationsforschung**
- 138 Akzeptanz- und Partizipationsforschung zu Energienachhaltigkeit  
**Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries** • Forschungsgruppe Umweltpsychologie (FG-UPSY) • IZES/Universität des Saarlandes/Außenstelle Universität Magdeburg  
 Irina Rau, Jan Zoellner • FG-UPSY
- 145 Der Wert interaktiver Energiepotenzialanalysen für Bürger am Beispiel des Projekts „Erneuerbar Komm“  
**Prof. Dr. Martina Klärle** • Fachhochschule Frankfurt a. M.  
 Ute Langendörfer • Fachhochschule Frankfurt a. M.
- **Abendvortrag**
- 150 Welt im Wandel – die „Große Transformation“  
**Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber** CBE • Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
- **Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien**
- 165 Standorte der Mitgliedsinstitute  
 166 Mitgliedsinstitute und Ansprechpartner  
 167 Impressum

# ■ Meilensteine der Transformation

- Grußwort Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
- Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems
- Offene Fragen zur Transformation des Energiesystems
- Systemanalyse zur Transformation der Energiesysteme bis 2050

# Grußwort aus dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Professor Weber und Professor Eberhardt, ich bedanke mich für die freundliche Begrüßung und überbringe an Sie alle herzliche Grüße vom Minister Röttgen, der gern gekommen wäre, da ihm das Thema Förderung erneuerbarer Energien wirklich sehr am Herzen liegt.

Der FVEE und seine Institutionen spielen aus unserer Sicht eine zentrale Rolle bei der Entwicklung der erneuerbaren Energien. Ich denke, dass wir in Deutschland auf unsere Forschungslandschaft wirklich stolz sein können. Das ist auch und gerade zu merken, wenn man sich international umhört. Selbst in Polen, einem Land, das wir davon überzeugen möchten, dass Klimaschutz und der Ausbau der erneuerbaren Energien eine Erfolgsstrategie sind, wird anerkannt, dass Deutschland mit seinen führenden Instituten und Unternehmen eine klare „First Mover Advantage“ aufgebaut hat. Und in der Tat ist es genau so: Die Entwicklung der erneuerbaren Energien und auch das EEG wären ohne die Ergebnisse Ihrer Arbeit überhaupt nicht denkbar. Ich glaube, dass gerade dieses exzellente Netzwerk, das wir haben, ganz entscheidend ist und eine Grundlage unseres Erfolgs darstellt. Noch vor 20 Jahren waren die erneuerbaren Energien ein Nischenphänomen, 4 Prozent erneuerbare Energien im Strombereich, und inzwischen, im ersten Halbjahr 2011, 20 Prozent, d. h. eine Verfünfachung. Das ist ökologisch wie ökonomisch ein erheblicher Erfolg. Eine Analyse des BMU hat gezeigt, dass in den Krisen-jahren nach der Finanzwirtschaftskrise die beiden Sektoren Energieeffizienz und erneuerbare Energien in Deutschland zwei Sektoren waren, die weiterhin hohe Zuwachsraten verzeichneten, gegen den Trend.

Dennoch ist ein prüfender Blick sinnvoll, und das haben Sie sich in dieser Tagung ja auch vorgenommen. Ich finde das Thema dieser Veranstaltung ausgezeichnet gewählt – Transformation, genau darum geht es. Bisher haben wir uns dar-

auf ausgerichtet, möglichst viele Kilowattstunden aus erneuerbaren Energien zu produzieren. Aber es geht um mehr, um eine entscheidende Transformation unserer Energieversorgungssysteme, nicht nur der Ziele wegen. Natürlich haben wir ambitionierte Ziele. Wir haben uns im EEG vorgenommen, erneuerbare Energien zu verdoppeln, bis mindestens 35 Prozent bis 2020. Im Energiekonzept haben wir definiert, dass bis 2050 80 Prozent des Stromverbrauchs und 60 Prozent des Endenergieverbrauchs durch erneuerbare Energien gedeckt werden sollen. Und genauso wichtig ist der zweite Pfeiler, die Energieeffizienz. Hier haben wir uns ambitioniert 10 Prozent Stromeinsparung bis 2020 vorgenommen. Und trotz Ausstieg aus der Kernenergie wollen wir national das Treibhausgas-minderungsziel von 40 Prozent erreichen.

Insgesamt sind wir, gerade was den Ausbau von erneuerbare Energien angeht, auf einem sehr, sehr guten Weg, und ich habe ich keine Zweifel, dass wir, wenn wir konsequent vorgehen, die Ausbauziele erreichen können. Dennoch wird es bei der nächsten EEG-Novelle, nicht einfach darum gehen, ganz schnell die erneuerbare Energien auszubauen. Das entscheidende Thema, das vor uns liegt, und das ist wirklich auch ein Paradigmenwechsel, ist die Transformation hin zu einer neuen Energieversorgung. Wenn man sich die unterschiedlichen Bereiche anschaut, dann sieht man erst, wie grundlegend die Transformation ist. Die bestehende Energieversorgung im Strombereich ist relativ schlicht strukturiert. In der Nähe der Städte wurden Kraftwerke errichtet und das Netz bringt den Strom vom Kraftwerk zum Verbraucher. Das heißt, unsere Stromversorgung ist rein erzeugungsorientiert, der Verbraucher ist eigentlich nur Stromabnehmer. Kennzeichnend dafür sind aus meiner Sicht vier Bereiche, auf die ich hier näher eingehen will und die auch im Energiekonzept der Bundesregierung adressiert worden sind.



Dr. Urban Rid  
Bundesministerium für  
Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit  
(BMU)

[urban.rid@bmu.bund.de](mailto:urban.rid@bmu.bund.de)

Der erste Schritt in der anstehenden Transformation ist, dass das Thema **Effizienz** eine größere Rolle spielen muss als bisher. Wir werden sowohl im Strom- als auch im Wärmebereich unsere anspruchsvollen Ziele nur erreichen, wenn wir gleichzeitig Effizienzfortschritte machen. Zum einen spielt hier die Erzeugungsseite eine große Rolle. Die steigenden Rohstoffpreise geben zwar für die Energieversorgungsunternehmen einen gewissen Anreiz, mehr in Richtung Energieeffizienz zu tun, und es sind auch große technologische Fortschritte gemacht worden, siehe etwa das neue GuD-Kraftwerk in Irsching. Auf der anderen Seite ist das Emissionshandelssystem aber nicht der große Treiber, den wir erwartet hatten, aufgrund der zu vielen Zertifikate im System und der daraus resultierenden geringen Zertifikatepreise. Nun gibt es einige Puristen unter den Ökonomen - unter den Ökonomen gibt es besonders viele Puristen, stelle ich immer wieder fest – die sagen, dass außer Emissionshandel keine anderen Maßnahmen ergriffen werden sollten, dass also keine anderen Instrumente, kein EEG und keine KWK-Förderung, genutzt werden sollen. Führt man aber an, dass in diesem Fall das europäische Klimaziel auf 30 Prozent erhöht oder das Budget für die Tonnen im europäischen System gekürzt werden muss, dann hört der Purismus ganz schnell wieder auf.

Noch viel weniger betrachtet wird das Thema Stromeffizienz auf der Nachfrageseite, aus unserer Sicht ein Schlüsselthema. Hier haben wir bisher Förderinstrumente, die noch nicht richtig greifen. Deshalb glauben wir z. B., dass wir das bisherige KWK-Gesetz zu einem Stromeffizienzgesetz weiterentwickeln müssen. Ein Energiedienstleister, der bisher nur einfach Kilowattstunden verkauft, kann sich dann Einsparungen durch Beratung und durch Technologie genauso vergüten lassen wie die bisher durch Kernkraftwerke erzeugte Kilowattstunde. Das ist eine grundlegend andere Sichtweise, man betrachtet das System von der Verbraucherseite, stellt von der Verbraucherseite her die Effizienzfrage und sieht auf einmal viele mögliche technische, ökonomische und systemische Lösungen.

Ein weiterer entscheidender Sprung muss durch eine **verbesserte Systemintegration** erfolgen. Bisher waren erneuerbare Energien ein Nischenmodell, und es ging primär darum, höhere Pro-

zentsätze zu erreichen. Bei 4 Prozent spielt die Systemintegration auch praktisch keine Rolle. Bei 35, 50, 80 Prozent aber müssen erneuerbare Energien auch als Pfeiler der Stromversorgung funktionieren, Versorgungssicherheit und Netzstabilität gewährleisten und insgesamt ganz neue Funktionen im Gesamtsystem erfüllen. Das heißt, der quantitative Sprung von bisher vielleicht 5, 10, 15 Prozent auf 35 Prozent ist im Kern ein qualitativer Sprung, ein Systemsprung, der in seiner Dimension nicht zu unterschätzen ist. In der Konsequenz müssen Themen wie fluktuierende Stromerzeugung, deren Zusammenspiel mit einem flexiblen Kraftwerkspark und vieles mehr angegangen werden. Erste Schritte haben wir im EEG unternommen, in dem wir beispielsweise bei Biomasse und großen Biogasanlagen die Marktprämie eingeführt haben oder einen Flexibilitätsbonus geben für denjenigen, der Speicher oder einen zusätzlichen zweiten Generator errichtet. Weitere Schritte sind zum Beispiel im Bereich Wind erforderlich. Es wird in Zukunft nicht nur darum gehen, möglichst viele Kilowattstunden mit Wind zu erzielen, sondern viele Arbeitsstunden zu erreichen, um eine Stabilität der Stromerzeugung über die Zeit zu gewährleisten.

Um den neuen Herausforderungen zu begegnen, muss sich natürlich auch die konventionelle Stromversorgung ändern. Wenn ich auf Veranstaltungen zu erneuerbaren Energien spreche, dann bekomme ich immer zu hören, dass die konventionelle Stromwirtschaft sich ändern muss. Die klassische Kraftwerkswirtschaft wiederum erwartet, dass sich die erneuerbaren Energien anpassen. Beides stimmt und stimmt nicht – beide müssen grundlegende Systemänderungen vornehmen, damit ein funktionierendes und gleichzeitig kostengünstiges Gesamtsystem erreicht werden kann. Daran werden wir gemessen. Windkraftanlagen auf der Wiese oder Photovoltaikanlagen aufs Dach zu bauen, das kann jeder. Aber dieses Gesamtsystem als ein ineinandergreifendes und funktionierendes Räderwerk zu entwickeln, das Netzstabilität und Versorgungssicherheit gewährleistet, das ist der Schweiß der Edlen wert, und dafür brauchen wir Sie.

In vielen Bereichen sind grundlegende Transformationen erforderlich. So müssen sich Energieversorgungsunternehmen, die erkennbare Schwierigkeiten haben, aus der Kernenergie aus-



zusteigen, praktisch neu erfinden. Es geht nicht nur darum, ein paar Offshore-Windprojekte aufzukaufen, sondern darum, diese grundlegende Transformation zu vollziehen. So ist das BMU aktuell sehr skeptisch, ob die Diskussion um Kapazitätsmärkte wirklich zielführend ist. Wir befürchten, dass am Ende doch nur ein Kohle-EEG rauskommt, das ist nicht in unserem Sinne.

Der dritte Punkt, der absolut zentral ist, sind die sogenannten **intelligenten Netze**. Zunächst brauchen wir schlicht und ergreifend mehr Netzausbau. Das Thema scheint aber in den Köpfen der Menschen anzukommen, nach Fukushima hat sich in der Akzeptanz der Bevölkerung für den Netzausbau etwas verändert. Weitgehend unterschätzt ist aus meiner Sicht aber der Bedarf, der Ausbaubedarf auf der Verteilnetzebene. Hier sind Milliardeninvestitionen notwendig. Vor allem in Süddeutschland ist es so, dass durch die Photovoltaik auf die süddeutschen Bundesländer große Aufgaben zukommen. Ich glaube, dass die Photovoltaik hier eine Schlüsselrolle einnimmt. Die gute Nachricht hier ist natürlich, dass die Preise deutlich gesunken sind, was für die Unternehmen, die die Wafer und Paneele herstellen, nicht ganz so erfreulich ist. Aber gesamtwirtschaftlich, für die EEG-Umlage, ist das eine positive Entwicklung. Die Herausforderung ist es nun, das EEG so weiterzuentwickeln, dass es in ein Gesamtsystem passt. Ob da allein Eigenverbrauch und Batterien die richtigen Antworten sind, wage ich noch zu bezweifeln. Und wir setzen hier große Hoffnungen in Sie alle, dass Ihnen hier noch viel einfällt, wie wir diese enorme und gute und positive Entwicklung bei Photovoltaik nutzen können, um zu einer besseren System- und Netzverträglichkeit zu kommen.

Last but not least müssen wir das Thema **Kosteneffizienz** betrachten. Bei der nächsten EEG-Novelle wird es um Strompreise gehen müssen. Kosteneffizienz ist das Thema, das über die Akzeptanz der Energiewende und die Akzeptanz des Ausbaus der erneuerbaren Energien entscheidet. Wir hatten in letzter Zeit viele Diskussionen über die EEG-Umlage und über die Kosten der Förderung von erneuerbarem Strom. Mich hat schon erstaunt, welche Botschaften hier vermittelt wurden – die meisten davon übrigens falsch. Die EEG-Umlage wird nicht so stark steigen, wie in der Presse verlautbart. Andererseits müssen wir

natürlich klar sehen, dass ein so großer Ausbau nicht kostenlos zu haben ist. Er ist eine Investition in die Zukunft und nicht umsonst zu haben. Wir müssen einen moderaten Anstieg akzeptieren, können aber nicht einfach die Größenordnung sprengen. Eine exponentielle Steigerung der Kostenkurve wird die Akzeptanz für erneuerbare Energien beenden. Deshalb ist einer unserer entscheidenden Schwerpunkte in Forschung und Entwicklung das Thema der Kosteneffizienz.

Bei der Förderung von Forschung und Entwicklung hat sich die Bundesregierung insgesamt sehr bemüht, oft sogar ressortübergreifend. Beispielsweise haben wir mit der gemeinsamen Förderinitiative Energiespeicher 2011 einen besonderen inhaltlichen Schwerpunkt gesetzt. Auch im Bereich Netze ist eine solche ressortübergreifende Förderkooperation geplant.

Wir haben in vielen Bereichen enorme Erfolge erzielt, etwa im Offshore-Bereich, wo wir mittlerweile 40 Kilometer vor der Küste und 40 Meter tief im Wasser Anlagen errichten, mit immensen technologischen und logistischen Herausforderungen. Ich denke z. B. an Alpha Ventus, das Offshore-Testfeld, und die Forschungsplattformen, die das BMU in erheblichem Maße gefördert hat, oder an die Forschungsarbeiten an neuen Windrotoren, die nicht nur die Kilowattstunden, sondern auch die Arbeitsstunden optimieren für eine gleichmäßigere zeitliche Verteilung.

Diese deutsche Spitzenposition ist nicht selbstverständlich. Im Bereich der Photovoltaik haben wir gesehen, dass es Unternehmen gibt, die sich sehr gut entwickelt haben. Aber wir müssen uns eingestehen, dass wir in dieser Technologie doch zumindest teilweise die Technologieführerschaft verloren haben, und wir müssen uns darüber Gedanken machen, was erforderlich ist, dass sich das wieder ändert. Zwar liegt das Problem hier aus meiner Sicht nicht an der Forschung, sondern eher an der Umsetzung in den Unternehmen, die über die Jahre einen relativ geringen Anteil an Forschungsinvestitionen getätigt haben. Aber insgesamt zeigt uns die Entwicklung in der PV deutlich, dass Technologieführerschaft im Bereich der erneuerbaren Energien keine Selbstverständlichkeit ist, und dass Forschung essentiell ist.

Ich denke, dass das neue Energieforschungsprogramm der Bundesregierung hier die richtigen Prioritäten setzt. Von 2011 bis 2014 wird die Bundesregierung für die Energieforschung 3,5 Milliarden Euro ausgeben, davon allein 1,3 Milliarden für erneuerbare Energien - eine drastische Steigerung der verfügbaren Mittel. Und die 2011 gestartete Förderinitiative Energiespeicher mit 200 Millionen Euro Fördersumme berücksichtigt auch die systemische, integrative Sicht. Wir erleben hier eine rege Nachfrage, mit vielen Alternativen auf dem Prüfstand, von Druckluft über Batterien über die viel diskutierte Methanisierung von Windenergie und das Pumpspeicherwerk im Bergwerk. Nur sollte man hier ein realistisches Bild haben: Speicher sind nicht der größte Bedarf der nächsten Jahre. Natürlich gibt es Energiespitzen, aber das sind wenige Zeiten. Und wir werden dann sicher auch sowohl im Norden Richtung Norwegen als auch in Richtung Süden, Schweiz und Österreich, Pumpspeicherwerke nutzen können. Hierzu laufen Gespräche, z. B. auch von meinem Kollegen Detlef Dauke im Wirtschaftsministerium. Wir setzen darauf, dass die Ergebnisse aus diesem Speicherforschungsprogramm bald verfügbar sind.

Noch ein Punkt: Als ein, wenn Sie so wollen, Praktiker der Energiewende, einer der beiden Hauptautoren für das Energiekonzept, darf ich Ihnen sagen, was mir so am Herzen liegt: Die große Gesamttransformation des Energiesystems ist das eine. Jetzt und die nächsten Jahre interessiert uns aber auch sehr, wie genau die Schrittfolge aussieht. Was kommt als erstes, was danach? Wie gehen wir zum Beispiel genau bei Speichern vor? Wie gehen wir vor mit dem Thema PV, Netze, Verteilnetze? Es ist eine Sache, eine schöne neue Welt zu beschreiben, 2050 mit 80 oder 100 Prozent erneuerbare Energien. Aber als jemand, der täglich mit diesen Dingen zu tun hat, interessiert mich auch sehr, wie eine vernünftige Schrittfolge aussieht. Gerade hier sind wir für Ihren Input dankbar. Sie haben uns bisher sehr unterstützt und können es weiter tun, dafür sind wir Ihnen sehr dankbar.

Minister Röttgen hat mich einmal gefragt, wie das europäische Ausland auf unsere Energiewende reagiert. Ich habe gesagt, nicht wenige glauben, jetzt sind die Deutschen endgültig verrückt geworden, dass sie aus der Kernenergie

aussteigen und parallel richtigen Klimaschutz weitermachen. Aber es gibt auch eine andere Fraktion, die sagt, jetzt müssen wir doch mal anpassen. Wenn Deutschland eine so grundlegende Wende vollzieht, dann kann das wirklich etwas werden. Wenn wir das verpassen, dann ist es auch schlecht für uns. Ich glaube, das ist nicht übertrieben, die Welt schaut auf uns. Entscheidend ist, dass die Energiewende technisch, ökonomisch und im Gesamtsystem funktioniert und uns die Kosten nicht aus dem Ruder laufen. Dafür setzen wir auch wesentlich auf Sie.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

# Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems

Sehr geehrte Damen und Herren,

ich danke Ihnen herzlich für Ihre Einladung zur diesjährigen Jahrestagung.

Ihr Thema, die „Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem“, ist für die Bundesregierung ein politisch bedeutsames Thema. Für das Bundesministerium für Bildung und Forschung ist es **das** zentrale Forschungsfeld der Zukunft. Daher habe ich Ihre Einladung sehr gerne angenommen.

Albert Einstein stellte einmal in allgemeiner Form zur Zukunft fest:

*„Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich zu leben.“*

Energie ist eine der zentralen Zukunftsfragen. Die vor uns stehende Energiewende ist eine Zukunfts- und Gestaltungsaufgabe, die wir nur mit Beiträgen aus Wissenschaft und Forschung lösen können.

Die schrecklichen Ereignisse in Japan mit den Kernschmelzen in Fukushima haben einen neuen politischen Grundkonsens in Deutschland geschaffen. Wir werden die Nutzung der Kernenergie in Deutschland bis zum Jahr 2022 beenden. Und wir haben einen weiteren Grundkonsens hinzugefügt: Nach der jahrelangen politischen Auseinandersetzung um die Frage des richtigen Zeitpunkts für das Ende der Kernenergie besteht jetzt die Chance, die Energiepolitik auf einer breiten gesellschaftlichen Grundlage über Legislaturperioden hinaus auszurichten. Bis zum Jahr 2050 sollen die Erneuerbaren einen Anteil von 80 Prozent am Bruttostromverbrauch haben. Damit schaffen wir verlässliche Rahmenbedingungen für künftige Investitionen.

Das Energiekonzept 2050 der Bundesregierung ist auch eine Leitmaxime für die künftige Forschungsförderung. Hierin sind sich alle beteiligten Ressorts in den Ministerien einig. Dieses gemeinsame Verständnis prägt unsere Zusammenarbeit in der Energieforschung. Denn der Forschungsbedarf muss sich an den gesteckten Zielen orientieren.

Mit dem Energiekonzept der Bundesregierung und der damit verbundenen Perspektive bis zum Jahr 2050 hat die Politik völlig neue Zeiträume in den Blick genommen. Kurzfristdenken wird ersetzt durch einen generationenübergreifenden Politikansatz. Ich freue mich, dass der FVEE diesen Langfristansatz unterstützt.

Der Weg, den wir jetzt einschlagen, ist keineswegs ohne Risiken. Niemand sollte sich der Illusion hingeben, dass wir nur ein paar Hebel umlegen müssen, um den Umbau des Energiesystems zu bewerkstelligen. Vor uns liegt ein jahrzehntelanger Prozess. Wir sollten uns deshalb hüten, zu glauben, wir wüssten genau, wie dieser Umstellungsprozess verläuft.

Der Umbau der Energieversorgung ist ein großes gesellschaftliches Experiment. Wir werden diese Herausforderung nur bewältigen, wenn wir die Gestaltung der Energiewende als wirkliche Gemeinschaftsaufgabe verstehen. Versorgungssicherheit, Schutz des Klimas und Minimierung der Kostenlast sind die zentralen Themen, die es gilt, gleichzeitig in den Griff zu bekommen. Daher ist die Zusammenführung von technologischen und gesellschaftlichen Ansätzen eine Voraussetzung für den Erfolg.

Mit Blick auf den Umbau der Energieversorgung stellen Sie in Ihrer Übersicht zu den Tagungsvorträgen – wie ich finde sehr zutreffend – fest, dass es nicht nur um einen Quantitätszuwachs bei den



Dr. Georg Schütte  
Staatssekretär  
Bundesministerium für  
Bildung und Forschung

[georg.schuette@bmbf.bund.de](mailto:georg.schuette@bmbf.bund.de)

erneuerbaren Energien geht. Vielmehr bedeutet die Energiewende einen vollständigen Umbau des gegenwärtigen Energiesystems in technischer, wirtschaftlicher, rechtlicher und gesellschaftlicher Hinsicht.

Dieser Umbau des Energiesystems wird sich in vielen Bereichen niederschlagen: wir brauchen neue Technologien zur Stromerzeugung, die Energieverteilung wird nach neuen Mustern erfolgen, die Preisbildung wird nach anderen Regeln erfolgen, das Konsumentenverhalten wird sich verändern – um nur einige Beispiele zu benennen. FVEE und WBGU charakterisieren diesen Prozess unter Bezugnahme auf Karl Polanyi als „Transformation“.

An dieser Stelle möchte ich dem WBGU meinen Dank für sein Gutachten „Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation“ aussprechen. Lassen Sie mich an dieser Stelle eines hervorheben: Das Gutachten betont insbesondere die kritische Rolle der Wissenschaft beim Aufbau nachhaltiger Industriegesellschaften.

Diese neue Bedeutung kann ich seitens des BMBF nur nachdrücklich bekräftigen. Wir sind fest davon überzeugt, dass im Umbauprozess Wissenschaft und Forschung eine Hauptrolle spielen. Für die Energiewende sind Wirtschaft, Gesellschaft und Politik auf die wissenschaftliche Expertise angewiesen. Die Wissenschaft ist Antreiber und Frühwarner zugleich. Als Frühwarner macht die Forschung rechtzeitig darauf aufmerksam, wo Entwicklungsbedarf besteht und als Antreiber setzt die Forschung neue Impulse für innovative Konzepte und Technologien. Dabei müssen wir mit unserer Forschung stärker als bisher an der Lebenswirklichkeit der Akteure ansetzen. Und: Wir müssen Bürgerinnen und Bürger dafür gewinnen, sich an der Gestaltung des Umbaus aktiv zu beteiligen. Wir brauchen daher auch den beschleunigten Transfer der Ergebnisse in den Alltag und die Anwendung.

Deutschland hat nach Ansicht der Ethikkommission „Sichere Energieversorgung“ die Möglichkeit, Kernenergie innerhalb einer Dekade durch risikoärmere Technologien ökologisch, wirtschaftlich und sozial verträglich zu ersetzen.

Mit den Kabinettsbeschlüssen vom 6. Juni 2011 haben wir den schrittweisen Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022 beschlossen. Der Bundestag hatte bereits am 30. Juni die Novelle des Atomgesetzes beschlossen. Ebenfalls haben wir weitere Regelungen und Maßnahmen verabschiedet, die diesen Prozess beschleunigen sollen. Der Bundesrat hat dem Energiepaket am 8. Juli ebenfalls zugestimmt.

Für eine wirksame Energiewende schlagen die Expertinnen und Experten der Ethikkommission eine systematische Begleitung des Prozesses vor: mit umfassenden wissenschaftlichen Analysen, Bewertungen und Handlungsempfehlungen in den verschiedenen Phasen.

Der FVEE hat anlässlich des Berichts der Ethikkommission ebenfalls die Notwendigkeit einer wissenschaftlichen, technologischen und systemanalytischen Begleitung der Energiewende betont. Sie, lieber Herr Professor Eberhardt, haben ein kontinuierliches systemanalytisches Monitoring des Umbaus als erforderlich für den rascheren Ausstieg eingeschätzt.

Ihre Einschätzung teile ich nachdrücklich. Ich begrüße es sehr, dass Sie – Ihre Worte aufgreifend – die „strategische Orientierung der Bundesregierung“ unterstützen und als „treibende Kraft“ wirken wollen.

Die Bundesregierung hat bereits in ihrem Energiekonzept 2050 ein „Monitoring“ zur Umsetzung des Energiekonzeptes vorgesehen. Das Kabinett wird am 19. Oktober einen Beschluss zu einem „Monitoring-Prozess“ verabschieden. Hiermit werden wir die Umsetzung des Maßnahmenprogramms überprüfen, um bei Bedarf nachsteuern zu können. Wir planen, jährlich einen Monitoring-Bericht und alle drei Jahre einen Fortschrittsbericht vorzulegen. Hierin sollen quantitative Angaben zu zentralen Bereichen – etwa dem Anteil der erneuerbaren Energien, der Absenkung des Primärenergie- und Stromverbrauchs, der Entwicklung des Netzausbaus oder zu Energiepreisen – enthalten sein.

Aus Sicht des BMBF ist es darüber hinaus jedoch besonders wichtig, dass wir dieses Bild durch Optionen und Szenarien ergänzen oder Varianten durchspielen und Alternativen aufzeigen. Hierin

sehe ich einen Mehrwert. Dies ist eine originäre Aufgabe für Wissenschaft und Forschung. Dafür sind die gegenwärtige Situation und die künftige Entwicklung des gesamten Energiesystems besser abzubilden. Das ist für mich eine der zentralen Erkenntnisse des Energiewendeprozesses. Künftig geht es also weniger um Einzelantworten als vielmehr um die Organisation von Prozessen, die aufeinander aufbauend alternative Lösungsmodelle anbieten. In der Energieforschung sind stärker als bisher von vorneherein technologische, ökonomische und gesellschaftliche Fragestellungen in einem Gesamtsystem zu bearbeiten. Unser Anspruch ist es, das Zusammenwirken aller Technologien und Komponenten im Wechselspiel von Ökonomie, Umwelt/Ökologie und Gesellschaft aufzuzeigen. Damit schaffen wir die Basis für zukunfts- und richtungsweisende Entscheidungen, die letztendlich auch gesellschaftstauglich sind.

Dieses Forschungsfeld bildet einen besonderen Schwerpunkt für das BMBF im 6. Energieforschungsprogramm. Mit dem Energieforschungsprogramm legen wir zugleich unsere neue Forschungsagenda vor. Gerne möchte ich an dieser Stelle – neben der bereits erwähnten Systemforschung – vier weitere Aktionsfelder hervorheben:

1. Es geht um Technologiesprünge insbesondere bei der Entwicklung von elektrischen Speichern und neuen, leistungsfähigen Netzen. BMBF, BMU und BMWi haben sich hier auf ressortübergreifende Initiativen verständigt. Die drei Ressorts fördern zunächst mit 200 Mio. Euro bis 2014 die Entwicklung neuer Speicher. Ein Programm für die Netze folgt im nächsten Jahr.
2. Ohne entscheidende Fortschritte bei der Verbesserung der Energieeffizienz wird die Energiewende kaum zu bewältigen sein. Auch hier ist Forschung in besonderem Maße gefragt. Es geht um
  - die Intensivierung der Materialforschung als Basis für bessere Technologien von Windrädern über Dünnschichtverfahren bei Photovoltaik bis hin zu Dämmmaterialien bei Häusern und
  - eine Effizienzsteigerung auf der Erzeugerseite bei Kohle- und Gastkraftwerken sowie der Entwicklung einer neuen Generation

verbrauchsarmer Geräte für den Endverbraucher.

3. Bei den erneuerbaren Energien geht es vor allem um die Optimierung bestehender Verfahren: Zum Beispiel bei der Entwicklung von Windanlagen, die zusätzliche Systemdienstleistungen für Netze erbringen. Es geht um eine nahtlose Integration der Erneuerbaren in das Energiesystem.
4. Da wir nicht wissen können, ob das, was wir uns jetzt vornehmen, so gelingt wie geplant, brauchen wir in der Grundlagenforschung einen breiten Ansatz, der nicht nur dem Mainstream folgt. Deshalb werden wir uns bemühen, auch in „Plan B-Kategorien“ zu denken und Freiräume zu lassen, um Alternativen denken zu können. Daher werden wir eine „Ideenwerkstatt“ einrichten.

Mit den Empfehlungen „Forschungsziele 2011. Gemeinsam forschen für die Energie der Zukunft“ hat der FVEE einen wertvollen Input für die Gestaltung der neuen Forschungsagenda und des 6. Energieforschungsprogramms geleistet. Hierfür danke ich Ihnen.

Das BMBF hat als eine Konsequenz aus den Ereignissen von Fukushima und den Kabinettsbeschlüssen zur Energiewende vom 6. Juni 2011 den Bürgerdialog „Energietechnologien für die Zukunft“ ins Leben gerufen.

Herr Dr. Stadermann, Sie selbst haben als Experte bei unserer Auftaktveranstaltung in Berlin teilgenommen. Sie sind auch Mitglied des wissenschaftlichen Beirates zum Bürgerdialog. Für Ihr persönliches Engagement und Ihren tatkräftigen Einsatz möchte ich Ihnen ganz herzlich danken – auch im Namen von Frau Ministerin Schavan! Wir haben mit dem Bürgerdialog „Energietechnologien“ einen ersten Schritt in Richtung neuer Partizipations- und Kommunikationsprozesse in der Energieforschungspolitik unternommen. Damit betreten wir Neuland. Ich bin überzeugt: Für den Erfolg der Energiewende brauchen wir mehr von solchen neuen Wegen der Einbindung von Bürgerinnen und Bürgern. Dabei geht es nicht darum, politische Entscheidungen (nachträglich) zu legitimieren. Ziel des Dialogs ist eine offene Debatte zwischen Bürgern, Wissenschaft,

Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik über die Gestaltung der Prozesse. Dabei werden gemeinsam Fragen, Erwartungen und Bedenken zu technologischen und gesellschaftlichen Aspekten der zukünftigen Energieversorgung diskutiert. Es geht dabei um Fragen wie:

- Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit auch die vor Ort Betroffenen dem Bau von Speichern und Trassen zustimmen, die für die Nutzung erneuerbarer Energien unabdingbar sind?
- Wieviel ist uns „sicherer“ und „sauberer“ Strom wert – als Verbraucherinnen und Verbraucher, als Unternehmer, als Arbeitnehmer in einer energieintensiven Volkswirtschaft?
- Wo sind wir im Alltag zu Verzicht oder zu einer Änderung unseres Lebensstils bereit?
- Welchen Themen und Schwerpunkten sollte sich die Energieforschung in Zukunft vor allem widmen?

Wissenschaft und Forschung übernimmt im Bürgerdialog eine zentrale Rolle: Sie steuern wissenschaftliche Ergebnisse und Fakten zur Energiewende bei. Mit diesen Informationen tragen Sie wesentlich zu einer Versachlichung der Debatte bei, wissenschaftliche Befunde zu Energieforschungsthemen werden transparent gemacht.

Kommunikation ist für mich eine wichtige Aufgabe der Wissenschaft im Zuge der Energiewende. Das ist nicht immer leicht, denn komplexe wissenschaftliche und theoretische Zusammenhänge sind allgemeinverständlich zu erklären. Aber wie meinte der neuseeländische Physiker Ernest Rutherford (1871–1937) einmal scherzhaft: „Eine gute wissenschaftliche Theorie sollte einer Bardame erklärbar sein!“ Erlauben Sie mir den Zusatz: Gleiches gilt auch für die Adressaten von wissenschaftlichen Berichten oder Gutachten!

Professor Rutherford leistete Pionierarbeiten Anfang des 20. Jahrhunderts im Bereich der Radioaktivität. Er führte den Begriff der Halbwertszeit ein. Im Jahr 1908 wurde er für diese Arbeiten mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.

Auch die Politik steht mit dem Bürgerdialog in einer besonderen Verantwortung. Das habe ich selbst bei meinen Gesprächen vor Ort erfahren. Die Bürgerinnen und Bürger möchten, dass ihre Vorschläge ernst genommen und von politisch Handelnden aufgegriffen werden. Für das BMBF kann ich sagen: Die Anregungen aus dem Bürgerdialog sollen Eingang in unsere Überlegungen zur Ausgestaltung unserer Forschungspolitik finden.

Im Rahmen einer Abschlussveranstaltung wird Ministerin Schavan Anfang November alle Empfehlungen als Bürgerreport entgegen nehmen.

Für das BMBF ist die Neuausrichtung der sozial-ökologischen Forschung (SÖF) ein entscheidender Pfeiler im Kontext der Energiewende. Die SÖF ist fester Bestandteil des Rahmenprogramms „Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA)“. Hiermit fördern wir Arbeiten, die einen Übergang von der Umweltforschung zur Nachhaltigkeitsforschung markieren. Die Einrichtung des Förderschwerpunktes geht auf Empfehlungen des Wissenschaftsrates (1994) und des WBGU (1996) zurück. Seither haben wir das Ziel verfolgt, verstärkt gesellschaftliche Aspekte in die Umweltforschung zu integrieren. Hierfür hat das BMBF bisher etwa 84 Mio. Euro bereitgestellt.

Mit unserer Forschungsförderung unterstützen wir den gesellschaftlichen Transformationsprozess in Richtung Nachhaltigkeit und das Capacity Building für eine inter- und transdisziplinäre Forschung.

Das Forschungsprogramm Sozial-ökologische Forschung (SÖF) greift dabei Themen und Probleme auf, für die ein Handlungsbedarf in der Gesellschaft besteht und die in einem engen Wechselverhältnis zwischen Wissenschaft und Gesellschaft definiert werden. Ich denke hier z. B. an den „Nachhaltigen Konsum“ oder die sozialen Dimensionen des Klimawandels. Als bisherige Erkenntnis haben wir gelernt: Nachhaltige Entwicklung ist nur zu erreichen, wenn naturwissenschaftlich-technische und soziale Innovationen ineinander greifen. Das Potenzial technischer Innovationen kann nur dann ausgeschöpft werden, wenn es mit Veränderungen individueller Verhaltensmuster einhergeht.

Hiervon ausgehend werden wir einen neuen SÖF-Schwerpunkt auf die gesellschaftlichen Dimensionen der Energiewende legen. Im Kern geht es um die Frage, wie die Transformation des Energiesystems umwelt- und gesellschaftsverträglich gelingen kann. Künftige Forschungsthemen aus unserer Sicht sind daher:

- Gesellschaftliche Voraussetzungen für die Akzeptanz des Transformationsprozesses
- Neue Dialog- und Partizipationsprozesse
- Analyse des Verhaltens der Akteure
- Zukunftsszenarien der Energiesysteme
- Gesellschaftliche Bedingungen des Transformationsprozesses

Hierzu planen wir zur Zeit den Aufbau eines neuen Förderschwerpunktes. In den nächsten Monaten werden wir dazu eine Förderbekanntmachung starten. Hierfür stellen wir für 3 Jahre bis zu 10 Mio. Euro bereit. Dies ist der Anfang. Weitere Initiativen werden in den Bereichen Systemanalyse und wissenschaftliche Begleitung der Energiewende folgen. Transdisziplinarität und systemische Betrachtungsweisen bilden dabei die Leitmaximen.

Sehr geehrte Damen und Herren,

eine wichtige Aufgabe wird darin liegen, die Kompetenzen der Wissenschaft auf die Energiewende auszurichten. Mit unseren Forschungsansätzen geht es in einem weiteren Sinne auch um Wissen, mit dem wir die Frage nach der „Demokratieverträglichkeit“ politischer Maßnahmen beantworten wollen.

Auch Regierung und Parlament werden künftig stärker als bisher in einen kontinuierlichen Diskurs- und Lernprozess eintreten, der sowohl national als auch grenzüberschreitend angelegt ist. Wissenschaft und Forschung müssen die Grundlage für den behutsamen Umbau von Wirtschaft und Gesellschaft schaffen. Nachhaltigkeit, Effizienz und Konsens sollten dabei unsere Leitlinien sein.

Langfristig geht es weit über unseren nationalen Blickwinkel hinaus. Es geht um die Umstellung eines kohlenstoffbasierten Weltwirtschaftsmodells auf eine zukunftsfähige, nachhaltige Lösung.

Deutschland erarbeitet sich mit der Umsetzung der Energiewende eine herausragende Expertise, die auch in anderen Ländern genutzt werden wird. Wir haben die Chance, jetzt die Technologien zu erforschen, zu entwickeln und anzuwenden, die über kurz oder lang überall in der Welt gefragt sein werden. Frau Ministerin Schavan hat dies unlängst auf ihrer Japanreise Anfang Oktober erfahren.

Mehrwertbringende internationale Kooperationen sowie die Ausgestaltung des 8. EU-Forschungsrahmenprogramms sind wichtige Betätigungsfelder, die wir in unserem Sinne für den Umbauprozess ausgestalten müssen.

Deutschland startet in ein neues Energiezeitalter. So mutig wie lange nicht schlägt unser Land in diesen Monaten einen neuen Weg zur Lösung einer der wichtigsten Zukunftsfragen ein. Der Umbau der Energieversorgung ist ein großes Gemeinschaftswerk, zu dem jeder seinen Beitrag leisten muss: Forschung und Wissenschaft, Industrie, Handel und Gewerbe, die Energieversorgungsunternehmen, der Staat, aber auch jeder einzelne Bürger.

Jeder einzelne von uns trägt somit Verantwortung für den Erfolg der Energiewende. Christian Morgenstern (1871–1914) kann dies viel schöner sagen, wenn er in allgemeiner Form feststellt:

*„Wenn jeder bei sich anfinge, wäre die schönste Zukunft gesichert.“*

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit und Ihnen allen eine erfolgreiche Jahrestagung!



### Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Eicke R.  
Weber  
eicke.weber@  
ise.fraunhofer.de

### IZES

Prof. Dr. Horst Altgeld  
altgeld@izes.de

### ISFH

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

### ZAE Bayern

Prof. Dr. Vladimir  
Dyakonov  
dyakonov@  
zae.uni-wuerzburg.de

### Fraunhofer IBP

Prof. Dr. Gerd Hauser  
gerd.hauser@  
ibp.fraunhofer.de

### GFZ

Prof. Dr. Ernst  
Huenges  
huenges@gfz-potsdam.de

### DLR

Michael Nast  
michael.nast@dlr.de

### FZJ

Prof. Dr. Uwe Rau  
u.rau@fz-juelich.de

### Fraunhofer IWES

Prof. Dr. Jürgen  
Schmid  
juergen.schmid@  
iwes.fraunhofer.de

### ZSW

Maïke Schmidt  
maïke.schmidt@zsw-bw.de

# Offene Fragen zur Transformation des Energiesystems

## Eine radikale Transformation des globalen Energiesystems ist erforderlich

Die Erschöpfung der fossilen Brennstoffreserven wird greifbar. So reichen die gesicherten Reserven beim Öl gemessen am heutigen Verbrauch noch 41 Jahre, beim Gas 67 Jahre, bei der Kohle 164 Jahre. Auch die Erschließung weiterer Reserven kann diese Frist nicht wesentlich verlängern wegen des dramatisch ansteigenden Energiebedarfs der Schwellenländer (*Abb. 1*).

Die Gefahr katastrophaler Veränderungen des Klimas wird heute als wissenschaftlich gesichert akzeptiert. Der 30jährige Temperaturmittelwert von 1960–1990 ist bereits um mehr als 0,6 °C überstiegen (*Abb. 2*).

Zudem hat Fukushima erneut die Unbeherrschbarkeit der Atomenergie gezeigt und die Verwundbarkeit der fossilen Energieversorgung ist durch die politischen Unruhen in wichtigen Förderländern in den letzten Jahren eher größer als kleiner geworden. Der einzig dauerhafte Ausweg ist eine möglichst rasche Transformation des globalen Energiesystems in eine auf nachhaltigen Energien basierende Gleichgewichtswirtschaft.

Dabei ist zu bedenken, dass diese Transformation Zeit braucht, zum Beispiel für die Entwicklung von Technologien, die Implementierung in den Märkten und die Bereitstellung der Investitionen. Nur die industrialisierten Länder haben aktuell die entsprechenden technischen und finanziellen Ressourcen, sie müssen deshalb vorangehen. Deutschland ist dafür besonders prädestiniert, da wir als eine weltweit führende Industrienation anerkannt sind und gleichzeitig der politische Wille zur Energiewende vorhanden ist.

Der Transformationsprozess darf aber die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit nicht ernsthaft beeinträchtigen, da sonst die entsprechenden finanziellen Ressourcen fehlen. Die Hauptfrage des Transformationsprozesses ist deshalb: Wie

kann unser Energiesystem möglichst schnell und kostengünstig auf die effiziente Nutzung von erneuerbaren Energien umgestellt werden?

Ziel sollte es sein, diese Umstellung so zu gestalten, dass die weiteren CO<sub>2</sub>-Emissionen im Rahmen eines Limits von 2 °C für die globale Erwärmung bleiben.

Zu dieser Hauptfrage der diesjährigen FVEE Jahrestagung haben wir für den Fall Deutschland exemplarisch einige Detailfragen erarbeitet. Sie werden in den Abschnitten Forschung, Politik, Energiewirtschaft, Akzeptanz und Partizipation dargestellt. Viele dieser Fragen werden in den Beiträgen dieses Bandes angesprochen.

## Offene Fragen in der Forschung

- Wie sieht der Ablauf des Transformationsprozesses aus, was sind seine Meilensteine, welche Szenarios gibt es?
- Welche Anteile haben die einzelnen Formen erneuerbarer Energien am zukünftigen Energiemix? Soll Photovoltaik und Windstrom zentral oder dezentral erzeugt werden? Welche Rolle spielen Importe?
- Welche Netze müssen wie stark ausgebaut werden: Mittelspannung, Hochspannung, Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ)?
- Welche Speichertechnologien sollen forciert werden, welche Volumina oder Standzeiten von Speichern brauchen wir?
- Wie groß ist der Anteil der Energieeffizienzsteigerung, wie sieht ihre zeitliche Abfolge aus, wie kann man sie möglichst kostengünstig einführen? Welche Technologien der energetischen Gebäudesanierung sind zu verwenden? Wie weit kann man erneuerbare Wärmequellen und Fernwärmenetze ausbauen?



- Wie kann Strom-, Wärme- und Verkehrssektor so gekoppelt werden, dass kosteneffizient ein möglichst hoher Anteil von erneuerbaren Energien erreicht wird?
- Akzeptanzfragen müssen wissenschaftlich untersucht werden, und es müssen Methoden und Vorgehensweisen identifiziert werden, die die Bürgerinnen und Bürger an der Energiewende beteiligen.

## Offene Fragen in der Politik

- Welche finanziellen, rechtlichen, sozialen und wirtschaftlichen Voraussetzungen sind für den Transformationsprozess erforderlich? Welche wirtschaftspolitischen Maßnahmen sind für ein optimales Zusammenspiel der erneuerbaren Energien und Effizienztechnologien erforderlich?
- Wie kann die energetische Sanierung des Altbaubestandes, die Integration und der regionale Zubau der erneuerbaren Energien so vorangetrieben werden, dass energieopti-

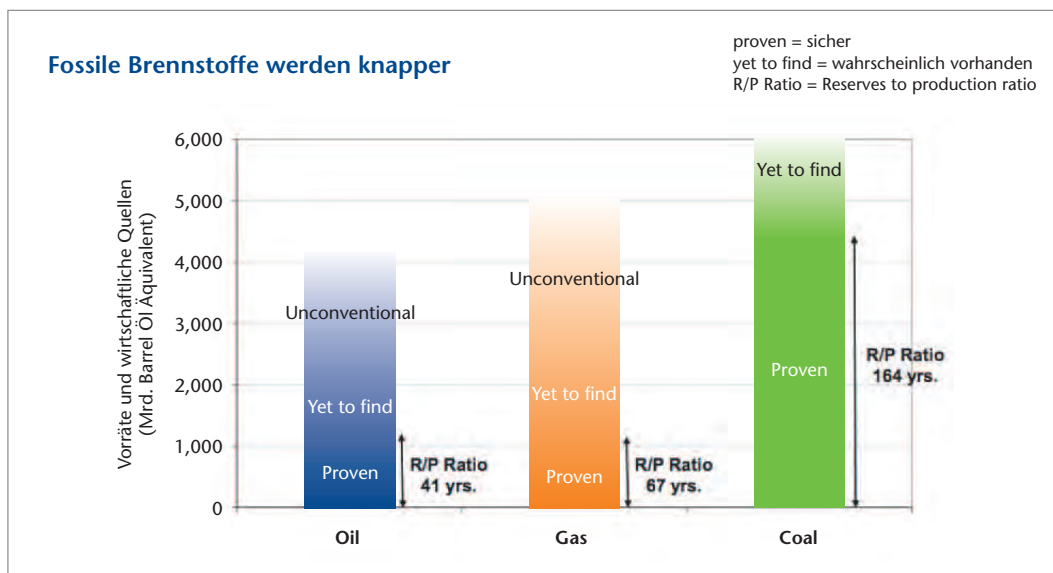


Abbildung 1

Fossile Reserven

Quelle: World Energy Assessment 2001, HIS, WoodMacKenzie, BP Stat Review 2005, BP estimates  
Graphik: Koonin BP

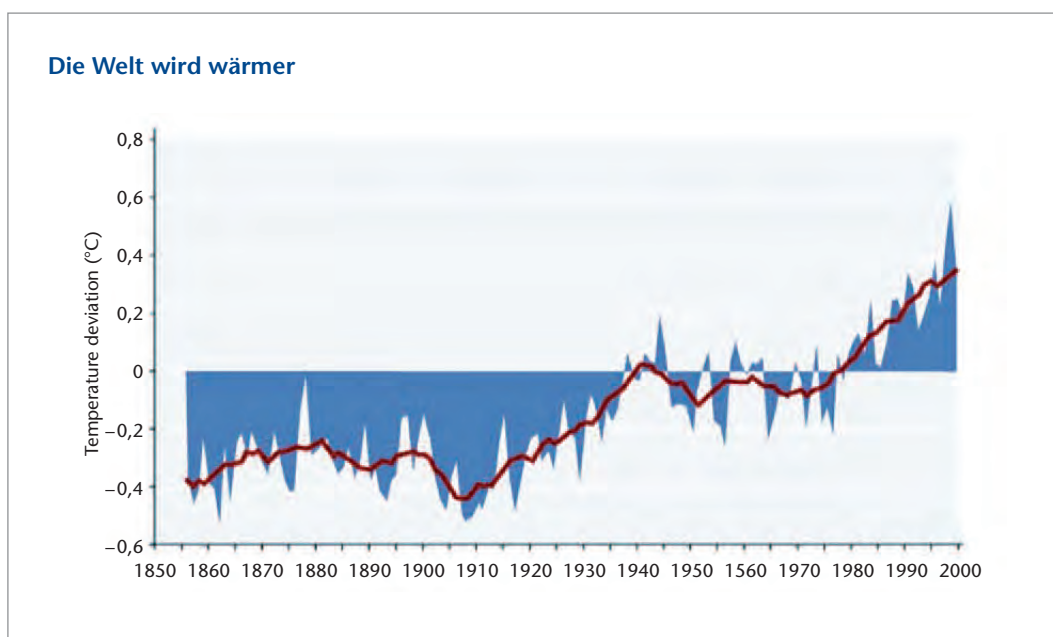


Abbildung 2

Klimaerwärmung: Angegeben ist die Abweichung der Jahresmitteltemperatur vom Mittelwert der Jahre 1960–1990. Die rote Kurve ist ein geglätteter Fit.

Quelle: UCAR

mierte Gemeinden, Städte und Regionen entstehen – Stichwort „Morgenstadt“?

- Wie kann die sich verstärkende Konkurrenz der verschiedenen erneuerbaren Technologien konstruktiv gehalten werden? Warum wird speziell die Photovoltaik systematisch angegriffen? Sie hat jetzt mit 17 Gigawatt deutlich geholfen, die unerwartete Abschaltung von acht AKW zu verkraften.
- Akzeptanzprobleme müssen erkannt und angesprochen werden, zum Beispiel Windräder, Solarfelder, Speicherkraftwerke, aber auch Datenschutz und Mikrowellenstrahlung beim Smart Grid.
- Wie kann die Kopplung von Forschung und Umsetzung in Technologien verbessert werden?

## Offene Fragen für die Energiewirtschaft

- Wie kann das Geschäftsmodell der großen Stromversorger so transformiert werden, dass es mit dem zunehmenden Ausbau dezentraler Einspeisung von erneuerbarem Strom harmoniert?
- Die Transformation braucht enorme Investitionen in Erzeugungs-, Verteilungs- und Speicherkapazitäten. Wie lässt sich das in einem Markt mit teilweise verschwindendem oder sogar negativem Strompreis sicherstellen? Wie kann Transparenz über den Bedarf an Stromtrassen geschaffen werden, damit alle notwendigen und nicht nur die wirtschaftlichsten Trassen gebaut werden?
- Wie kann der Bau von dezentralen Gaskraftwerken, bevorzugt als Blockheizkraftwerke, ermutigt werden? Diese Kraftwerke dienen ideal der Stabilisierung eines von zeitlich fluktuierender Einspeisung von Wind- und Sonnenenergie gekennzeichneten Netzes, und können später möglichst noch auf Biogas oder erneuerbares Methan umgestellt werden.
- Akzeptanzprobleme müssen auch von der Energiewirtschaft erkannt und in die Strategie einbezogen werden.
- Welche wirtschaftspolitischen Maßnahmen sind erforderlich für ein optimales Zusammenspiel der erneuerbaren Energien und Effizienztechnologien?

## Offene Fragen in der Akzeptanz und Partizipation

- Wie können die Bürger besser über den Transformationsprozess informiert werden? Welche Partizipationsmöglichkeiten gibt es dabei über die Aktivitäten als Investor, Betreiber und Verbraucher hinaus?
- Akzeptanzprobleme müssen erkannt und angesprochen werden, zum Beispiel Windräder, Solarfelder, Speicherkraftwerke, aber auch Datenschutz und Mikrowellenstrahlung beim Smart Grid.
- Sollten neue Modelle der Mitbestimmung und Einflussnahme durch betroffene Bürger entwickelt werden?

## Ausblick

Diese Fragen sind nur Beispiele und machen doch deutlich, wie viel nachzudenken und umzusetzen ist, wie radikal neu die Fragestellungen und wie dementsprechend groß die Unsicherheiten über den „richtigen“ Weg sind. Diese Unsicherheit bietet gleichzeitig die große Chance, in einem großen und mutigen Experiment der Welt ein Modell für nachhaltiges Wirtschaften zu geben.

Eine Sicherheit bleibt: das Licht am Ende unseres Tunnels ist die Sonne!

# Systemanalyse zur Transformation der Energiesysteme bis 2050

## 1. Klimaschutz und Transformation der Energiesysteme

Klimaschutz muss ein vorrangiges Ziel gegenwärtiger Politik sein. Denn nur durch die Begrenzung des durch den Menschen verursachten Klimawandels lassen sich die Lebensbedingungen auf der Erde, so wie wir sie kennen, aufrechterhalten. Es ist mittlerweile nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Politik ein weithin anerkanntes Ziel, eine globale Erwärmung von mehr als 2 °C zu vermeiden. Eine darüber hinausgehende Klimaerwärmung hätte sehr wahrscheinlich gefährliche irreversible und kaum beherrschbare Folgen für Natur und Gesellschaft. Um die 2 °C-Leitplanke einzuhalten ist aber eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen notwendig.

Dies betrifft insbesondere die Emissionen von CO<sub>2</sub>, dem wichtigsten durch menschliche Aktivi-

täten verstärkt in die Atmosphäre eingetragenen klimarelevanten Gas. Das Ausmaß der weiteren anthropogenen Klimaerwärmung hängt weitgehend davon ab, wie schnell es gelingt, die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Da die größte Emissionsquelle die Nutzung fossiler Brennstoffe für energetische Zwecke ist, kommt es wesentlich darauf an, diese zu reduzieren. Der vom WBGU entwickelte Budget-Ansatz [1] geht davon aus, dass bis zur Jahrhundertmitte höchstens noch etwa 750 Mrd. t CO<sub>2</sub> aus fossilen Quellen in die Atmosphäre eingetragen werden dürfen, wenn die 2 °C-Leitplanke mit einer Wahrscheinlichkeit von zwei Dritteln eingehalten werden soll. Nach 2050 dürften dann nur noch kleine Mengen CO<sub>2</sub> ausgestoßen werden. Die Zeit der von der Nutzung fossiler Energieträger angetriebenen Weltwirtschaft muss also noch in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts zu Ende gehen. Die dafür notwendigen energetischen Potenziale der Erneuerbaren und die Technologien für ihre Nutzung



**Fraunhofer IWES**

Prof. Dr. Jürgen Schmid

juergen.schmid@iwes.fraunhofer.de

**Dr. Matthias Günther**

matthias.guenther@iwes.fraunhofer.de

**ZSW**

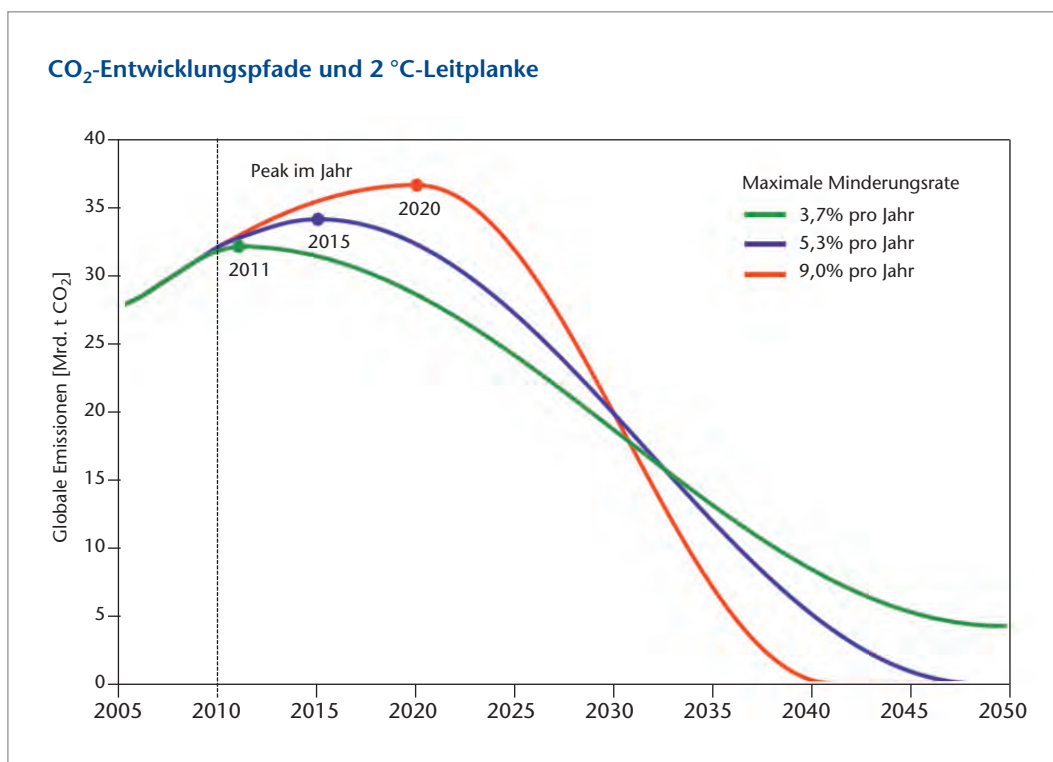
Prof. Dr. Frithjof Staiß

frithjof.staiss@zsw-bw.de

**DLR**

Dr. Thomas Pregger

thomas.pregger@dlr.de



**Abbildung 1**

Mögliche Entwicklung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit der Einhaltung der 2 °C-Leitplanke kompatibel sind. Je später der Reduktionspfad eingeschlagen wird, desto steiler wird die nachfolgende Verringerung der Emissionen erfolgen müssen.

Quelle: WBGU [1]

sind vorhanden. Die beiden grundlegenden Strategien hierfür sind konsequente Effizienzmaßnahmen und der dynamische Ausbau der Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien (EE).

Es ist wichtig, den Prozess der Dekarbonisierung der Wirtschaft allgemein und speziell der Energiesysteme so früh wie möglich konsequent voranzubringen. Je länger damit gewartet wird, desto steiler würden die CO<sub>2</sub>-Emissionen nachfolgend sinken müssen, um die 2 °C-Leitplanke doch noch einhalten zu können. *Abbildung 1* veranschaulicht dies.

Sehr große Minderungsraten sind aber in der Praxis oft nur schwer realisierbar, denn sie verlangen hohe Investitionen in kurzer Zeit und sind in vielen Fällen nur schwer mit den normalerweise recht langen Lebenszyklen von Energiesystemen vereinbar. Umso mehr kommt es daher darauf an, kohlenstoffarme Technologiepfade rasch und konsequent einzuschlagen.

Aufgrund der globalen Natur der Klimaveränderung ist dies eine globale Aufgabe. Einzelne Länder können und müssen dabei aber eine Vorreiterrolle spielen und dabei die wirtschaftliche und technisch-strukturelle Machbarkeit und Vorteilhaftigkeit aufzeigen. Deutschland bzw. Europa sollten die Dekarbonisierung der Wirtschaft und der Energiesysteme deshalb weiterhin vorantreiben. Dies war und ist zunächst mit hohen Investitionen und Mehrkosten bei der Energieerzeugung verbunden, doch mittel- und langfristig eröffnet eine solche Strategie im Gegensatz zu einer fossil-nuklearen Energieversorgung enorme wirtschaftliche Chancen.

Deutschland ist heute weitgehend abhängig von Energieimporten. Hinzu kommt, dass geografisch nahe liegende fossile Ressourcen an Ergiebigkeit verlieren. Die Ölförderung in der Nordsee ist in den letzten Jahren zurückgegangen; ebenso kann die eigene Stein- und Braunkohle immer weniger wirtschaftlich genutzt werden. Eine rechtzeitige Anpassung an die zunehmende Verknappung bzw. Verteuerung von fossilen Energierohstoffen ist folglich von langfristigem volkswirtschaftlichem Nutzen und wichtig für die Versorgungssicherheit.

Forschung und Entwicklung im Bereich der Energieeffizienz und der Nutzung erneuerbarer Energiequellen schaffen darüber hinaus Wettbe-

werbsvorteile in Zukunftsmärkten. Dieser Vorteil kann durch die Möglichkeit, als „first mover“ volkswirtschaftliche Vorleistungen für Nachahmer zu erbringen, leicht geschmälert werden, doch sollte dieser Aspekt nicht dazu führen, die vielfältigen Chancen der konsequenten Entwicklung von Zukunftstechnologien aus dem Blick zu verlieren.

Der weitere konsequente Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energie ist also nicht nur aufgrund der Klimaproblematik unerlässlich, sondern angesichts der sich verknappenden und verteuern fossilen Energierohstoffe auch volkswirtschaftlich und politisch geboten. Darüber hinaus wird das Energiesystem durch den Einsatz erneuerbarer Energien wesentlich effizienter, da der Einsatz von Primärenergie stark reduziert werden kann.

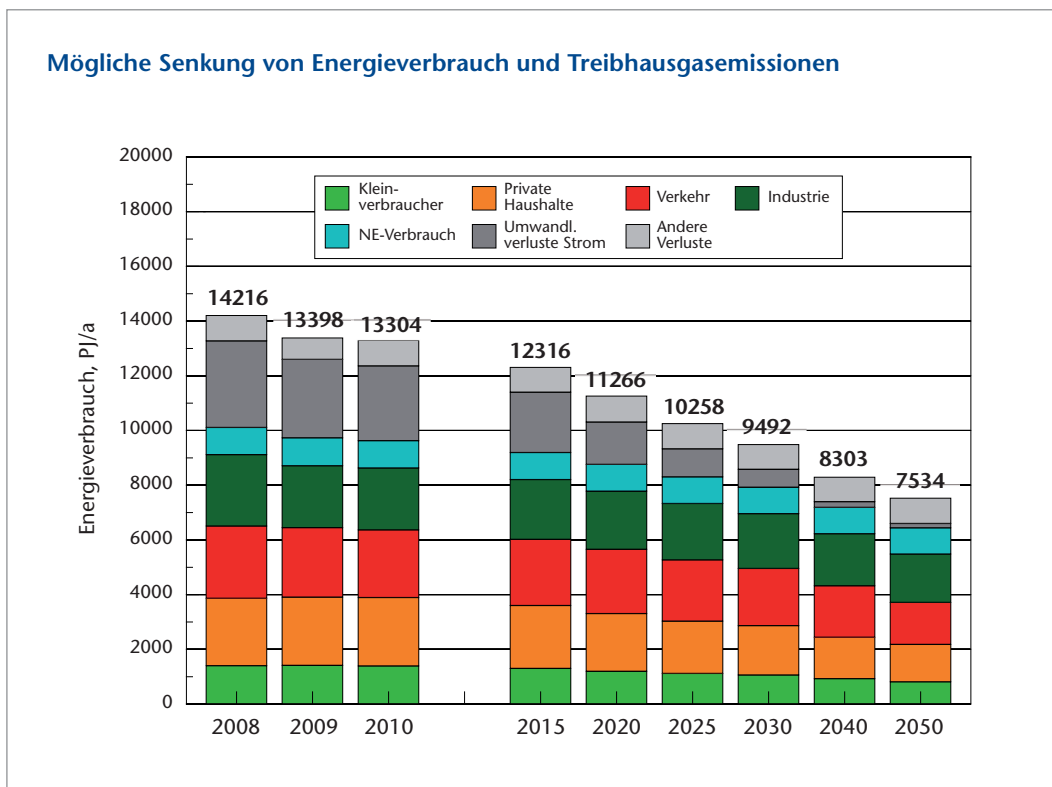
## 2. Ein Entwicklungspfad für Deutschland

Die Leitstudie 2010 für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland wurde von den FVEE-Instituten DLR und Fraunhofer IWES sowie vom Ingenieurbüro IfnE für das BMU verfasst [3]. Hier wird ein möglicher Entwicklungspfad des Energiesystems in Deutschland vorgestellt, der eine starke Reduktion der nationalen Treibhausemissionen bis 2050 ermöglicht.

Die Studie berücksichtigt insbesondere das klimapolitische Ziel des Energiekonzepts 2010 der Bundesregierung, die Treibhausgasemissionen um mindestens 80 % bis zum Jahr 2050 zu mindern (bezogen auf die Emissionen im Jahr 1990), was eine Minderung der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen um mindestens 85 % erfordert.

In der folgenden Grafik ist die Entwicklung der Primärenergie im zielerfüllenden Hauptszenario der Leitstudie 2010 aufgetragen, die 2050 nur noch 47 % der im Jahr 2008 aufgewandten Primärenergie beträgt.

Möglich wird die starke Reduktion des Primärenergiebedarfs einerseits durch Energieeffizienzmaßnahmen, die den Energieaufwand insbesondere auf der Konsumentenseite reduzieren. Andererseits kommt auf der Produzentenseite noch ein weiterer Effekt hinzu: die „automatische“ Verringerung des Primärenergieaufwands allein durch die Substitution fossiler Energien durch



**Abbildung 2**  
Möglicher Entwicklungspfad des Primärenergieaufwands in Deutschland, der bis zum Jahr 2050 zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 85 % und zu einer Verminderung der Treibhausgasemissionen überhaupt um 80 % führt (im Vergleich zu den Emissionen von 1990).

Quelle: Leitstudie 2010 [3]

Erneuerbare. Denn die erneuerbaren Quellen „verbrauchen“ sich nicht. Das heißt bei elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen kann Endenergie gleich Primärenergie gesetzt werden, weil es keine Umwandlungsverluste gibt, wie etwa bei der Wandlung chemischer Energie von fossilen Energieträgern in elektrische Energie.

Tatsächlich hängt ein ganz wesentlicher Teil der Reduktion des Primärenergieaufwands mit der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energiequellen und der damit vermiedenen Wärmeverluste (insbesondere der konventionellen Kondensationskraftwerke) zusammen. Wir wollen dies anhand möglicher Entwicklungspfade für die drei Sektoren Strom, Wärme und Verkehr darlegen.

### Stromsektor

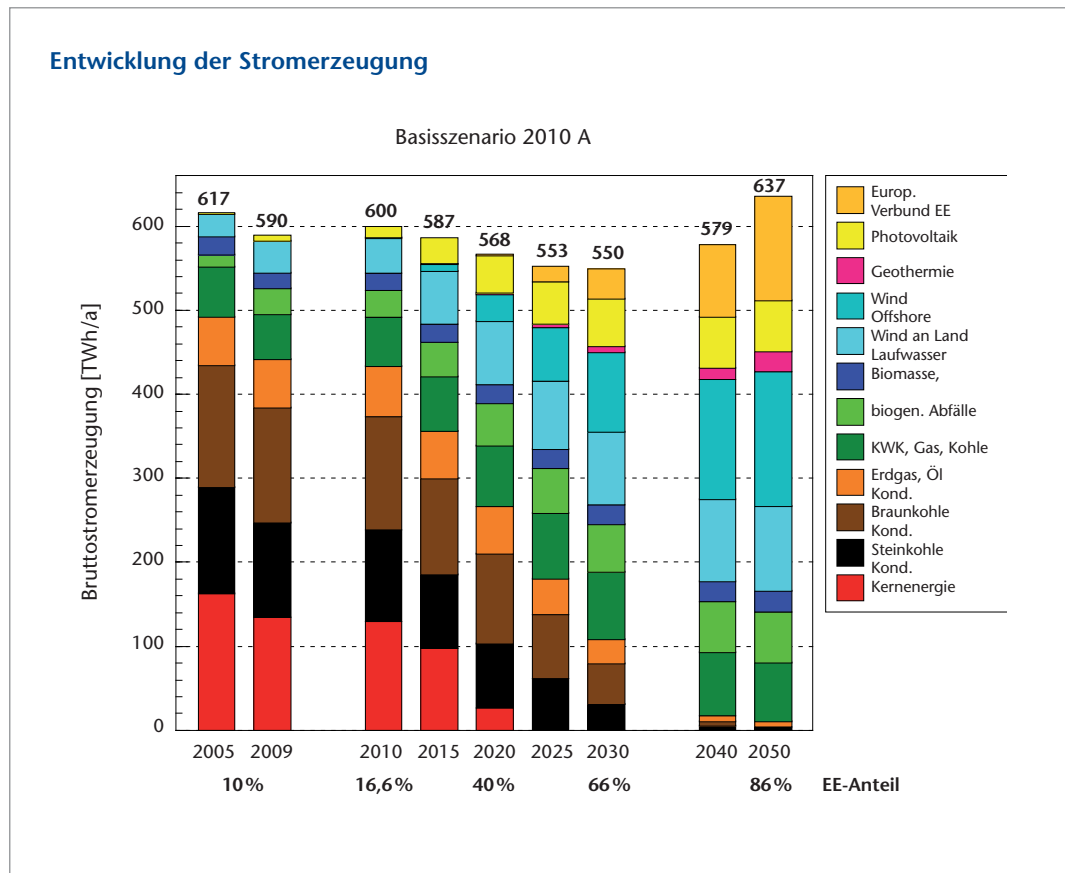
Abbildung 3 zeigt die strukturelle Entwicklung der Stromerzeugung bis 2050 aus der Leitstudie 2010 [3]. Sie ist vor allem durch die starke Zunahme der Stromerzeugung auf der Basis von erneuerbaren Energiequellen gekennzeichnet. 86 % des Stroms würde demnach im Jahr 2050 aus erneuerbaren Quellen stammen, was die im Energiekonzept der Bundesregierung vorgegebene

Zielvorgabe eines Anteils von mindestens 80 % der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen am Bruttostromverbrauch im Jahr 2050 erfüllt [2]. Gleichzeitig werden die großen Kondensations-Grundlastkraftwerke nahezu vollständig verschwinden. Dies betrifft Kernkraftwerke, die in Deutschland nach neuer Beschlusslage der Bundesregierung bis 2022 vollständig vom Netz gehen sollen; es betrifft aber auch Kohlekraftwerke. In der neuen Erzeugungsstruktur mit immer größeren Anteilen fluktuierender Quellen sind Grundlastkraftwerke, auf denen unsere Stromerzeugung bislang zu einem großen Teil beruht, bei dauerhaftem Einspeisevorrang der Erneuerbaren nicht mehr oder nur noch eingeschränkt ökonomisch zu betreiben und es kommt zum Systemkonflikt durch lokale Netzengpässe. Auf Gas und Kohle basierte Stromerzeugung wird demnach im Jahre 2050 nur noch in geringerem Umfang in der Form von effizienter Kraft-Wärme-Kopplung betrieben.

Nach dem dargestellten Szenario wird ein großer Anteil der Stromerzeugung in Deutschland auf der Nutzung der Windenergie (onshore und offshore) beruhen. Photovoltaik wird ebenso einen wachsenden Beitrag leisten können. Fossil

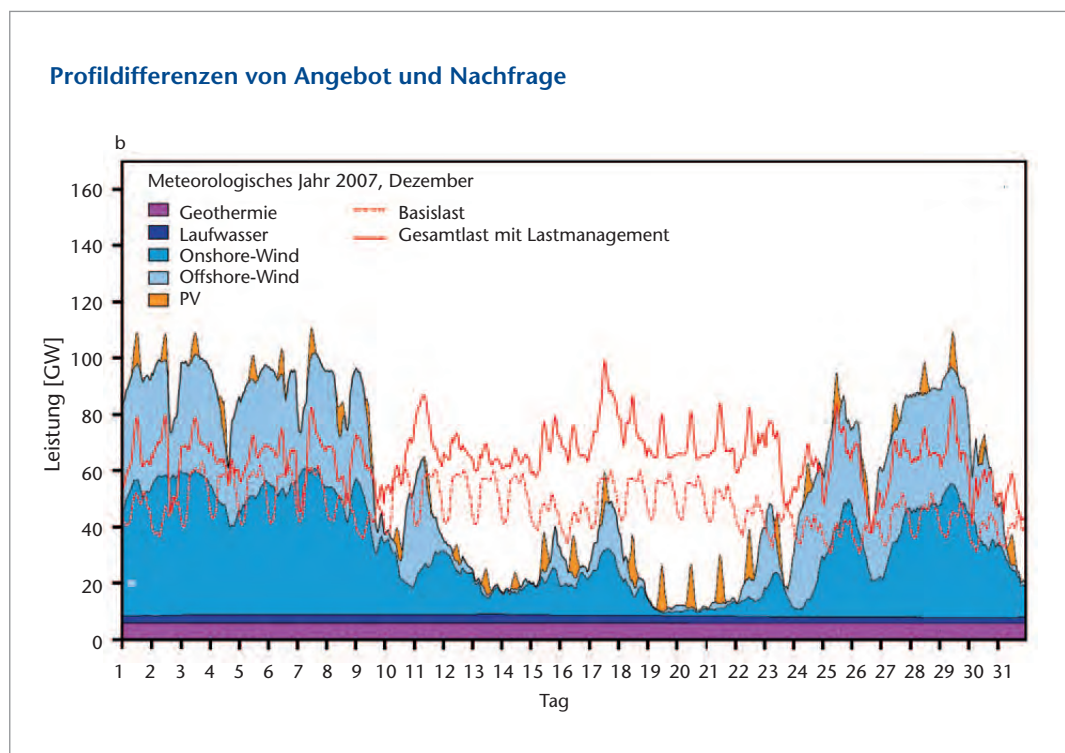
**Abbildung 3**  
Möglicher Entwicklungspfad der Bruttostromerzeugung in Deutschland (einschließlich des Strombezugs aus dem Ausland) mit einem Anteil von Strom aus Erneuerbaren von 86% im Jahre 2050.

Quelle: Leitstudie 2010 [3]



**Abbildung 4**  
Simulierte Einspeisung aus erneuerbaren Energien (farbige Flächen) projiziert auf 2050 unter Annahme weite- ren kräftigen Ausbaus der Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Das Energiesystem muss Mittel haben, trotz dieser starken Schwankungen eine sichere Stromversorgung zu gewährleisten.

Quelle: Klaus et al. 2010 [4]



basierte Kraft-Wärme-Kopplung und Biomasse-Kraftwerke werden begrenzt an der Stromproduktion teilhaben, im Falle der Biomasse aufgrund der begrenzten nachhaltigen Potenziale.

Beruhet die Stromerzeugung weitgehend auf fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen, dann tritt das Problem auf, dass die fluktuierende Stromerzeugung eine Nachfrage bedienen soll, die ihrem eigenen zeitlichen Rhythmus folgt. Dabei kann es temporär sowohl zu einem Energieüberangebot als auch zu einem Unterangebot kommen (siehe *Abbildung 4*).

Momentan beträgt die installierte Leistung der Windkraft und der Photovoltaik in Deutschland etwa 50 GW, während die maximal nachgefragte Last etwa bei etwa 80 GW liegt. Beim weiteren Ausbau der Nutzung von Wind- und Solarenergie, so wie er im Nationalen Aktionsplan für erneuerbare Energie der Bundesregierung eingeplant ist, wird die installierte Leistung bald die genannte Höchstlast überschreiten, so dass es schon bald zu Überangebotsperioden kommen kann. Ebenso wird es dargebotsabhängig auch zu mehrtägigen Episoden mit keiner oder nur sehr geringer erneuerbaren Erzeugung kommen. In einem Stromerzeugungssystem, das langfristig vorrangig auf Wind und Sonne beruht, müssen deshalb Wege gefunden werden, genügend gesicherte Leistung auch bei geringem oder fehlendem EE-Angebot bereitzustellen, ebenso muss ein überschüssiges Angebot in geeigneten Anlagen zwischengespeichert oder genutzt werden können. Eine Herausforderung hierbei stellen die recht starken Gradienten in der Verfügbarkeit erneuerbarer Energiequellen dar, die den Einsatz entsprechend schnell reagierender Ausgleichsmechanismen erforderlich machen.

Zumindest für eine Übergangszeit werden flexible Gaskraftwerke, zunehmend mit Kraft-Wärme-Kopplung, eine große Rolle beim Ausgleich des fluktuierenden Angebots von Wind- und Solarstrom spielen. Ebenso kann eine große Anzahl von kleinen Systemen der Objektversorgung wie Blockheizkraftwerke, Mikroturbinen und Brennstoffzellen dazu beitragen, gegebenenfalls auftretende Stromlücken zu schließen.

Ein langfristig wichtiger Teil der Lösung wird auch der zunehmende Ausbau eines weitreichenden Verbundnetzes zum Austausch von Strom aus erneuerbaren Energien spielen. Großflächige

Verbundnetze mit hinreichenden Übertragungskapazitäten erlauben, Energie von Orten mit momentanem Überangebot in Gegenden mit momentanem Strommangel zu leiten. Im Szenario, das in *Abbildung 3* dargestellt ist, ist ein solches Verbundnetz innerhalb Europas – oder auch darüber hinaus, wie es etwa das Desertec-Konzept vorsieht – und die damit einhergehende Möglichkeit des Imports von Strom aus erneuerbaren Quellen berücksichtigt.

Der Ausbau der Übertragungsnetze auf europäischer Ebene und darüber hinaus ist also eine wichtige Voraussetzung für den Umbau der Stromerzeugung. In Deutschland ist der Ausbau der Übertragungskapazitäten auch wichtig, weil die Stromerzeugung in Deutschland mit Windkraft sich weiter zunehmend im norddeutschen Raum konzentrieren wird, während viele Verbraucherzentren im süddeutschen Raum liegen. Dies macht einen weiteren Ausbau der Übertragungskapazitäten auch innerhalb des Landes notwendig.

Die Studie Dena I bezifferte im Jahr 2005 den Bedarf an zusätzlichen Übertragungsleitungen auf 850 km, wenn der Anteil der Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Energiequellen auf 20 % anwächst. Dieser Anteil ist schon heute erreicht, doch von den zusätzlichen Übertragungsleitungen konnte bislang nur ein kleiner Teil realisiert werden. Netzbetreiber warnten in den letzten Jahren häufiger, dass die bestehenden Netze schon heute häufig an ihre Grenzen stoßen würden.

Um den Bedarf an zusätzlichen Übertragungskapazitäten, deren Aufbau in vielen Fällen gesellschaftlich schwierig und langwierig ist, möglichst gering zu halten, ist es wichtig, vorhandene Potenziale auf lokaler und regionaler Ebene zu nutzen. Strom, der in der Region bereitgestellt und verbraucht wird, muss nicht transportiert werden. In Deutschland wird dieser Weg einerseits in den so genannten 100 %-Erneuerbare-Energie-Regionen und andererseits mit der Förderung des Eigenverbrauchs verfolgt.

Soll auf der Basis fluktuierender Energiequellen eine stabile Energieversorgung aufgebaut werden, wird es auch von Bedeutung sein, die Energiespeicherkapazitäten zu erweitern. Mit zunehmenden Speicherkapazitäten kann ein großer Teil auftretender Energieüberangebote für Zeiten mangelnden Angebots verfügbar gemacht

werden. Verschiedene Speichertechnologien machen Systeme mit verschiedener Kapazität und Entladezeit möglich, die in das Energiesystem integriert werden können.

Die individuelle Elektromobilität könnte für die Stabilisierung der Stromversorgung nutzbar gemacht werden, indem die Aufladung der Batterien durch wirtschaftliche Anreizsysteme, d. h. Preissignale, so gelenkt wird, dass sie hauptsächlich zu Überangebotszeiten stattfindet. Doch auch wenn der Einsatz von Batteriespeichern durch einen zukünftigen Ausbau der Elektromobilität stark zunehmen kann, so wird doch ihre Gesamtkapazität für ein Lastmanagement im Energiesystem begrenzt sein.

Druckluftspeicherkraftwerke und Pumpspeicherwerke haben wesentlich größere Kapazitäten. Kavernen-Druckluftspeicher werden bisher nur sehr wenig genutzt – eines von weltweit zwei Druckluftspeicherkraftwerken ist im niedersächsischen Huntorf in Betrieb –, besitzen aber durchaus Ausbaumöglichkeiten. Pumpspeicherwerke haben eine weit längere Tradition und zeichnen sich darüber hinaus durch sehr geringe Speicherverluste aus. Die Ausbaumöglichkeiten für Pumpspeicherwerke sind jedoch in Deutschland sehr begrenzt.

Eine weitere Möglichkeit, Energie zu speichern, besteht in der Herstellung von Gasen als chemischen Speichern. Der Strom aus erneuerbaren Quellen kann dabei genutzt werden, um mittels Elektrolyse aus Wasser Wasserstoff und Sauerstoff zu gewinnen. Der erzeugte Wasserstoff kann dann als erneuerbarer Energieträger in Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Trotz der dabei entstehenden hohen Energieverluste, kann dies ein sinnvoller Weg sein, überschüssigen erneuerbaren Strom zu nutzen, insbesondere wenn eine Nachfrage nach Wasserstoff in der Industrie gedeckt werden kann oder zukünftig im Verkehr eine Nachfrage entstehen sollte.

Es ist aber auch möglich, aus dem Wasserstoff unter Einsatz von Kohlendioxid Methan zu erzeugen, wobei weitere Energieverluste in Kauf genommen werden. Für das damit gewonnene Erdgassubstitut kann dabei die bestehende Gasinfrastruktur genutzt werden, was ein wesentlicher Vorteil gegenüber der Wasserstoffherzeugung wäre. Vorhandene Großgasspeicher sind

Langzeitspeicher mit sehr großen und weiter ausbaufähigen Kapazitäten.

Thermische Energiespeicher schließlich können etwa in solarthermischen Kraftwerken in sonnenreichen Regionen Europas und Nordafrikas eingesetzt werden, und damit der mit diesen Anlagen erzeugte Strom als regelbarer und im Prinzip grundlastfähiger Strom importiert werden.

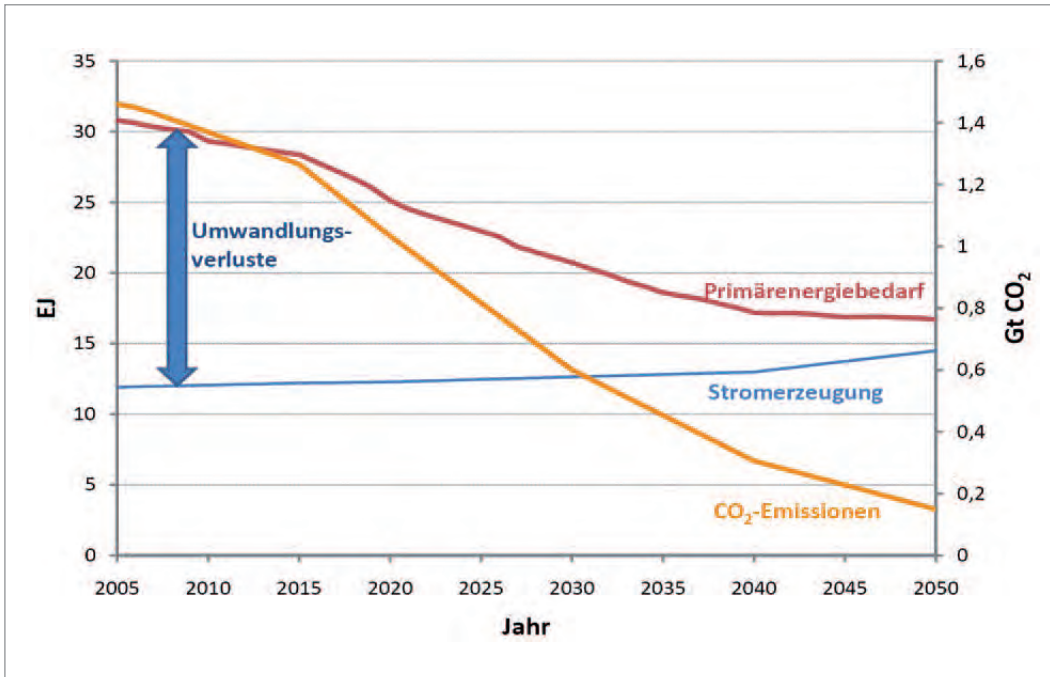
Die folgende Grafik (*Abb. 5*) illustriert noch einmal für Europa (EU 27), wie eine Stromerzeugung, die zunehmend auf erneuerbaren Quellen beruht, die CO<sub>2</sub>-Emissionen drastisch reduziert und gleichzeitig den Primärenergiebedarf durch die Reduktion von Umwandlungsverlusten senkt. Der in der *Abbildung 5* dargestellte Primärenergiebedarf ist der Bedarf für die Stromerzeugung. Die starke Bedarfsreduktion ist darauf zurückzuführen, dass bei Wind- und Solarstrom nicht die Energie des Windes oder der Sonnenstrahlung als Primärenergiebedarf bezeichnet werden, sondern nur die aus ihnen gewonnene elektrische Energie. Damit gibt es bei Wind- und Solarstrom keine Umwandlungsverluste. Denn Sonne und Wind bedeuten ja für den Menschen keinen Energieaufwand und werden daher auch nicht als Primärenergieaufwand gerechnet.

### Wärmesektor

Im Wärmesektor ist eine starke Reduzierung des Endenergiebedarfs erforderlich, um die energiepolitischen Ziele zu erreichen. Dies kann nur durch höhere energetische Gebäudestandards sowohl bei Neubauten als auch beim Gebäudebestand erreicht werden. Die Reduktion des Energiebedarfs durch energieoptimiertes Bauen unter konsequenter Berücksichtigung passiver solarer Wärmeeinträge erleichtert auch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energietechnologien. Insbesondere können Wärmepumpen, die zunehmend mit Strom aus erneuerbaren Quellen betrieben werden, Umweltwärme effizient für die Beheizung nutzbar machen. Ebenso kann Solarwärme einen größeren Anteil des Wärmebedarfs decken.

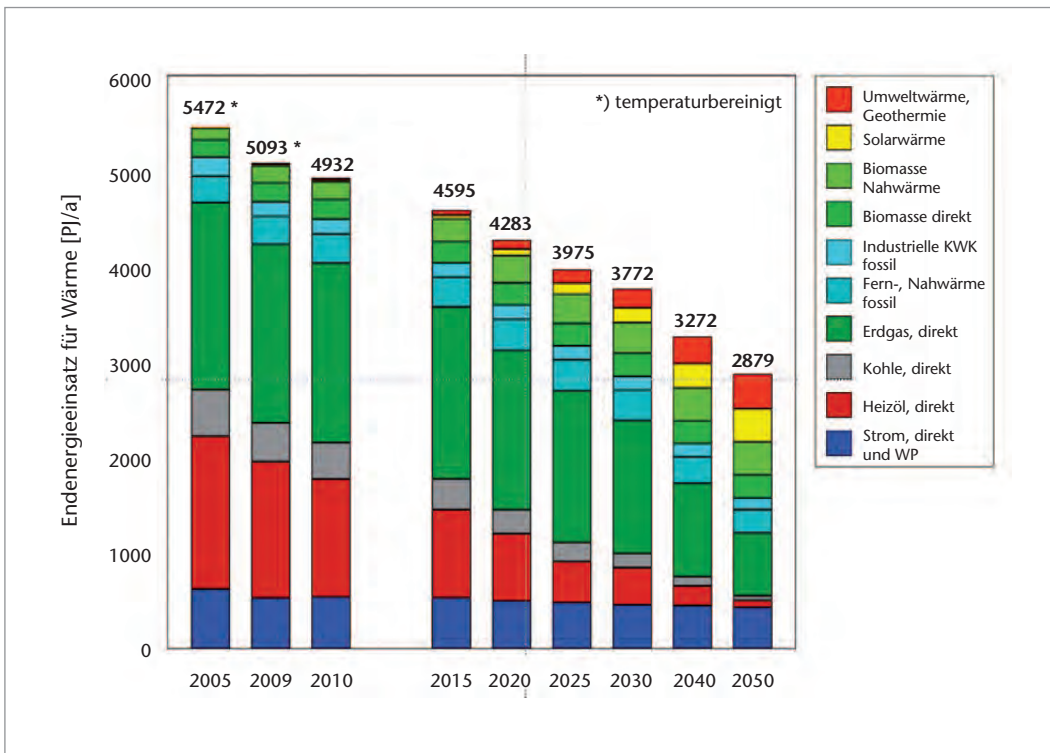
Biomasse sollte vor allem in Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden, die weiter ausgebaut und mit Wärmespeicher flexibilisiert werden sollte. Sowohl für die effiziente und flexible Nutzung der Erdwärme, der Solarwärme als auch der Biomasse stellen Fern- und zusätzliche Nahwärmeverbünde auch langfristig und bei sinken-





**Abbildung 5**  
Mögliche Entwicklung der Stromerzeugung in Europa (EU 27), der damit generierten CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Primärenergiebedarfs zur Stromerzeugung. Die Stromerzeugung entspricht der Stromnachfrage. Die Umwandlungsverluste nehmen durch den sukzessiven Abbau von Stromerzeugung auf der Basis von Verbrennungsprozessen stark ab.

Quelle: Fraunhofer IWES



**Abbildung 6**  
Mögliche Entwicklung des Endenergieeinsatzes für die Wärmebereitstellung in Deutschland.

Quelle: Leitstudie 2010 [3]

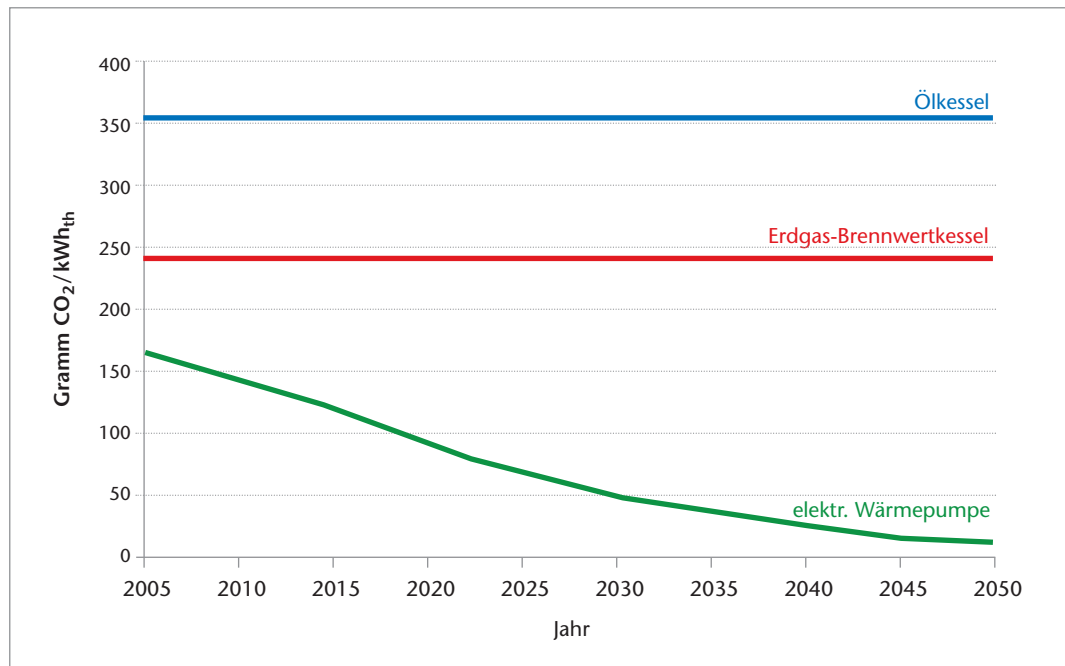
dem Wärmebedarf ein wesentliches Element dar. Wasserstoff und Methan, die aus Strom aus erneuerbaren Quellen hergestellt werden, können insbesondere für die Bereitstellung von Prozesswärme und Prozesskälte angewendet werden. Damit die in der Grafik gezeigten Einsparungen

erreicht werden, ist es aber unerlässlich, dass bis 2050 praktisch der gesamte Gebäudebestand entsprechend energetisch saniert wird.

Die Reduktion der Kohlendioxidemissionen durch eine Umgestaltung des Wärmesektors lässt sich

**Abbildung 7**  
Mögliche Entwicklung der spezifischen Emissionen verschiedener Heizungstechnologien und des spezifischen Primärenergieaufwands von Wärmepumpen (für EU 27).

Quelle: Fraunhofer IWES



illustrieren, indem man die spezifischen Emissionen eines Ölkessels, eines Erdgas-Brennwertkessels und einer Wärmepumpe gegenüberstellt (siehe *Abbildung 7*). Die weitgehende Ersetzung von Ölheizungen durch Gas-Brennwertkessel und Wärmepumpen führt zu einer beträchtlichen Absenkung der Emissionen.

Darüber hinaus bedingt der Umbau des Stromsektors eine weitere Absenkung der spezifischen Emissionen beim Einsatz von Wärmepumpen, da der für den Betrieb der Pumpen aufgewandte Strom zunehmend aus erneuerbaren Quellen gewonnen wird, wodurch außerdem der Primärenergiebedarf für den Betrieb der Wärmepumpen sinkt. Dies bedeutet, dass ein verstärkter Einsatz von effizienten Wärmepumpen, die mit erneuerbar erzeugtem Strom betrieben werden, ein sehr wirksamer Entwicklungspfad im Wärmesektor ist, um gleichzeitig die Effizienz im Energiesystem zu erhöhen und die Treibhausgasemissionen zu senken.

### Verkehrssektor

Der Verkehrssektor zeigt gegenwärtig eine besonders hohe Abhängigkeit vom Erdöl, bzw. der daraus erzeugten hochwertigen Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren. Die Ersetzung fossiler Kraftstoffe durch Biokraftstoffe ist in Deutschland nur in geringem Maß möglich, da hier (wie auch

in vielen anderen Ländern) biogene Energierohstoffe nur in begrenztem Ausmaß nachhaltig bereitgestellt werden können.

Für den Individualverkehr wird es wichtig sein, von Verbrennungsmotoren auf der Basis von Flüssigbrennstoffen zu alternativen Antrieben überzugehen. Das Institut für Fahrzeugkonzepte des DLR hat mittels Marktsimulation drei unterschiedliche Szenarien der Flottenentwicklung im PKW-Sektor bezüglich zukünftiger Antriebskonzepte ausgehend von Anforderungen und Kaufentscheidungen von Kunden entwickelt:

1. **Stromszenario**, bei dem der Individualverkehr bis 2050 ausschließlich vom Elektroantrieb gedeckt wird,
2. **Wasserstoffszenario**, bei dem neben den batteriebasierten Elektroantrieben auch Brennstoffzellen verstärkt zum Einsatz kommen,
3. **Methanszenario**, bei dem neben den Elektroantrieben Gasantriebe eine wichtige Rolle spielen.
- 4.

Alle drei Szenarien stimmen darin überein, dass fossil basierte Antriebe im PKW-Bereich zunehmend durch alternative Antriebe ersetzt werden. Sofern Strom, Wasserstoff und Methan zunehmend aus erneuerbaren Quellen bezogen werden, werden in allen drei Szenarien die CO<sub>2</sub>-Emissionen

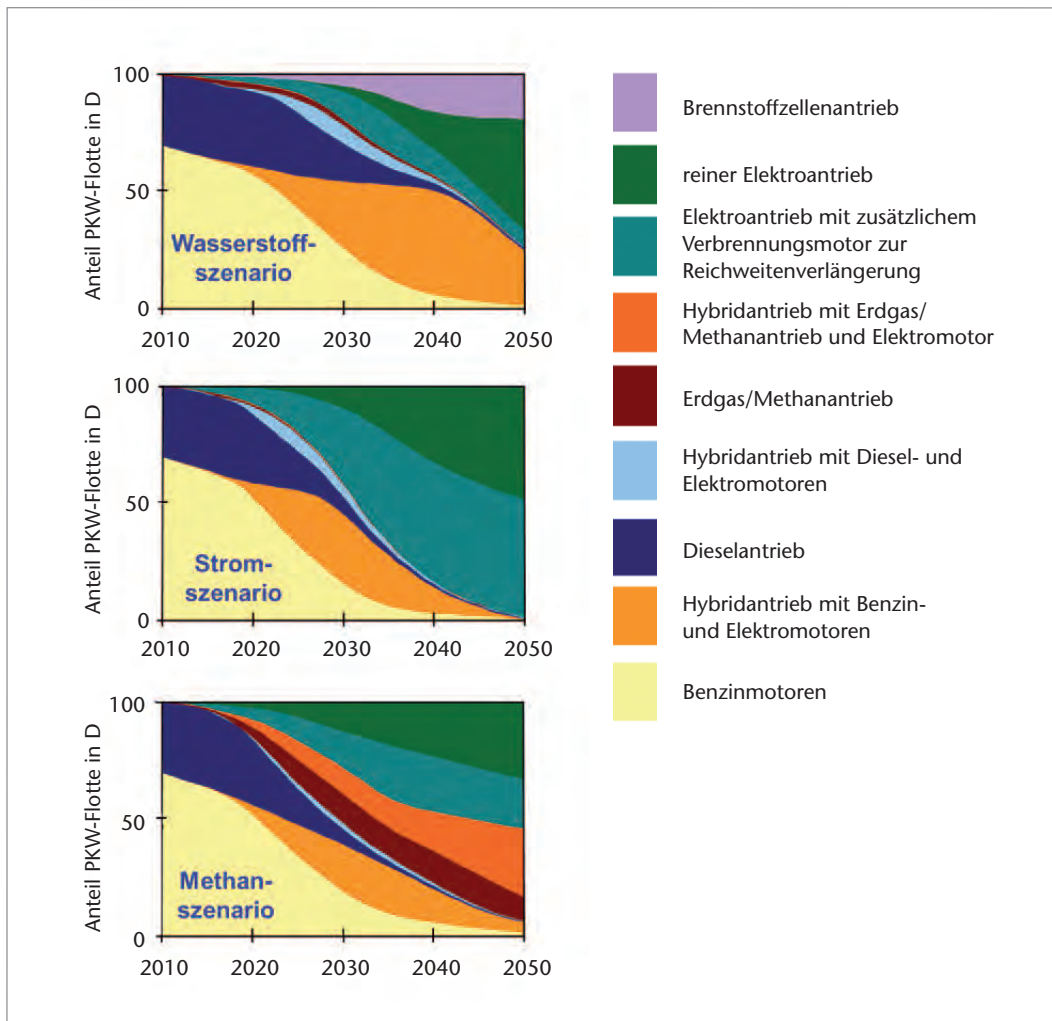


Abbildung 8

Szenarien zur zukünftigen Verbreitung von PKW-Antriebstechnologien in Deutschland.

Quelle: DLR, Institut für Fahrzeugkonzepte [5]

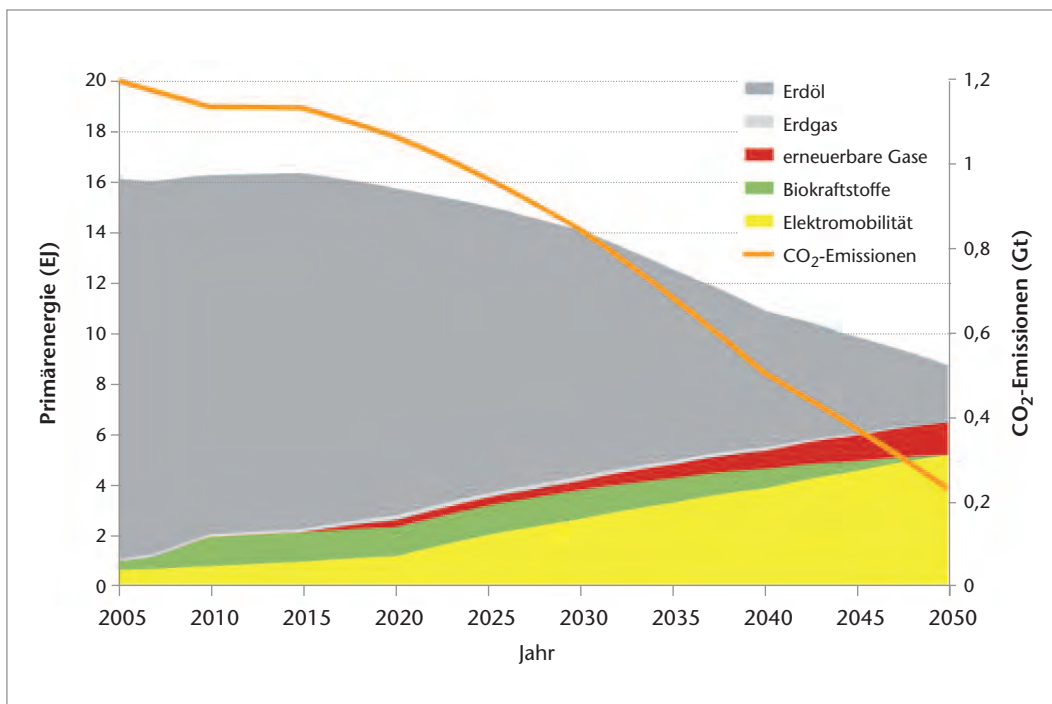


Abbildung 9

Mögliche Technologieentwicklung, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Primärenergiebedarf für den europäischen Verkehrssektor.

Quelle: Fraunhofer IWES

stark reduziert, ebenso wie der Primärenergiebedarf sogar bei konstantem Verkehrsaufkommen sinkt. Das Stromszenario weist dabei aufgrund des effizienten Elektroantriebs einen deutlich geringeren Endenergiebedarf im Vergleich zu den anderen Szenarien auf.

Für Europa wird diese Entwicklung in der *Abbildung 9* für den gesamten Verkehrssektor dargestellt.

Im Güterverkehr, bei Flugzeugen und Schiffen werden fossile Flüssigkraftstoffe wahrscheinlich länger eingesetzt werden als im PKW-Bereich, doch auch da werden sie zunehmend durch erneuerbare Kraftstoffe ersetzt, die aus Bioenergie oder aus erneuerbarem Strom (mittels Elektrolyse → Wasserstoff → Methan) hergestellt werden.

Unabhängig von den genannten neuen Antriebs-technologien gibt es weitere mögliche Effizienzgewinne im Verkehrssektor etwa durch eine zunehmende Verlagerung des Verkehrsaufkommens von der Straße auf die Schiene oder durch eine Reduktion des urbanen Individualverkehrs zugunsten eines gestärkten ÖPNVs.

### 3. Verschiebungen zwischen den Sektoren

Die drei Sektoren Elektrizität, Wärme und Verkehr verschieben sich durch die beschriebenen Entwicklungspfade gegeneinander und werden stärker miteinander verzahnt. Insbesondere implizieren die erläuterten Entwicklungspfade, dass erneuerbarer Strom als Primärenergie stark an Bedeutung gewinnt. Sowohl der Wärmesektor als auch der Verkehrssektor werden demnach stärker auf elektrischer Energie beruhen als dies bislang der Fall war.

Im Wärmesektor wird durch den verstärkten Einsatz von Wärmepumpen sowie auch die Nutzung von erneuerbarem Strom zur Prozesswärmeerzeugung mehr direkter Stromeinsatz realisiert. Auch der mögliche Einsatz von Wasserstoff oder Methan im Wärmesektor, die aus regenerativ erzeugtem Strom gewonnen werden, erhöht den erneuerbaren Anteil im Wärmesektor und den Einsatz der Primärenergie EE-Strom. Zusätzlich zur strombasierten Wärmegewinnung kann aber auch die Solarthermie einen sichtbaren Beitrag

zur Deckung des insgesamt sinkenden Wärmebedarfs liefern.

Auch im Verkehrssektor wird verstärkt auf Strom gesetzt, indem Elektrizität entweder direkt in Elektromobilen eingesetzt wird oder indem regenerativ erzeugter Wasserstoff oder Methan als Kraftstoff verwendet wird. Dies führt zu einem erhöhten Brutto-Strombedarf, so dass der Stromsektor in Zukunft eine noch zentralere Position im Energiesystem einnehmen wird und dem weiteren dynamischen Ausbau der Technologien zur Stromerzeugung aus erneuerbarer Energie eine große Bedeutung zukommt.

Eine solche neue Verzahnung der Energiesektoren und die damit gegebene zentralere Position der Stromerzeugung, ist ein möglicher Entwicklungspfad, um das Energiesystem mit ambitionierten Klimaschutzzielen kompatibel zu machen, es effizienter zu gestalten und die Zielvorgaben bezüglich des Anteils der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz insgesamt zu erreichen.

### Literatur

- [1] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2009): Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz. Sondergutachten. Berlin 2009
- [2] BMWi, BMU: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Berlin 2010
- [3] DLR, Fraunhofer IWES, IfnE: Leitstudie 2010. Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. [www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu\\_leitstudie2010.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu_leitstudie2010.pdf)
- [4] Klaus et al. 2010: Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [5] DLR 2011: „VECTOR21-Simulationen für drei alternative Fahrzeugszenarien“. Kurzbericht DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart, B. Propfe und S. Schmid, September 2011.

## ■ Ökonomische und technologische Aspekte der Transformation

- Ökonomische Aspekte:  
Chancen, Märkte und Arbeitsplätze
- Perspektiven für das Zusammenspiel von Energieeffizienz und Erneuerbaren sowie ihre Einbindung in das Energiesystem

# Ökonomische Aspekte: Chancen, Märkte und Arbeitsplätze



**ZSW**  
Prof. Dr. Frithjof Staiß  
frithjof.staiss@zsw-bw.de

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

**DLR**  
Marlene O'Sullivan  
marlene.osullivan@dlr.de

## 1. Neuer Energiemix zur Einhaltung der Klimaziele

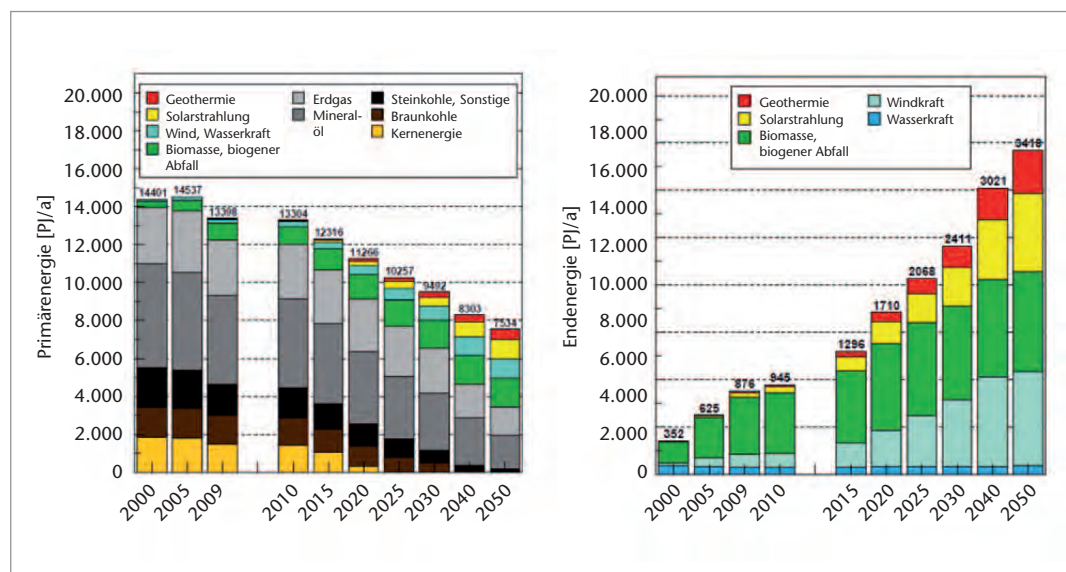
Die Bundesregierung strebt mit ihrem Energiekonzept vom 28. September 2010 [1] und den Beschlüssen zur Energiewende vom Juni 2011 [2] bis zum Jahr 2050 eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 80–95 % gegenüber dem Jahr 1990 an. Die erneuerbaren Energien sollen sich zur tragenden Säule der Energieversorgung entwickeln und einen Anteil von 60 % am Endenergieverbrauch erreichen (2010: 11,3 %, [3]). Gleichzeitig soll der Energiebedarf deutlich abnehmen.

Das Szenario in *Abbildung 1* zeigt dazu eine mögliche Entwicklung [4]: Die starke Abnahme des Primärenergieverbrauchs resultiert in erster Linie aus der Ausschöpfung von Einsparpotenzialen im Wärmemarkt (z. B. durch die energetische Sanierung von Gebäuden) und im Verkehr, aber auch aus der Vermeidung von Umwandlungsverlusten bei der Stromproduktion, indem Kondensationskraftwerke durch effizientere Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen ersetzt werden.

Auf der Bereitstellungsseite läuft die Nutzung der Kernenergie bis zum Jahr 2022 aus. Gleichzeitig wird die Kohleverstromung zurückgefahren; einerseits aufgrund der hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen, zum anderen, weil Kohlekraftwerke weniger gut regelbar sind als Gaskraftwerke, die für den Ausgleich der schwankenden Stromerzeugung aus Wind und Photovoltaik benötigt werden. Mineralölprodukte werden aus dem Wärmemarkt und Verkehr zunehmend verdrängt und durch regenerative Brenn- und Kraftstoffe bzw. Strom für die Elektromobilität ersetzt.

Der Ausbau erneuerbarer Energien stützt sich zunächst noch auf alle fünf erneuerbare Energiequellen, wobei die Potenziale der energetischen Nutzung von Biomasse und Wasserkraft gegen Ende der laufenden Dekade wohl weitgehend ausgeschöpft sein werden. Die Nutzung der Geothermie erfolgt primär zur Wärmebereitstellung, perspektivisch aber auch zur Stromerzeugung. Den Hauptanteil an der längerfristigen Entwicklung tragen jedoch die Windenergie sowie die thermische und elektrische Nutzung der Solarenergie.

*Abbildung 1*  
Szenario des Energiebedarfs (Primärenergie) und der Nutzung (Endenergie) erneuerbarer Energien in Deutschland bis zum Jahr 2050: Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber 1990 um 85 %, Reduktion der Primärenergiebedarfs um 43 % gegenüber 2010 und Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch auf 60 % [4].



## 2. Arbeitsplatzeffekte der Transformation

Die Transformation des Energiesystems ist mit weitreichenden Konsequenzen verbunden. Aus ökonomischer Sicht sind die Wirkungen auf den Arbeitsmarkt von besonderem Interesse, denn die Energiewende soll nicht zu Lasten von Beschäftigung gehen, sondern nach Möglichkeit zusätzliche, langfristig sichere Arbeitsplätze schaffen.

Für den Bereich der erneuerbaren Energien weisen die seit einigen Jahren für das Bundesumweltministerium durchgeführten Analysen im Zeitraum 2004 bis 2010 einen Anstieg der Arbeitsplätze von 157.000 auf 367.000 aus [5], [6]. Grundlage dafür ist der Umsatz in Deutschland ansässiger Anlagenhersteller im Inland und deren Exporte in Höhe von insgesamt 25,3 Mrd. € (2010). Daraus allein folgen 234.000 Arbeitsplätze. Hinzu kommen die Beschäftigungswirkungen aus dem Betrieb und der Wartung von Anlagen (70.100 Personen), aus der Bereitstellung von biogenen Brenn- und Kraftstoffen (etwa 55.700 Personen) sowie rund 7.500 Personen in der öffentlichen Verwaltung, Forschung etc. (Abbildung 2). Dabei halten sich die

direkten Beschäftigungseffekte bei den Herstellern von Anlagen und Komponenten sowie die indirekten Beschäftigungseffekte durch erbrachte Vorleistungen in anderen Wirtschaftssektoren in etwa die Waage (Basisjahr 2007).

Entscheidend für die Wirkungen auf den Arbeitsmarkt ist jedoch nicht der Bruttobeschäftigungseffekt, sondern der Nettobeschäftigungseffekt (Abbildung 3), der auch mögliche negative Beschäftigungswirkungen berücksichtigt. Diese resultieren zum Beispiel aus der Substitution der Energiebereitstellung aus fossilen Quellen. Die inländische Wertschöpfung ist hier jedoch wegen der hohen Importabhängigkeit im Unterschied zu den erneuerbaren Energien ohnehin gering und umfasst im Wesentlichen die Brennstoffaufbereitung und den Vertrieb sowie den Bau und die Instandhaltung von Anlagen.

Größere volkswirtschaftliche Wirkung als die Einbußen bei der fossilen Energiewirtschaft hat der sog. Budgeteffekt, der aus den Differenzkosten der Energiebereitstellung aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energien resultiert. Müssen die Verbraucher insgesamt mehr für regenerative Energien ausgeben, stehen diese Mittel nicht für die Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen

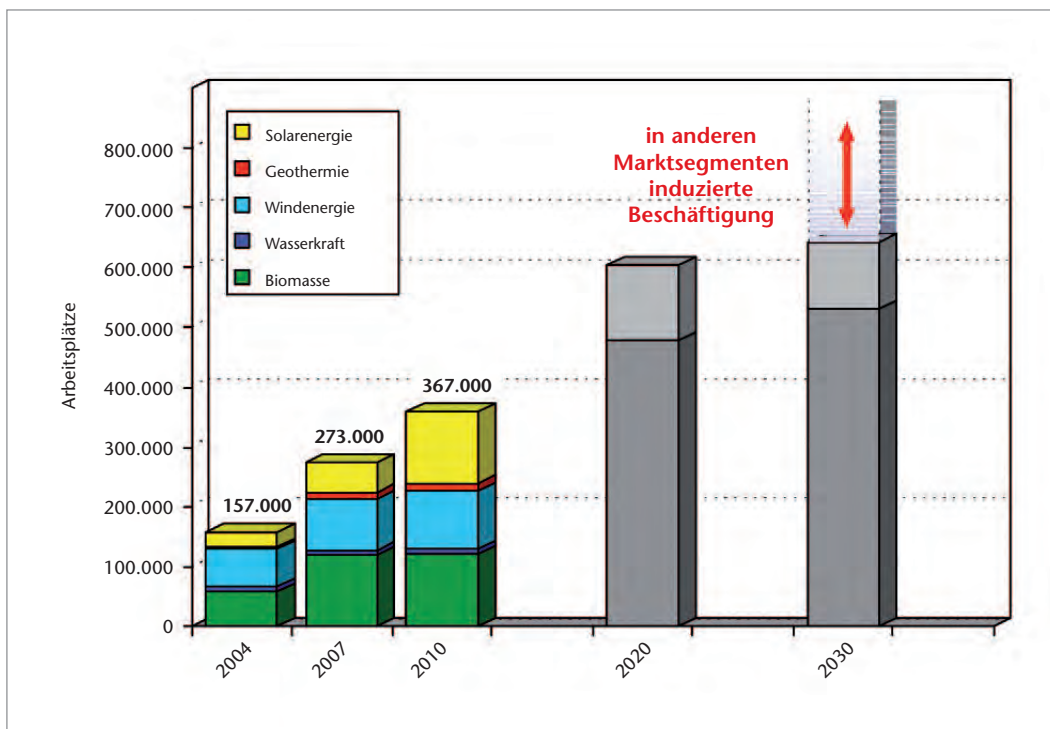
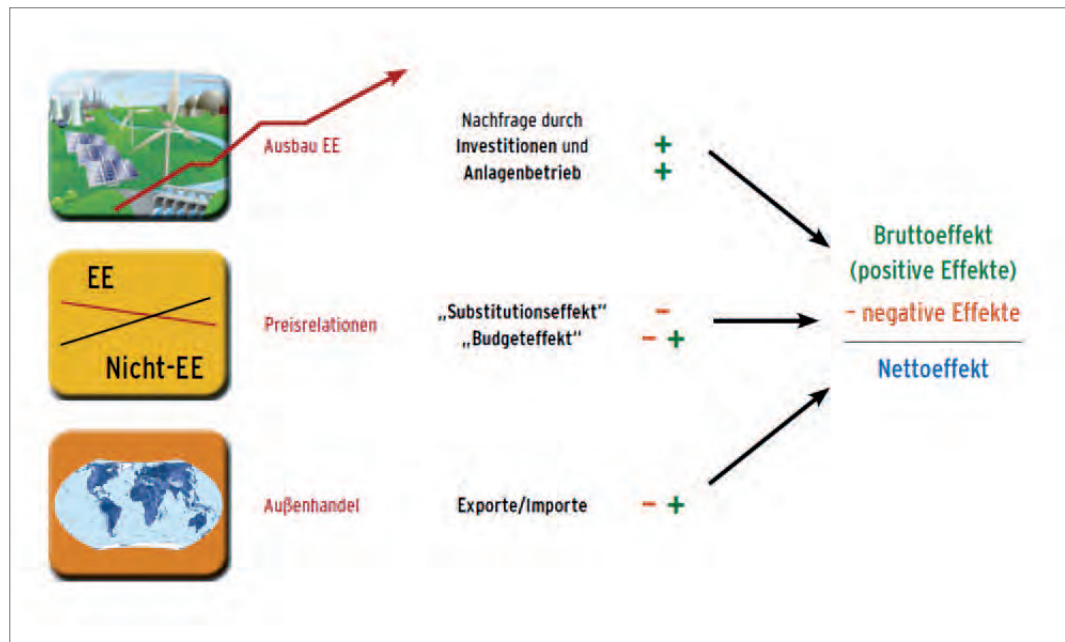


Abbildung 2  
Bruttobeschäftigungseffekt im Bereich erneuerbarer Energien nach Sparten im Jahr 2010 [6].

Abbildung 3  
Wesentliche Einflussfaktoren auf den Beschäftigungseffekt des Ausbaus erneuerbarer Energien [6].



gen anderer Branchen zur Verfügung. Folglich kommt es dort zu negativen Beschäftigungswirkungen. Ziel muss es daher sein, die Kosten der Nutzung erneuerbarer Energien sukzessive zu senken, damit sich der negative Budgeteffekt abschwächt und mit Erreichen der Wirtschaftlichkeit sogar positiv wird.

Last but not least spielt der Außenhandel eine wichtige Rolle. Werden mehr Waren und Dienstleistungen zur Nutzung erneuerbarer Energien exportiert als importiert, wirkt dies positiv auf die Beschäftigung und vice versa.

Die quantitative Bilanz zeigt für den Status quo folgendes Bild: Dem positiven Impuls aus Investitionen in Regenerativanlagen im Inland und dem Export steht ein erheblicher negativer Budgeteffekt von 7 Mrd. € [6] für 2009 gegenüber. Unter dem Strich überwiegen jedoch die positiven Arbeitsplatzwirkungen, die zu einem Nettoeffekt von 70.000–90.000 zusätzlich Beschäftigten führen.

Für die Zukunft sind entscheidend:

- Die Entwicklung der Investitionstätigkeit in Deutschland, weil ein hoher Anteil daran aus inländischer Wertschöpfung stammt.
- Ein möglichst schnelles Schließen der Kostenlücke zwischen konventionellen und erneuerbaren Energien

- Der Grad, in dem sich die hohe internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Unternehmen weiterhin in ein entsprechendes Exportvolumen ummünzen lässt.

In den in [6] unterlegten Szenarien wird davon ausgegangen, dass die inländischen Investitionen in den kommenden Jahren gegenüber dem hohen Niveau der Jahre 2009 (20 Mrd. €) und 2010 (knapp 25 Mrd. €) zurück gehen und sich bis 2020 bei etwa 18 Mrd. €/a einpendeln. Der inländische Investitionsimpuls auf die Beschäftigung schwächt sich damit ab, während sich der Beschäftigungseffekt aus dem Betrieb einer zunehmenden Zahl von Anlagen weiter erhöht.

Demgegenüber steht der negativ wirkende Budgeteffekt aus den Differenzkosten, die noch für einige Jahre steigen und je nach Preisszenario für fossile Energien etwa 15 Mrd. € erreichen (Ausbau der erneuerbaren Energien entsprechend *Abbildung 1* bei nur mäßigem Preisanstieg für fossile Energien), bevor sich ab etwa dem Jahr 2020 die Kostenlücke zugunsten der erneuerbaren Energien relativ rasch schließt.



## 4. Exportmärkte

Entscheidend ist deshalb in der Phase der nächsten 10 Jahre, wie sich der Weltmarkt für erneuerbare Energien insgesamt und die Exporte deutscher Unternehmen entwickeln. In der Arbeitsplatzstudie für das Bundesumweltministerium [5] wird zunächst davon ausgegangen, dass sich die globalen Investitionen bis 2020 gegenüber dem Basisjahr 2009 auf über 400 Mrd. € gut vervierfachen. Dies wird auch durch aktuelle Markttrends, politische Ziele (z. B. der Europäischen Kommission [7]) und zahlreiche internationale Szenarien (z. B. World Energy Outlook der Internationalen Energie Agentur [8]) gestützt.

Gelingt es den deutschen Unternehmen, ihre gute Wettbewerbsposition zu behaupten, werden die Exporte entsprechend steigen. Wie stark, ist heute nicht belastbar vorhersehbar. Informationen zur Struktur des Weltmarktes, Analogien zu anderen Bereichen der Umweltwirtschaft, Branchenerwartungen usw. lassen jedoch eine Eingrenzung zu. Sofern Deutschland vor allem in den beiden großen Wachstumsfeldern Windenergie und solare Stromerzeugung (Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke) seine technologische Stärke nutzt, dürfte eine Verdreifachung oder auch Verfünffachung des Exportvolumens gegenüber dem Basisjahr 2009 von 7 Mrd. € realistisch sein. Dadurch würde die Bruttobeschäftigung auf etwa 470.000 bzw. auf über 600.000 Arbeitsplätze steigen. Die Exporterfolge sind dabei auch entscheidend für den Nettobeschäftigungseffekt: im ersten Fall beträgt er gut 30.000 Arbeitsplätze im optimistischeren Szenario rund 100.000.

Ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Exportchancen der deutschen Unternehmen ist ihre Innovationsfähigkeit, die eng mit einer breiten Wissenschaftsbasis verbunden ist.

## 5. Weitere Beschäftigungseffekte durch Systemtransformation

Beschäftigungschancen ergeben sich aber nicht nur aus dem quantitativen Ausbau erneuerbarer Energien im genannten engeren Sinn (1. Phase der Systemtransformation), sondern in einer

Phase, in der sich die Erneuerbaren zunehmend zur tragenden Säule entwickeln, auch aus der damit verbundenen Notwendigkeit, die gesamte Energieversorgung neu zu optimieren (2. Phase der Systemtransformation).

Besonders augenfällig ist dies im Strommarkt. Nach dem Energiekonzept der Bundesregierung soll der regenerative Anteil bis 2020 auf 35 %, bis 2030 auf 50 % und bis 2050 auf 80 % ansteigen [1]. Aufgrund der vorhandenen Nutzungspotenziale wird die Entwicklung wesentlich durch Windenergienutzung an Land und auf See sowie durch Photovoltaik getragen. Der Anteil von Wind und PV wird sich von 8 % in 2010 auf 26 % in 2020 erhöhen [9]. Dies bedeutet, dass dann etwa jede vierte Kilowattstunde (146 Mrd. kWh) aus diesen beiden schwankenden Quellen bereitgestellt wird. Der künftige Abgleich von Stromerzeugung und -bedarf stellt deshalb eine große Herausforderung dar. Denn bis 2020 wird die installierte Leistung von Wind und Sonne voraussichtlich auf rund 100.000 MW anwachsen, während die mittlere Stromnachfrage nur knapp 70.000 MW beträgt. Dementsprechend kann es zu Zeiten hohen regenerativen Angebots zu Überschüssen und zu Zeiten geringen Angebots zu einer Unterdeckung kommen.

Eine weitere Herausforderung ist die Umstellung der traditionell auf zentrale Erzeugungsstrukturen abgestimmten Stromnetze auf eine sehr stark dezentrale Stromerzeugung. Dies betrifft die lokalen bzw. regionalen Verteilnetze (Photovoltaik-Einspeisung) ebenso wie Übertragungsnetze, die vor allem große Strommengen aus dem Norden (Offshore-Windstrom) zu den Verbrauchszentren transportieren und den überregionalen Nord-Süd-Ausgleich übernehmen müssen.

Wesentliche technische Elemente der Transformation der Stromversorgung sind somit der

- Ausbau der fluktuierenden Stromerzeugung aus Wind und Sonne
- Ausbau der Stromnetze
- bedarfsgerechte Bereitstellung von Regenerativstrom
- verstärkte Nutzung von Stromspeichern
- Anpassung der Stromnachfrage

Für das optimale Zusammenwirken dieser Elemente müssen mit Blick auf die Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit neue Strategien

und geeignete energiewirtschaftliche Instrumente entwickelt werden. Daraus ergibt sich ein breites Handlungsfeld mit umfangreichen Innovationspotenzialen.

Ein Beispiel ist die Stromspeicherung, die heute praktisch ausschließlich über Pumpspeicherkraftwerke erfolgt. Deren Potenzial ist allerdings mit derzeit 0,06 TWh sehr begrenzt. Es bestehen zahlreiche weitere Speicheroptionen, die aber – von Nischenanwendungen abgesehen – allesamt noch nicht kommerziell verfügbar sind. Hier besteht erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Dies gilt z. B. für Batteriespeicher, die als Stunden- bzw. Tagesspeicher in der Kilowattstunden- und unteren Megawattstunden-Klasse direkt vor Ort eingesetzt werden können. Besonders interessant sind Lithium-Ionen-Batterien, die auch für die Elektromobilität mit hoher Dynamik entwickelt werden. An diesem Beispiel kommt sehr gut zum Ausdruck, dass sich künftig die Anwendungsbereiche der erneuerbaren Energien neu definieren werden. Aus erneuerbarem Strom wird Mobilität und die mobile Batterie fungiert gleichzeitig als Stromspeicher.

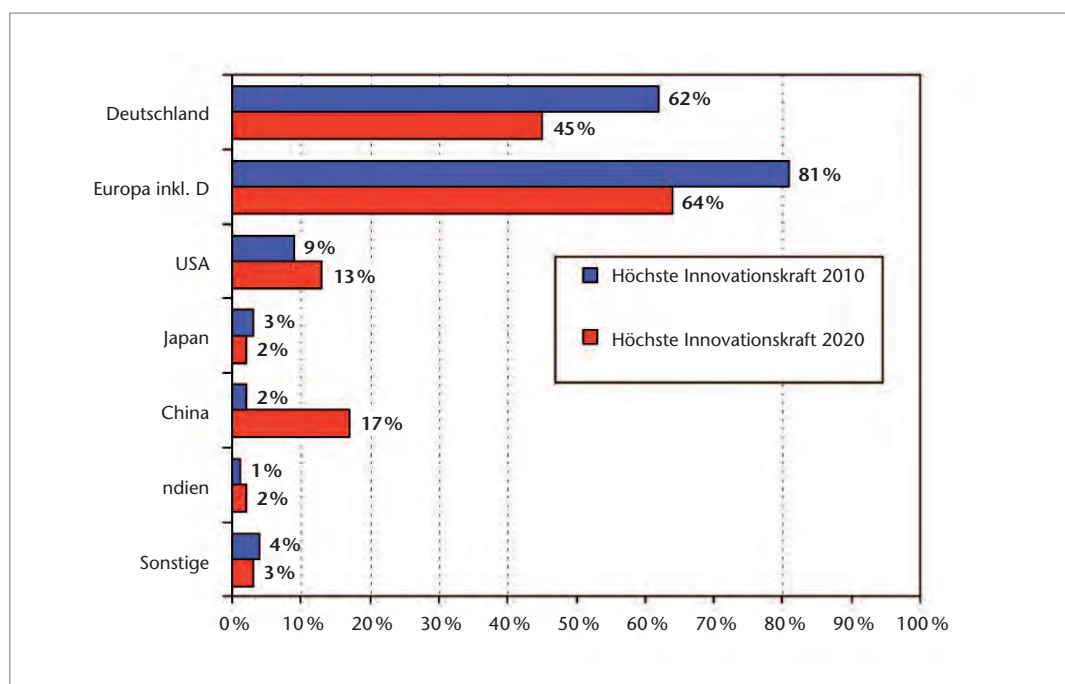
Für die Langzeitspeicherung und damit auch zur Überbrückung saisonaler Schwankungen im regenerativen Energiedargebot, kommen praktisch nur chemische Speicher infrage wie elektrolytisch

gewonnener Wasserstoff bzw. daraus abgeleitetes Methan (sog. Power to Gas-Technologie). Diese Technologie bietet den großen Vorteil der Kompatibilität mit der Erdgasinfrastruktur: Die Nutzung des Erdgasnetzes bietet die Möglichkeit, auf bereits bestehende Speicherkapazitäten in der Größenordnung von 200 TWh zurückgreifen zu können. Neben der effizienten Rückverstromung in Gaskraftwerken (vorzugsweise in Kraft-Wärme-Kopplung) ergeben sich daraus weitere Synergien mit anderen Anwendungen. Ein Beispiel sind Brennstoffzellen sowohl im mobilen als auch stationären Bereich.

## 6. Netzmanagement

Zum Management von Stromerzeugern, Stromverbrauchern, Infrastrukturen und Speichern bedarf es eines integrierten Ansatzes, der häufig unter dem Begriff intelligentes Stromnetz bzw. smart grid subsummiert wird. Die Entwicklung neuer technischer Infrastrukturen wie intelligente Stromzähler oder Elektrotankstellen sowie der Aufbau der zugehörigen Kommunikations- und der Abrechnungssysteme stellt erhebliche Anforderungen, bietet aber auch große Innovationspotenziale.

**Abbildung 4**  
Einschätzung der Innovationskraft verschiedener Länder im Bereich von smart grids. Befragung des Verbands der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik (VDE) [10].



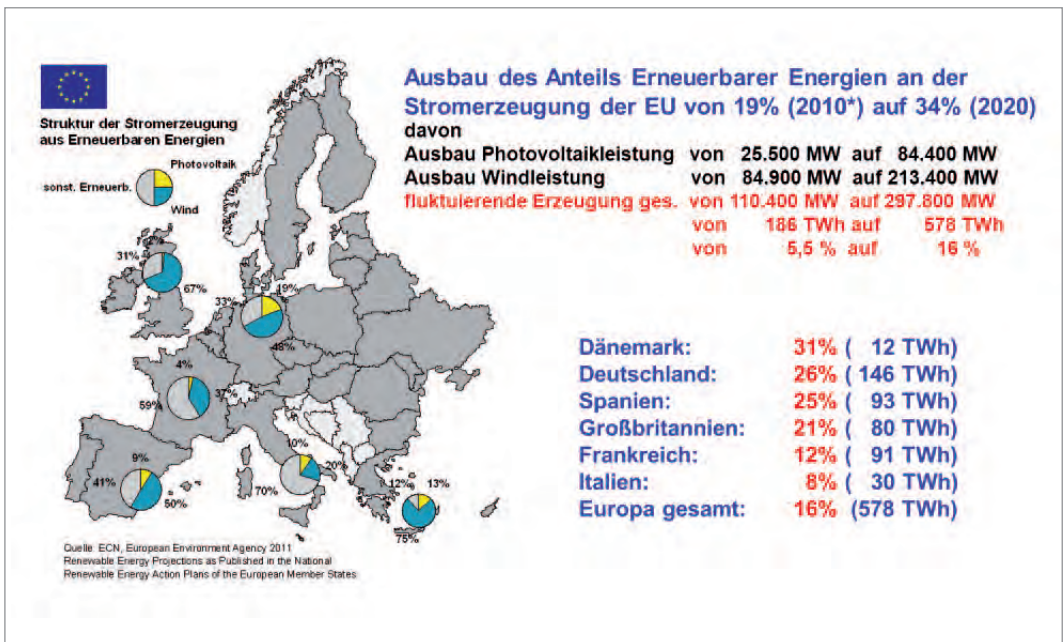


Abbildung 5  
 Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien nach den nationalen Aktionsplänen im Rahmen der EU-Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen [11].

Die deutsche Industrie sieht sich dafür gut gerüstet. So werden nach einer Befragung des Verbands der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) unter 1.300 Mitgliedsunternehmen sowie Hochschullehrern der Elektro- und Informationstechnik die wichtigsten Standortimpulse in den Bereichen Energieeffizienz (81 Prozent), Smart Grid/Intelligente Stromnetze (67 Prozent) und Elektromobilität (62 Prozent) erwartet [10]. Wichtig ist dabei unter dem hier diskutierten Gesichtspunkt, dass etwa die Hälfte der Befragten für smart grids sogar einen globalen Leitmarkt in Deutschland sieht, weil Deutschland auf diesem Technologiefeld über einen deutlichen Innovationsvorsprung verfügt (Abbildung 4).

Die Umfrage ist ein guter Beleg dafür, dass mit dem Ausbau erneuerbarer Energien auch Innovationsimpulse in ganz anderen Bereichen der Wirtschaft auslösen werden. Umgekehrt sind diese Innovationen wiederum Voraussetzung für die Umsetzung der Energiewende.

Damit ist für die 2. Phase der Transformation des Energiesystems charakteristisch, dass neue Anwendungsbereiche für erneuerbare Energien entstehen und sich Strommarkt, Wärmemarkt und Mobilität neu vernetzen (z. B. Elektromobilität, die Kopplung von solarer Wärme in Verbindung mit regenerativ betriebenen Wärmepumpensystemen für die Beheizung von Gebäuden bzw. rein elektrische Systeme für Nullemissionsgebäude usw.).

Darüber hinaus ergeben sich auch im Gesamtsystem der Energieversorgung neue Konstellationen. Deutschland ist früher als andere Länder damit konfrontiert, die Herausforderungen hoher Anteile fluktuierender Energien zu bewältigen. Weil diese Lösungen künftig auch international benötigt werden, eröffnet sich den aktiven Unternehmen und Branchen ein erhebliches Exportpotenzial. Als Beleg genügt ein Blick auf die nationalen Aktionspläne der EU-Mitgliedsstaaten zum Ausbau der erneuerbaren Energien bis 2020 im Rahmen der Richtlinie 2009/28/EG [11]. Sie sehen für alle Länder in der Stromversorgung allesamt deutlich zunehmende Anteile von Windenergie und Photovoltaik vor (Abbildung 5).

Für künftige Analysen der Beschäftigungseffekte im Bereich der erneuerbaren Energien muss deshalb der Rahmen weiter gefasst werden. Das in Abbildung 2 gezeigte weiße Balkenelement verdeutlicht die in anderen Marktsegmenten induzierte Beschäftigung.

Es ist durchaus wahrscheinlich, dass die Investitionsimpulse aus der 2. Phase der Systemtransformation zu einem recht hohen indirekten Brutto-Beschäftigungseffekt führen. Ob bzw. in welchem Umfang sich daraus auch negative Beschäftigungseffekte ergeben, ist ein lohnender Untersuchungsgegenstand, zumal ein Verweis auf die „zusätzlichen“ Infrastrukturkosten für die erneuerbaren Energien zu kurz greift. Schon deshalb, weil die sog. „Sowieso-Kosten“ im Zuge von

Ersatzinvestitionen in der Stromversorgung bzw. des Ausbaus aufgrund des mit der Liberalisierung der Märkte geforderten EU-weiten Stromhandels anfallen.

## 7. Zusammenfassung

Im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien ist in Deutschland eine international wettbewerbsfähige Branche mit mehreren hunderttausend Arbeitsplätzen entstanden. Mit den Beschlüssen zur Energiewende sollen sich erneuerbare Energien schneller als in vergleichbaren Ländern zur wichtigsten Säule der Energieversorgung entwickeln. Dies erfordert integrierte Lösungen, für die zeitversetzt auch im Ausland ein Bedarf entsteht. Für Deutschland ergibt sich daraus die Chance, als so genannter first mover der 2. Phase der Systemtransformation seine Wettbewerbsfähigkeit weiter zu festigen.

## 8. Literatur

- [1] Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung vom 28. September 2010. [www.bundesregierung.de](http://www.bundesregierung.de)
- [2] Regierungserklärung von Bundeskanzlerin Angela Merkel zur Energiepolitik „Der Weg zur Energie der Zukunft“ vom 9. Juni 2011 (Mitschrift). [www.bundesregierung.de](http://www.bundesregierung.de)
- [3] Bundesumweltministerium (Hrsg.): Erneuerbare Energien in Zahlen – Internet-Update ausgewählter Daten. Berlin, Dezember 2011. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [4] Arbeitsgemeinschaft Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart; Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Kassel; Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE), Teltow: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – „Leitstudie 2010“. Studie im Auftrag des Bundesumweltministeriums, Dezember 2010. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [5] Arbeitsgemeinschaft Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung, Osnabrück; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, DIW Berlin; Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Stuttgart; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe; Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Stuttgart: Kurz- und langfristige Auswirkungen des Ausbaus der erneuerbaren Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Osnabrück, Berlin, Karlsruhe, Stuttgart Februar 2011. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [6] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbar beschäftigt! Kurz- und langfristige Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf den deutschen Arbeitsmarkt. Berlin, Juli 2011. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [7] Europäische Kommission: Energiefahrplan 2050: ein sicherer, wettbewerbsfähiger und CO<sub>2</sub>-armer Energiesektor ist möglich. Pressemitteilung 15.12.2011, IP/11/1543. [http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/energy2020/roadmap/index_en.htm)
- [8] International Energy Agency: World Energy Outlook 2011, Paris 2011. <http://www.worldenergyoutlook.org/>
- [9] Bundesrepublik Deutschland: Nationaler Aktionsplan für erneuerbare Energie gemäß der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. 4.8.2011. [www.bmu.de](http://www.bmu.de)
- [10] Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE): VDE-Trendreport 2011: Elektro- und Informationstechnik – Schwerpunkt: Smart Grids. [www.vde.com](http://www.vde.com)
- [11] L.W.M. Beurskens, M. Hekkenberg: Renewable Energy Projections as Published in the National Renewable Energy Action Plans of the European Member States Covering all 27 EU Member States. Energy Research Center of the Netherlands. ECN-E—10-069 1 February 2011, <http://www.ecn.nl>

# Perspektiven für das Zusammenspiel von Energieeffizienz und Erneuerbaren sowie ihre Einbindung in das Energiesystem

Im ersten Halbjahr 2011 wurden bereits mehr als 20 % des deutschen Stroms aus erneuerbaren Energien erzeugt. 9,4 % des Primärenergieverbrauchs in Deutschland wurden im Jahr 2010 aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt. Diese Zahlen belegen, welche große Bedeutung die erneuerbaren Energien in den letzten Jahren für den Energiemarkt bereits gewonnen haben. Nun muss dieser Anteil weiter gesteigert werden, bis erneuerbare Energien den deutschen Energiebedarf vollständig decken. Entscheidend für die Umsetzung dieses Ziels sind vor allem eine wesentliche Steigerung der Energieeffizienz sowie ein intelligentes Zusammenspiel von Erzeugung und Verbrauch. Dieser Beitrag gibt einen Überblick über den Status und die Perspektiven zur Energieeffizienzsteigerung und für die Nutzung der verschiedenen erneuerbaren Energiequellen. Darauf aufbauend wird aufgezeigt, wie das Energiesystem für einen hohen Anteil an erneuerbaren Energien um- und ausgebaut werden muss.

## 1. Erhöhung der Energieeffizienz

Die effiziente Nutzung von Energie ist eine entscheidende Voraussetzung für die schnelle und ökonomisch tragbare Transformation der Energieversorgung. Der Energiebedarf muss in allen Endverbraucherbereichen, also Gebäude, Transport, Verkehr aber auch in der industriellen Produktion gesenkt werden. In all diesen Bereichen besteht enormes Potenzial für Effizienzgewinne (vgl. *Tabelle 1*). Diese können dabei so realisiert werden, dass weder auf Komfort verzichtet noch industrielle und kommerzielle Aktivitäten eingeschränkt werden müssen. Ganz im Gegenteil bewirken zahlreiche Maßnahmen zur Effizienzsteigerung eine Erhöhung der Behaglichkeit sowohl im Winter als auch im Sommer und bilden die Voraussetzung zur Bestandserhaltung.

Besonders großes Einsparungspotenzial besteht in Deutschland im Gebäudebereich, in dem ca. 40 % der Endenergie verbraucht wird. Die energetische Gebäudesanierung muss deshalb einen wesentlichen Beitrag zur Senkung des Energieverbrauchs leisten. Dabei sind hoch wärmedämmende, luftdichte Gebäudehüllen mit optimierten Bauteilanschlüssen, Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und Systeme zur passiven Solarenergieaufnahme sowie eine dem Bedarf angepasste Anlagentechnik entscheidend (Details finden sich in [1, 2]). Effiziente Elektrogeräte unterstützen diesen Prozess und eine intelligente Gebäudetechnik ermöglicht eine effiziente Steuerung der Energieflüsse.

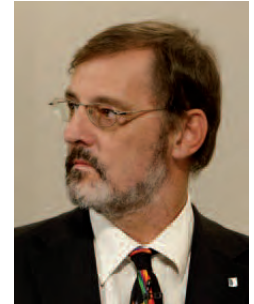
Bei Neubauten entstehen derzeit an mehreren Standorten in Deutschland Plusenergiehäuser, die im Jahresdurchschnitt mehr Primär- und Endenergie erzeugen als sie verbrauchen. Dieser Gebäudetyp wird in wenigen Jahren für Neubauten Standard sein und muss allmählich auch im Bestand Anwendung finden. So ging z. B. kürzlich in Stuttgart eine Plusenergie-Schule im Bestand „ans Netz“ [3].

Doch auch in anderen Bereichen bestehen große Einsparpotenziale. Mögliche Effizienzsteigerungen und dafür erforderliche Technologien sind in *Tabelle 1* gezeigt. Für eine detaillierte Diskussion sei an dieser Stelle auch auf Ref. [4] verwiesen.

## 2. Erneuerbare Energieträger

Im Bereich der erneuerbaren Energien wurde in den vergangenen 20 Jahren eine rasche Markt- und Technologieentwicklung erreicht. Beeindruckende technologische Weiterentwicklungen wurden bereits erzielt.

So folgen die Photovoltaik-Modulpreise bereits seit mehr als 20 Jahren einer Lernkurve mit einer



### Fraunhofer ISE

Dr. Andreas Bett

andreas.bett@ise.fraunhofer.de

Prof. Dr. Bruno Burger

bruno.burger@ise.fraunhofer.de

Dr. Günther Ebert

guenther.ebert@ise.fraunhofer.de

Dr. Simon Philipps

simon.philipps@ise.fraunhofer.de

Gerhard Stryi-Hipp

gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

### Fraunhofer IWES

Dr. Kurt Rohrig

kurt.rohrig@iwes.fraunhofer.de

Dr. Philipp Strauß

philipp.strauss@iwes.fraunhofer.de

Dr. Bernd Krautkremer

Bernd.Krautkremer@iwes.fraunhofer.de

**Tabelle 1**  
Effizienz in den Sektoren Strom, Verkehr und Wärme – heute und 2050. Einzelne Maßnahmen zur Erhöhung der Effizienz sind beispielhaft aufgeführt

Sektor	Effizienz heute – 2050	Maßnahmen
Strom	von 38 % auf 100 % [4]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ersatz des heutigen fossil-nuklear dominierten Kraftwerkparcs durch Erneuerbare Energien und Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)</li> </ul>
Verkehr	von 20 % auf bis zu 80 % [4]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ersatz von Brennstoffantrieben durch Elektroantriebe mit Batterie und mit Brennstoffzellen sowie Effizienzsteigerung bei Verwendung von Biokraftstoffen, Wasserstoff, Methan</li> </ul>
Wärme	z. B. Gebäudeheizung: Senkung des Energieeinsatzes auf 1/10 des heutigen Wertes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effizienzsteigerung im Gebäudesektor</li> <li>Einsatz von KWK, effizienten Nahwärmesystemen und verlustarmen Wärmespeichern</li> </ul>

**DLR**

Hans Christian Gils  
hans-christian.gils@dlr.de

**Fraunhofer IBP**

Prof. Dr. Gerd Hauser  
gerd.hauser@ibp.fraunhofer.de

**ZAE Bayern**

Prof. Christoph J. Brabec  
christoph.brabec@zae.uni-erlangen.de

Dr. Hans-Peter Ebert  
ebert@zae.uni-wuerzburg.de

Dr. Andreas Hauer  
hauer@muc.zae-bayern.de

Fortschrittsrate von 80 %. Eine Verdopplung der kumulierten Produktion führte somit jeweils zu einer Kostenreduktion von 20 % [5]. Ursächlich hierfür waren die Erhöhung des Wirkungsgrades, neue Produktionstechnologien und effizienter Materialeinsatz. Die PV-Produktionskapazitäten und die installierte Leistung sind in den letzten Jahren stark gestiegen. So wurde 2010 in Deutschland eine zusätzliche Leistung von 7,4 GW installiert. Verschiedene PV-Technologien sind heute auf dem Markt oder in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. Diese umfassen mono- und multikristalline Si-Flachmodule, Dünnschichttechnologien (wie a-Si, Si-a-Si, CIS, CdTe), III-V Solarzellen, organische und Farbstoffsolarzellen. Alle diese Technologien haben spezifische Vorteile und besondere Anwendungsgebiete. Bei der Nutzung der Sonnenenergie für solare Wärmenutzung und Kälteerzeugung wurde die Effizienz der solarthermischen Kollektoren und Systeme erhöht. Zudem wurden Technologien zur Erzeugung solarer Prozesswärme und zur solaren Kühlung entwickelt. Es wird an einem sogenannten SolarAktivhaus gearbeitet, das unter Nutzung der saisonalen Wärmespeicherung zu 50 bis 100 % mit thermischer Solarenergie beheizt werden kann.

Windkraft erzeugte 2010 mit einer installierten Leistung von 27 GW bereits 6 % des Stroms in Deutschland. Die Effizienz und die Größe der Anlagen konnte kontinuierlich gesteigert werden. Auch die Entwicklung der Offshore-Windenergienutzung schreitet voran. So wurden neue Anlagengenerationen entwickelt und die Leistungsprognosen präzisiert. Kontinuierliche technologische Fortschritte wurden auch bei den anderen erneuerbaren Energien Biomasse, Wasserkraft und Geothermie erreicht.

Die bereits erzielten technologischen Fortschritte haben erneuerbare Energien leistungsfähiger und günstiger gemacht. Trotzdem besteht bezüglich der Kosten und der Effizienz noch ein großes Potenzial, da ihre Erforschung im Vergleich zu anderen Energietechnologien immer noch am Anfang steht. Erforderlich ist hierfür die deutliche Ausweitung der Forschungsaktivitäten im Bereich Energieeffizienz und erneuerbare Energien, wie sie im Energieforschungsprogramm des Bundes prinzipiell vorgesehen ist [6]. Beispielhafte Innovationen, die in den kommenden Jahrzehnten erwartet werden, sind in *Tabelle 2* aufgeführt. Eine detaillierte Darstellung findet sich in [7].

### 3. Umbau des Energiesystems

Die Steigerung der Energieeffizienz und der Ausbau erneuerbarer Energien sind wichtige Elemente der Transformation des gesamten Energiesystems, das die Erzeugung, Verteilung, Speicherung, Umwandlung und effiziente Nutzung von Strom, Wärme/Kälte und analog den Verkehrsbereich umfasst.

**Aus- und Umbau des Stromnetzes**

Der Stromtransport war bisher zentral organisiert: Wenige Großkraftwerke erzeugten Strom mit rotierenden Generatoren, der über Höchst-, Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze zu den Verbrauchern transportiert und verteilt wurde. Die Stromproduktion folgte der Nachfrage. Für das Zeitalter der erneuerbaren Energien ist ein Umdenken erforderlich: Strom wird dann in einer Vielzahl kleiner und großer Anlagen erzeugt und vor allem dezentral mit Wechselrichtern ins Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetz eingespeist (vgl. *Abbildung 1*). So produzierten im

Energiequelle	Anteil an deutscher Stromproduktion 2050 <sup>1</sup>	Forschungsbedarf bis 2020	„Highlights“ bis 2050
Photovoltaik	17–30%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung des Wirkungsgrades, neue Prozesstechnologien mit höherem Durchsatz bei geringerem Materialverbrauch</li> <li>• Optimierung der Modultechnologie, der Verkapselung sowie der elektrischen Systemintegration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solarmodule mit kristallinen Mehrfachsolarzellen mit 30% Modulwirkungsgrad und 40 Jahren Lebensdauer</li> <li>• Konzentrierende Photovoltaik erreicht Modulwirkungsgrad von 50%</li> <li>• Farbige Solarzellen werden in Gebäudehüllen integriert</li> </ul>
Solarthermische Kraftwerke	N.A. <sup>2</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochtemperatur-Konzepte</li> <li>• Verlustarme Wärmespeicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solarthermische Kraftwerke in Nordafrika liefern Strom über HGÜ-Leitungen nach Europa</li> </ul>
Windenergie onshore	20–25%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Leistung, der Effizienz und der Vorhersagbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Effiziente, geräuscharme Windkraftwerke erzeugen deutschlandweit Strom</li> </ul>
Windenergie offshore	35–40%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialentwicklung</li> <li>• Erhöhung der Leistung, der Effizienz und der Vorhersagbarkeit</li> <li>• Erhöhung der Verfügbarkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Offshore-Windparks liefern vorhersagbare, große Strommengen</li> </ul>
Wasserkraft	3–4%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Neue Baukonzepte, Materialien und Werkstoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Große Wasserkraftspeicher stehen zur Verfügung</li> </ul>
Biomasse/erneuerbares Methan	8–10%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhöhung der Effizienz von Biomasse-Nutzungspfaden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erneuerbares Methan im Gasverteilnetz dient als Energieträger und -speicher</li> </ul>
Geothermie	3–4%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erkundungsstrategien</li> <li>• Verbesserte Produktionstechniken</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geothermie-Kraftwerke liefern Grundlaststrom</li> </ul>

*Tabelle 2*  
 Anteil verschiedener Energieträger an der deutschen Stromproduktion 2050. Der Forschungsbedarf bis 2020 sowie Highlights bis 2050 sind beispielhaft gezeigt

ersten Halbjahr 2011 bereits ungefähr eine Million Photovoltaik-, Wind-, Wasserkraft- und Biogasanlagen über 20% des deutschen Strombedarfs [10]. Die größte Herausforderung besteht darin, mit den großen Schwankungen der Stromerzeugung aus Wind und Sonne umzugehen, die den Hauptteil der Stromerzeugung leisten werden.

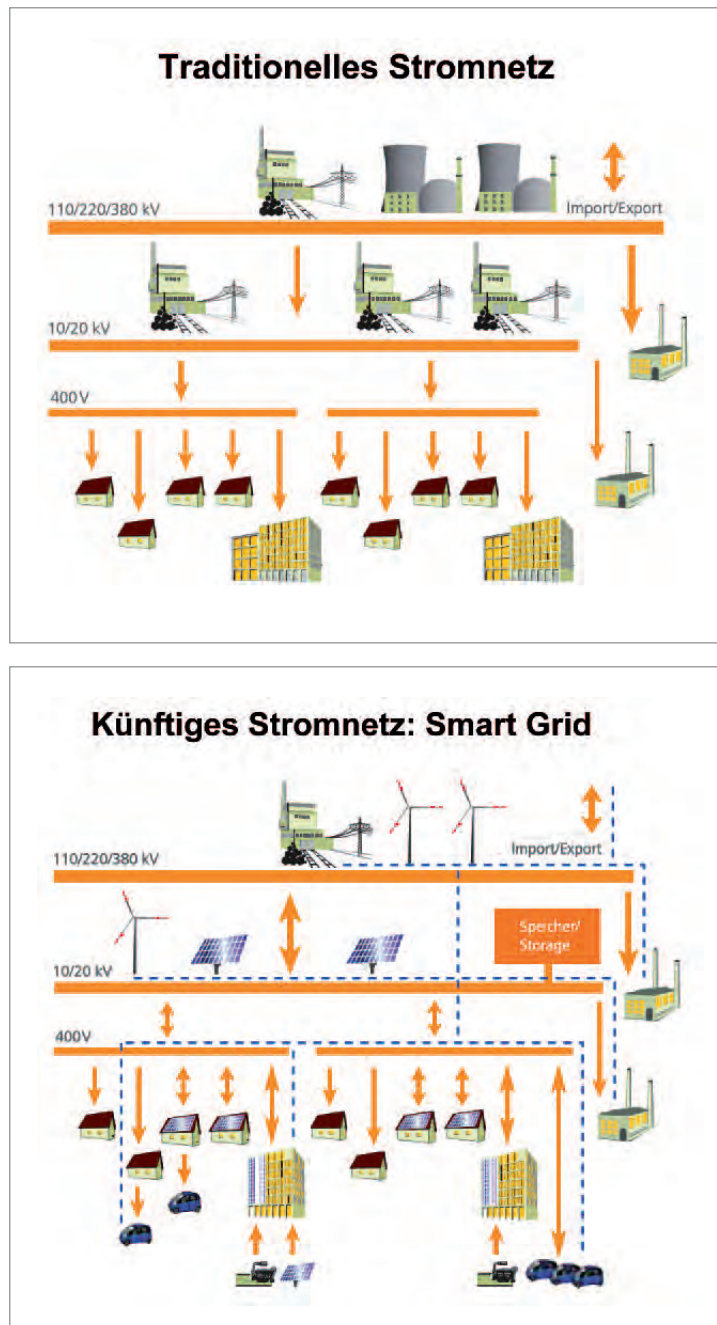
Ein wichtiger Baustein hierfür ist ein überregionaler Ausgleich der fluktuierenden Erzeugung. Dafür muss das Hoch- und Höchstspannungsnetz ausgebaut werden, um wetterbedingte Erzeugungsunterschiede in verschiedenen Regionen Deutschlands und Europas auszugleichen. Ein europäisches-nordafrikanisches Hochspannungsgleichstrom-Übertragungsnetz (HGÜ) würde den verlustarmen Transport großer Strommengen sowohl innerhalb Europas aber auch aus nordafrikanischen Solarkraftwerken (DESERTEC-Initiative) ermöglichen [11]. Des Weiteren müssen die verschiedenen Speichertechnologien deutlich weiter entwickelt und große Speicherkapazitäten in das Stromnetz integriert werden. Dabei wird ein geeigneter Mix aus verschiedenen Speichertechnologien zum Einsatz kommen, die kurz-, mittel- und langzeitorientiert sind. Zur Anpassung des Verbrauchs an die Erzeugung, sowie die optimale Steuerung der stark steigenden Anzahl von dezentralen Erzeugern und Speicherkapazitäten muss das Stromnetz der Zukunft intelligent sein.

1 Es existieren verschiedene Szenarien für den Anteil der einzelnen Energieträger an der deutschen Stromproduktion im Jahre 2050. In der Tabelle sind die Bandbreiten der Energieszenarien aus den Referenzen [4] und [8] gezeigt. In beiden Szenarien wird der deutsche Strom zu 100% aus Erneuerbaren Energien erzeugt. Es sei zudem auch auf die Szenarien in [9] verwiesen.

2 In den Szenarien aus [4] und [8] kommt ein Teil des Stromimports aus solarthermischen Kraftwerken außerhalb Deutschlands.

Abbildung 1  
Zentrale Stromerzeugung im traditionellen Stromnetz und dezentrale Stromerzeugung im künftigen „Smart Grid“

Quelle: Fraunhofer ISE



In diesem „smart grid“ werden alle Komponenten miteinander kommunizieren. Hierfür sind u. a. intelligente Stromzähler und flexible Strompreise erforderlich, so dass die Verbraucher ihren Strombezug an die aktuelle Erzeugungssituation soweit möglich anpassen können. Dadurch wird auch der Bedarf an teuren Speichern reduziert. Die prinzipielle Gewährleistung der Versorgungssicherheit durch das Zusammenspiel von erneuerbaren Energien und Speichern in Form eines „Regenerativen Kombikraftwerks“ wurde bereits demonstriert [12]. Durch den Aus- und Umbau

des Stromsystems ist dies auch für den gesamten Strombedarf Deutschlands möglich.

### Energiespeicher

Zum Ausgleich der schwankenden Erzeugung bei sehr hohen Anteilen erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung ist der Einsatz von Kurzzeit- bis zu saisonalen Speichern unverzichtbar. Zum Ausgleich von kurz- bis mittelfristigen Schwankungen bei der Stromerzeugung, die nicht über das Stromnetz ausgeglichen werden können, eignen sich elektrochemische Speicher und Pumpspei-



cherkraftwerke. Jahreszeitliche Schwankungen erfordern verlustarme chemische Speicher. In Frage kommen aus heutiger Sicht vor allem Wasserstoff und synthetisches Methan. Wasserstoff könnte mittels Elektrolyse aus Wasser gewonnen und als sauberer Energieträger in Brennstoffzellen, Gasturbinen oder Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Hierzu wäre der Aufbau eines Wasserstoff-Verteilnetzes notwendig. Aus erneuerbaren Energien erzeugtes Methangas könnte dagegen in die gut ausgebaute Gasinfrastruktur mit ihrer saisonalen Speicherkapazität eingebunden werden. Alle heute bereits vorhandenen Erdgaspeicher in Deutschland haben eine maximale Arbeitsgaskapazität von 20 Mrd. m<sup>3</sup>, was einer Energiespeicherkapazität von ca. 200 TWh entspricht [13]. Eine europäische Vernetzung ist auch in Bezug auf Speicher vorteilhaft. So könnten beispielsweise Wasserkraftspeicher in Norwegen oder den Alpen ausgebaut und auch für andere europäische Länder zur Verfügung gestellt werden.

Die thermische Energiespeicherung ist ein weiterer unverzichtbarer Baustein eines erneuerbaren und effizienten Energiesystems. Durch die saisonale Speicherung solarer Wärme oder für die kurzzeitige Speicherung erneuerbar erzeugter Elektrizität in Form von Wärme oder Kälte erfüllt sie eine wichtige Funktion. Thermische Energiespeicher ermöglichen zudem eine deutliche Steigerung der Energienutzungseffizienz von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen. Meist ist es sinnvoll, diese Anlagen stromgeführt zu betreiben. Die anfallende Wärme muss über einen längeren Zeitraum gespeichert werden, um sie dann bei Bedarf nutzen zu können. Chemische Wärmespeicher mit einer um den Faktor 8 erhöhten Wärmedichte sind in Entwicklung und könnten die saisonale Wärmespeicherung deutlich erleichtern.

### Wärme

Der Raumwärmebedarf wird durch Wärmeschutzmaßnahmen signifikant sinken. Der verbleibende Raumwärmebedarf, die Warmwassererzeugung sowie die Prozesswärmebereitstellung wird künftig mit erneuerbaren Energien, effizienteren Heizungssystemen und einer Wärmerückgewinnung gedeckt werden. Für die Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung eignen sich insbesondere Wärmepumpen in Verbindung mit Geothermieanlagen sowie solarthermische Kollektoren. Biomasse wird nur in begrenztem Umfang für

die Wärmebereitstellung eingesetzt werden. Zudem kann Wärme durch die Kraft-Wärme-Kopplung mit BHKWs oder Brennstoffzellen sowie in Form von Abwärme aus Industrieprozessen genutzt werden. Durch den Einsatz von Wärmespeichern können die KWK-Anlagen zum Ausgleich der schwankenden Netzeinspeisung aus Wind- und Solarenergieanlagen genutzt werden. Industrielle Prozesswärme kann aus Hochtemperatur-Solarthermie, KWK-Anlagen sowie mit Strom aus erneuerbaren Energien bereitgestellt werden.

Viele Gebäude werden ihren Wärme- und Kältebedarf selbst decken, um auch das Ziel der „Near Zero Energy Buildings“ der EU oder das attraktivere Plusenergiehaus-Niveau zu erreichen. Vor allem in Gebieten mit einer höheren Gebäudedichte, in denen die Solarstrahlung den Wärmebedarf nicht decken kann, ist eine verstärkte Nutzung der KWK in Verbindung mit innovativen Nahwärme-/kältenetzen angebracht. Dabei sind verlustarme saisonale Wärmespeicher ein wichtiger Bestandteil.

### Verkehr

Elektromobilität spielt im erneuerbaren Energiesystem eine entscheidende Rolle. Elektroantriebe weisen mit ca. 80 % einen deutlich höheren Wirkungsgrad als Verbrennungsmotoren mit ca. 20 % in Bezug auf den eingesetzten Strom bzw. Kraftstoff auf [14]. Der Personenverkehr wird durch Elektromobile mit Batterieversorgung abgedeckt, welche durch kleinere Verbrennungsmotoren für erneuerbare Kraftstoffe oder durch Brennstoffzellen ergänzt werden können. Solche Hybridtechnologien eignen sich ebenfalls für den Güterverkehr. Für den Langstreckenverkehr, für Schiffe und Flugzeuge werden vor allem erneuerbare Kraftstoffe (synthetisches Methan/Wasserstoff) eingesetzt werden.

Die zentralen Herausforderungen in den verschiedenen Sektoren sind in [Tabelle 3](#) aufgelistet. Für alle diese Herausforderungen existieren technologische Lösungsansätze. Einige der zur Realisierung nötigen Schritte sind ebenfalls in der Tabelle gezeigt.

**Tabelle 3**  
Herausforderungen,  
Lösungsansätze und  
erforderliche Technolo-  
gien für den Umbau  
des Energiesystems

Sektor	Herausforderung	Lösungsansatz	Technologiebedarf
Stromnetze	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dezentrale Erzeugung</li> <li>• Fluktuierender Wind- und Solarstrom</li> <li>• Wechselrichter statt rotierender Generatoren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergänzung verschiedener erneuerbarer Energien</li> <li>• Überregionaler und internationaler Ausgleich</li> <li>• Verbrauchsflexibilisierung und -steuerung</li> <li>• „Smart Grids“</li> <li>• Energiespeicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• „Regeneratives Kombikraftwerk“</li> <li>• Netzausbau</li> <li>• Intelligente Netz- und Systemtechnik</li> <li>• Speichertechnologien</li> </ul>
Energiespeicher	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kurz- und mittelfristige Stromspeicher</li> <li>• Jahreszeitliche Stromspeicher</li> <li>• Speicherung von Wärme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrochemische Speicher und Pumpspeicherkraftwerke</li> <li>• Chemische Speicher</li> <li>• Thermische Energiespeicher</li> <li>• Druckluftspeicher</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Optimierung der Batterietechnologie</li> <li>• Ausbau von Pumpspeicherkraftwerken</li> <li>• Optimierung der Wasserstoff- und Methan-Technologie</li> <li>• Optimierung von Wärmespeichern</li> </ul>
Wärme und Wärmenetze	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion des Wärmebedarfs</li> <li>• Ersatz von Wärme aus fossilen Energieträgern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Steigerung der Energieeffizienz</li> <li>• Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intelligente Hochleistungsfasern zur Steuerung der Energieflüsse (Wärme und Licht)</li> <li>• Optimierung von solarthermischen Kollektoren, Biomasse- und Geothermieanlagen</li> <li>• Integrale Konzepte für energieoptimierte Gebäude und Stadtteile</li> <li>• Einsatz von Wärmepumpen</li> </ul>
Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ersatz von fossilen Treibstoffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektromobilität</li> <li>• Erneuerbare Kraftstoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektro- und Hybridfahrzeuge</li> <li>• Batterietechnologie</li> <li>• Effiziente Erzeugung erneuerbarer Kraftstoffe</li> <li>• Verteilnetze für erneuerbare Kraftstoffe</li> </ul>

## Fazit

Eine Vollversorgung mit erneuerbaren Energien ist bis zum Jahr 2050 möglich. Die wesentlichen Komponenten dieses Systems sind bekannt und vorhanden, müssen jetzt aber in Bezug auf Kosten und Effizienz sowie für den Breitereinsatz weiterentwickelt werden. Neben einer wesentlichen Steigerung der Energieeffizienz ist ein intelligentes Zusammenspiel von Erzeugung und Verbrauch notwendig. Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

und Erneuerbare Energien müssen intensiver erforscht und der Ausbau konsequent vorangetrieben werden. Das Energiesystem muss neu konzipiert und umgebaut werden. In den letzten Jahrzehnten wurden bereits große technologische Weiterentwicklungen auf diesem Weg realisiert. Technische Lösungsansätze für die Herausforderungen eines neuen, nachhaltigen Energiesystems sind vorhanden. Ihre Umsetzung erfordert ein konsequentes politisches Vorgehen und kontinuierliche Forschungsförderung.

## Literatur

- [1] Hauser, G., „Energieeffizienz – der wesentliche Lösungsansatz!“ wksb H. 58, 2007.
- [2] FVEE, „Energieeffizientes und solares Bauen – ein Paradigmenwechsel, Themenheft FVEE“, [www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2008-1/th2008.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2008-1/th2008.pdf), Dezember 2008.
- [3] Fraunhofer IBP, „Energiewende erfolgreich vollzogen: Die erste Plusenergieschule geht ans Netz“, [www.ibp.fraunhofer.de/Images/21\\_06\\_2011\\_PM\\_Symp\\_Eneff\\_Schule\(2\)\\_tcm45-92858.pdf](http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/21_06_2011_PM_Symp_Eneff_Schule(2)_tcm45-92858.pdf), Pressemitteilung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik vom 17. Juni 2011.
- [4] FVEE, „Vision des FVEE für ein 100 % erneuerbares Energiesystem“, [www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06\\_FVEE-Eckpunktepapier.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/politik/10.06_FVEE-Eckpunktepapier.pdf), Juni 2010.
- [5] Bhandari, R. and Stadler, I., „Grid parity analysis of solar photovoltaic systems in Germany using experience curves“, *Solar Energy* 83, 2009.
- [6] BMWi, „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“, Juli 2011.
- [7] FVEE, „Beitrag des FVEE zum 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“, [www.fvee.de/fileadmin/politik/fvee-input\\_6.efp\\_2010.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/politik/fvee-input_6.efp_2010.pdf), Oktober 2010.
- [8] Solar Promotion GmbH (Hrsg), „Broschüre zur Sonderschau PV ENERGY WORLD auf der Intersolar Europe 2011“, [www.intersolar.de/fileadmin/Intersolar\\_Europe/Besucher\\_Service\\_2011/ISE2011\\_PV\\_Energy\\_World.pdf](http://www.intersolar.de/fileadmin/Intersolar_Europe/Besucher_Service_2011/ISE2011_PV_Energy_World.pdf), Juni 2011.
- [9] ewi/gws/prognos, „Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung“, [www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszzenarien\\_2010.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/energieszzenarien_2010.pdf), August 2010.
- [10] BDEW, „Erneuerbare liefern mehr als 20 Prozent des Stroms“, [www.bdew.de/internet.nsf/id/DE\\_20110829-PI-Erneuerbare-liefern-mehr-als-20-Prozent-des-Stroms](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/DE_20110829-PI-Erneuerbare-liefern-mehr-als-20-Prozent-des-Stroms), Pressemitteilung des BDEW vom 29. August 2011.
- [11] Trieb, F., „Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power“, DLR Stuttgart, Abt. Systemanalyse und Technikbewertung für das Bundesumweltministerium (BMU), Stuttgart, [www.trec-uk.org.uk/reports/TRANS-CSP\\_Full\\_Report\\_Final.pdf](http://www.trec-uk.org.uk/reports/TRANS-CSP_Full_Report_Final.pdf), Juni 2006.
- [12] Mackensen, R., Rohrig, K. and Emanuel, H., „Das Regenerative Kombikraftwerk“, Abschlussbericht. ISET e. V. Kassel, [www.kombikraftwerk.de/fileadmin/downloads/2008\\_03\\_31\\_Ma\\_KombiKW\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.kombikraftwerk.de/fileadmin/downloads/2008_03_31_Ma_KombiKW_Abschlussbericht.pdf), April 2008.
- [13] BMWi, „Jahresstatistik zur deutschen Gaswirtschaft“, [www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=53746.html](http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=53746.html), Dezember 2008.
- [14] Sterner, M., Schmid, J. and Wickert, M., „Effizienzgewinn durch erneuerbare Energien – der Primärenergiebeitrag von erneuerbaren Energien“, BWK No. 60, Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 08/2008.

## ■ Politische Rahmenbedingungen

- Neue Akzente der Forschungsförderung für einen rascheren Ausbau der Erneuerbaren
- Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung
- Empfehlungen des FVEE für die Forschungspolitik der Bundesregierung
- **Podiumsdiskussion:**  
Wie können Forschung und Politik die Systemtransformation vorantreiben?

# Neue Akzente der Forschungsförderung für einen rascheren Ausbau der EE



RDir'in Kerstin Deller  
BMU  
Referatsleiterin  
„Forschung und  
Entwicklung  
Erneuerbarer Energien“  
kerstin.deller@bmu.bund.de

## Die Energiewende

Mit der Energiewende wurde der Ausstieg aus der Kernkraft bis 2022 beschlossen und es gibt eine klare Richtungsentscheidung pro erneuerbare Energien und Energieeffizienz.

Die Politik hat klare Ziele bis 2050 in 10-Jahresschritten vorgegeben:

- Minderung der Treibhausgas-Emissionen um 80 %
- Erneuerbare Energien decken 60 % des Endenergieverbrauchs bzw. 80 % des Stromverbrauchs
- Effizienzziel: Halbierung des Primärenergieverbrauchs

Zur Regelung der Rahmenbedingungen hat das Parlament im Frühsommer 2011 ein ganzes Maßnahmenpaket beschlossen:

- Novelle Atomgesetz (AtG)
- Novelle Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)
- Novelle Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)
- Novelle Netzausbaugesetz (NaBeG)

Die entscheidende Frage ist nun: Wie muss das Energiesystem umgestaltet werden, damit es mit einem Hauptanteil erneuerbarer Energien und fluktuierender Einspeisung aus Wind- und Sonnenenergie zuverlässig funktioniert? Der Back-Up durch fossile Energieträger, wird künftig immer weniger möglich sein. Perspektivisch immer wichtiger werden dann diese technologischen Lösungen:

- Speicher
- Netzausbau
- Intelligente Netze, aktives Nachfragemanagement sowie virtuelle regenerative Kombikraftwerke mit optimiertem Zusammenspiel von Erneuerbaren und Verbrauch (und soweit noch erforderlich auch von konventioneller Stromerzeugung)

## Das 6. Energieforschungsprogramm

Die Energiewende spiegelt sich auch im 6. Energieforschungsprogramm (EFP), das am 3. August 2011 vom Kabinett verabschiedet wurde. Die Koordinierung liegt beim Bundeswirtschaftsministerium. Es sind vier Ministerien mit folgenden Schwerpunkten beteiligt:

- Bundeswirtschaftsministerium (BMWi): Effizienztechnologien
- Bundesumweltministerium (BMU): Erneuerbare Energien
- Bundeslandwirtschaftsministerium (BMELV): Bioenergie
- Bundesforschungsministerium (BMBF): Grundlagenforschung und institutionelle Förderung

Entsprechend den Schwerpunkten der Energiewende ist das EFP auf erneuerbare Energien und Energieeffizienz sowie entsprechende Umgestaltung des Gesamtsystems ausgerichtet.

Nach den Plänen der Bundesregierung – vorbehaltlich der Zustimmung durch das Parlament – sind rund 3,5 Mrd. € von 2011 bis 2014 aus Bundeshaushalt und Energie- und Klimafonds vorgesehen; davon 1,3 Mrd. € für Erneuerbare. Besonders klar wird die Schwerpunktsetzung, wenn man allein die Projektförderung betrachtet: von den insgesamt 2,3 Mrd. € Projektmitteln für 2011 bis 2014 gehen 1,1 Mrd. € in die Erneuerbaren.

## Forschungsförderung für Erneuerbare durch das BMU

Die Forschungsförderung am BMU ist eingebettet in eine Gesamtstrategie zur Förderung der erneuerbaren Energien, zu der auch die Markteinführung gehört (EEG, MAP).

Die Projektförderung des BMU ist an strategischen Zielen ausgerichtet:

- Minderung der Treibhausgas-Emissionen
- Ausbau der Erneuerbaren
- Kostensenkung!
- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit deutscher Unternehmen
- Optimierung der Energieversorgungssysteme mit Hauptanteil Erneuerbarer
- Umwelt- und Naturverträglichkeit

Die Projektförderung wird mit den zur Verfügung stehenden Mitteln massiv ausgeweitet und innerhalb von 5 Jahren mehr als verdoppelt von 120 auf 250 Mio. €/anno (Abb. 1). Die Abbildung 2 zeigt, wie sich die Mittel im Einzelnen verteilen.

### Förderfelder des BMU

Der FVEE hatte Anregungen zur Schwerpunktsetzung im 6. EFP gegeben, von denen viele im verabschiedeten EFP wieder erkennbar sind. Zur Erreichung der Zielvorgaben ist die Förderung der gesamten Palette aller Erneuerbaren notwendig:

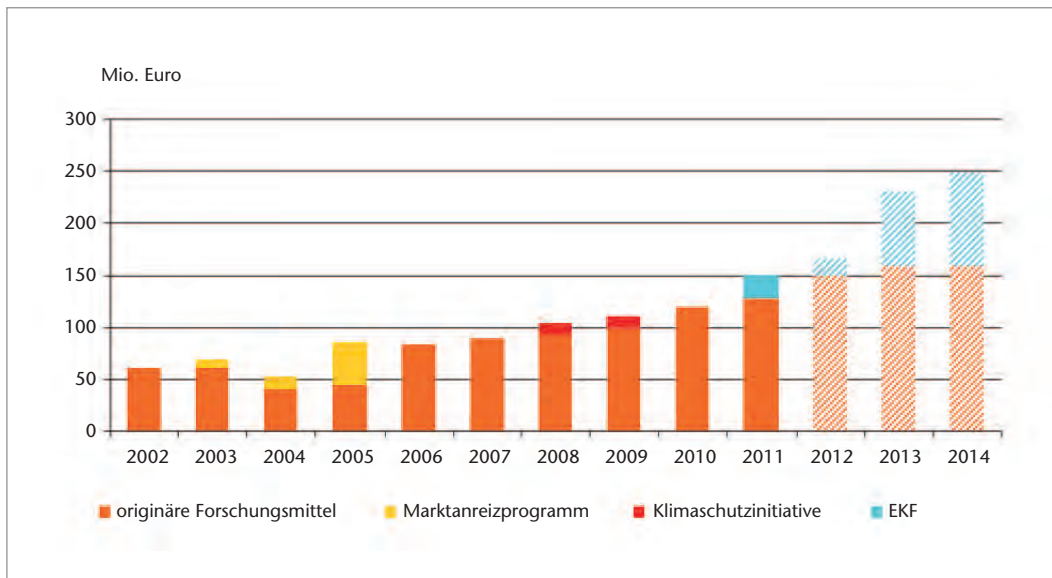


Abbildung 1  
Haushaltsansätze des BMU für Forschung im Bereich erneuerbare Energien

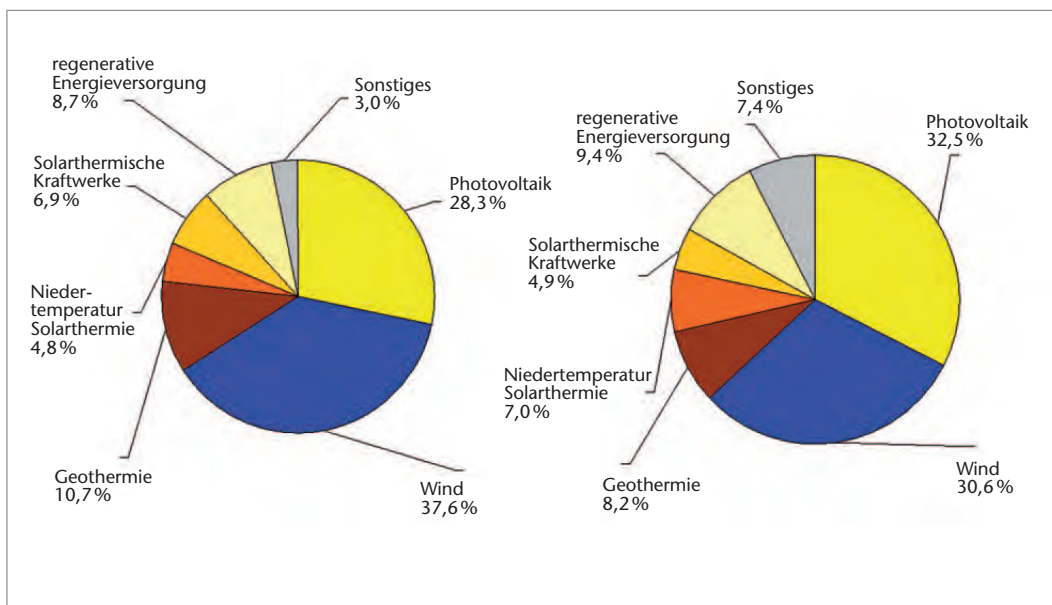


Abb. 2:  
Fördermittel des BMU: Neubewilligungen (links) und Mittelabfluss (rechts)

## Wind

- Windenergienutzung
  - Offshore
  - Onshore
  - Ökologische Begleitforschung (u. a. Schallentwicklung, Vogelflug)
- Gesamttechnologieentwicklung
  - Rotorblattentwicklung
  - Gondel
  - Getriebe
  - Fundamente
- Optimierung des Gesamtsystem bis hin zur Umfeldanalyse (Windprognosen, Optimierte Logistiksysteme)
- Das Offshore Testfeld Alpha Ventus und die Begleitforschung Research at Alpha Ventus (RAVE) ist erfolgreich. Zurzeit gibt es Gespräche über eine systematische Forschungsförderung im Rahmen eines weiteren, räumlich und zeitlich differenzierten Testfeldes am Rande kommerzieller Windparks.

## Photovoltaik

Geförderte PV-Technologien:

- Silizium-Wafertechnologie
- Dünnschichtsolarzellen
- Systemtechnik (u.a. dezentrale Leistungselektronik für Netzeinspeisung)
- alternative Solarzellenkonzepte und neue Forschungsansätze (konzentrierende PV, gebäudeintegrierte PV-Anlagen, Recycling)

Untersucht wird jeweils der gesamte Prozess vom Rohstoff bis zur Modulherstellung. Letztlich entscheidend ist die Übertragung der Innovationen aus dem Labor in die Praxis.

## Geothermie

- Technologieentwicklung
  - Bohrtechnologie
  - Pumpenentwicklung
  - Erschließungstechniken
  - Messverfahren
- Verringerung des Fündigkeits- und Erfolgsrisikos (neue Methoden, Modellierung, ...)
- Erhöhung der Akzeptanz (seismische Aktivitäten, Entsorgungsfragen)

## Niedertemperatur-Solarthermie

Zur Förderung der Niedertemperatur-Solarthermie hat gerade ein Strategiegelgespräch stattgefunden und es gab gute Inputs seitens der

Deutschen Solarthermie-Technologieplattform (DSTTP). Gefördert werden:

- Technologische Weiterentwicklungen
  - Kollektoren
  - Systemtechnik
  - Solare Kühlung und solare Prozesswärme
  - Wärmespeicherung
- Bessere Integration der Niedertemperatur-Solarthermie in konventionelle Wärmeversorgungssysteme, Verbindung mit energieeffizientem Bauen
- Prozesswärme für industrielle Anwendung

## Solarthermische Kraftwerke

Solarthermische Kraftwerke werden in Deutschland selbst zwar nicht angewendet, können aber perspektivisch einen wichtigen Beitrag für die Energieversorgung in Europa leisten und haben hohes Exportpotenzial.

- Weiterentwicklung und Kostensenkung für
  - Parabolrinnenanlagen
  - Fresnel-Anlagen
  - Solare Turmkraftwerke
  - Integrierte Speicher

## Sonstige Technologien

- Wasserkraft
- Meeresenergie in angemessenem Umfang mit besonderem Schwerpunkt auf ökologische Optimierung

## Integration erneuerbarer Energien/ Regenerative Energieversorgungssysteme

Zentrale Fragen sind: Wie muss das Gesamtsystem umgestaltet werden, damit es mit Hauptanteil erneuerbarer Energien zuverlässig funktioniert? Welche Technologien brauchen wir, damit Angebot und Nachfrage optimal aufeinander abgestimmt sind?

Der Förderschwerpunkt „Integration erneuerbarer Energien und regenerative Energieversorgungssysteme“ wird ausgeweitet.

Zentrale Themen der Projektförderung sind:

- Regenerative Kombikraftwerke/virtuelle Kraftwerke Intelligente Netze und Lastmanagement
- Ressortübergreifende Initiativen: Zum Thema „Speicher“ und gibt es schon eine ressortübergreifende Initiative, die mit einer Förderung bis 200 Mio. € gestartet ist. Für die Themen „Netze“ und „Solares Bauen/

Energieeffiziente Stadt“ sind ähnliche Initiativen in Planung.

- Systemdienstleistungen und verbesserte Prognosen für Erzeugung und Verbrauch

### Querschnittsforschung

Das BMU fördert neben den einzelnen Technologien in einem weiteren Referat auch die Querschnittsforschung. Hier werden ökonomische, soziale und ökologische Rahmenbedingungen für einen hohen Anteil erneuerbarer Energien in den Blick genommen.

Im Mittelpunkt stehen die Themen:

- Transformation der Energieversorgung hin zu einem weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhenden System und
- Markt- und Systemintegration der Erneuerbaren.

Weitere Förderthemen sind:

- rechtliche und ökonomische Aspekte der Integration der regenerativen Stromerzeugung ins Energiesystem
- Ressourcenverfügbarkeit
- Wechselwirkung mit umwelt- und naturschutzfachlichen und -politischen Aufgaben und Zielen
- gesellschaftliche und kulturelle Aspekte der Transformation, z. B. Akzeptanz, Siedlungsstrukturen, demographischer Wandel, etc.

### Weitere Förderungen des BMU

Außerhalb des 6. Energieforschungsprogramms – aber ebenfalls wichtig für die Transformation des Energiesystems – fördert das BMU wissenschaftliche Expertise als Grundlage für die Politikentwicklung. Dazu zählen u. a.:

- Langfriststrategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland (Leitszenarien EE)
- Prognosen und Szenarien in den Bereichen Klimaschutz sowie Umwelt und Energie

## Zusammenfassung

Entscheidend für die Energiewende ist die reale Umsetzung! Dabei sind Innovationen durch Forschung und Entwicklung ein wichtiger Faktor. Die Energiewende ist jetzt in den Gesetzestexten und Köpfen angekommen und zeigt sich auch schon in den realen Investitionsentscheidungen der Unternehmen. Wir brauchen für das Gelingen der Transformation engagierte Akteure des Wandels. Dazu zählen sicher auch die Forschenden für Erneuerbare.

## Weitere Informationen

Website des BMU zu Erneuerbaren:

[www.erneuerbare-energien.de/Forschung](http://www.erneuerbare-energien.de/Forschung)

- Bundesregierung 2011: 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung: Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.
- BMU 2011: Innovation durch Forschung. Jahresbericht 2010 zur Forschungsförderung im Bereich der erneuerbaren Energien.
- BMU 2008: Bekanntmachung über die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien (wird zurzeit angepasst)
- BMWi, BMU, BMBF 2011: Gemeinsame Förderinitiative Energiespeicher: Förderung von Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Energiespeichertechnologien.



# Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung – Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung



Dr. Rodoula Tryfonidou  
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
rodoula.tryfonidou@bmwi.bund.de

Die Bundesregierung hat festgelegt, wie sie in den kommenden Jahren Forschung fördern will, die zu „einer umweltschonenden, zuverlässigen und bezahlbaren Energieversorgung“ beiträgt. Mit der Verabschiedung des neuen Energieforschungsprogramms am 3. August 2011 setzte sie eine wichtige Maßnahme ihres Energiekonzepts um. Rund 3,5 Mrd. Euro stehen für die Förderung von Forschung und Entwicklung zukunftsfähiger Energietechnologien bis 2014 zur Verfügung. Das entspricht gegenüber der Vergleichsperiode 2006 bis 2009 einer Steigerung um etwa 75 Prozent, die zum größten Teil aus dem Energie- und Klimafonds finanziert wird.

Dieses 6. Energieforschungsprogramm orientiert sich an dem Energiekonzept der Bundesregierung vom 28. September 2010 sowie seiner Fortschreibung durch die Neubewertung der Kernenergie nach dem Erdbeben in Japan am 11. März 2011. Nach den energiepolitischen Entscheidungen des Kabinetts vom 6. Juni 2011 und der Zustimmung des Bundesrates im Juli 2011 zum so genannten Energiepaket „Beschleunigte Energiewende“ ist es Ziel, den Weg ins Zeitalter der erneuerbaren Energien noch schneller zu beschreiten und dabei eine sichere, wirtschaftliche und umweltverträgliche Energieversorgung in Deutschland zu gewährleisten.

Im Rahmen ihres Energiekonzepts hat die Bundesregierung ambitionierte Ziele formuliert. Für die künftige Ausrichtung der Energieforschungspolitik sind vor allem die langfristigen Vorgaben (2050) wichtig:

- **Senkung des Primärenergieverbrauchs:**  
–50 % gegenüber 2008
- **Senkung des Stromverbrauchs:**  
–25 % gegenüber 2008
- **Reduktion der Treibhausgase:**  
–80 bis 95 % gegenüber 1990
- **Anteil erneuerbarer Energien:**  
60 % am Bruttoendenergieverbrauch,  
80 % am Bruttostromverbrauch



Abbildung 1  
Coverbild des 6. Energieforschungsprogramms der Bundesrepublik

## 1. Das energiepolitische Umfeld

Die Energiepolitik ist ein wesentliches strategisches Element. Die Bundesregierung hat mit der grundlegenden Neuausrichtung ihrer Energiepolitik durch das Energiekonzept auch entschieden, ein neues Energieforschungsprogramm vorzulegen.

Die Anzahl und Qualität der energiewirtschaftlichen Vorgaben machen deutlich, dass die Bundesregierung für die kommenden 40 Jahre tiefgreifende Veränderungen des Energiesystems in Deutschland anstrebt. Der Weg, auf den sich Deutschland begibt, ist historisch einmalig und international bislang ohne Vergleich. Bei diesem Transformationsprozess geht es nicht um Veränderungen von Teilen, sondern um große Veränderungen des Ganzen. Wie auch immer dieser Transformationsprozess sich in den kommenden

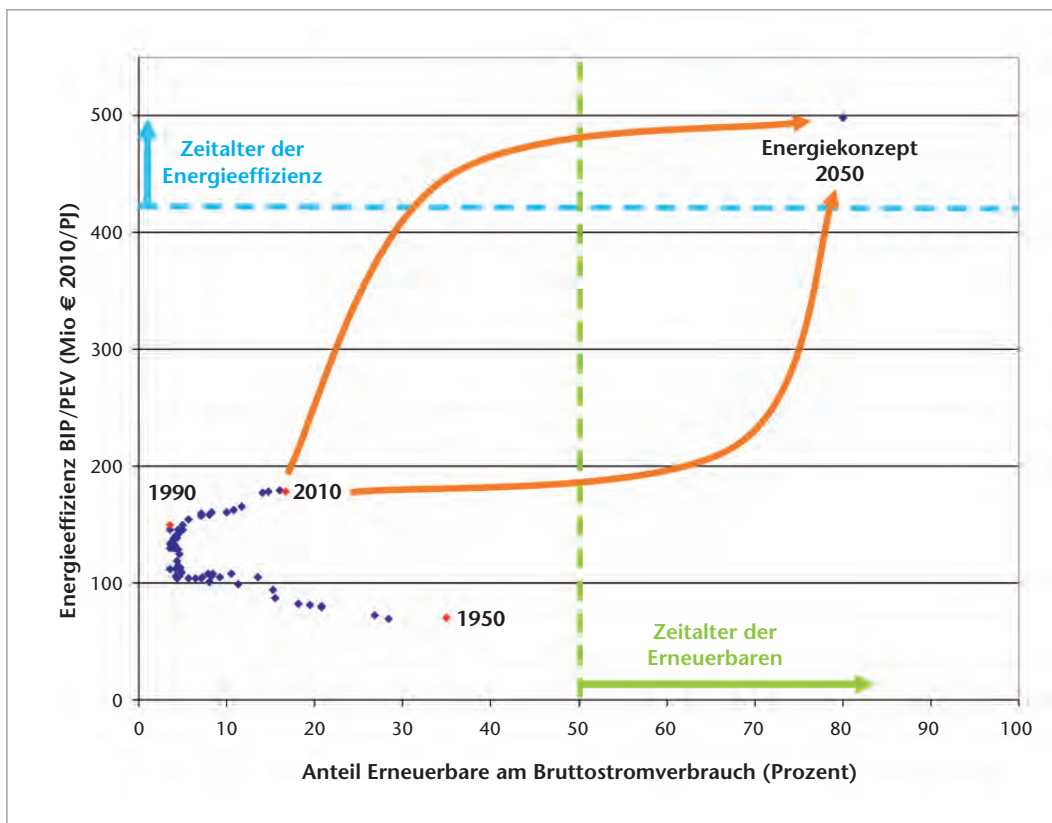


Abbildung 2  
Energiewirtschaftlicher Transformationsprozess in Deutschland (BIP = Bruttoinlandsprodukt, PEV = Primärenergieverbrauch)

Jahren vollziehen wird, er setzt Innovationen und neue Technologien voraus. Diesen Weg vorzubereiten und neue Technologien an den Markt heranzuführen, ist Aufgabe der Energieforschung.

## 2. Energieforschungspolitik

Die Bundesregierung verfolgt bei der Förderung von Forschung und Entwicklung von Energietechnologien Zielsetzungen, die einerseits energiepolitischer Art sind aber auch Aspekte der Industrie- und Technologiepolitik berücksichtigen. Damit leistet die Bundesregierung einen wichtigen Beitrag zu einer gesamtwirtschaftlichen Risikovor-sorge.

- Beitrag zur Erreichung der energiewirtschaftlichen und klimapolitischen Ziele
- Ausbau der führenden Position deutscher Unternehmen bei Energietechnologien
- Sicherung und Erweiterung der technologischen Optionen

### 2.1 Meilensteine der Energieforschungspolitik in Deutschland

Ein Jahr nach Ausbruch der ersten Ölkrise im Jahre 1973 hat die Bundesregierung ihr erstes Energieforschungsprogramm vorgelegt. Seitdem wurden mehrmals Anpassungen der Forschungsförderung im Energiebereich an veränderten Rahmenbedingungen durch die Ablösung eines laufenden durch ein neues Energieforschungsprogramm vorgenommen. Diese Kontinuität in der Forschungsförderung gab und gibt Wirtschaft und Wissenschaft verlässliche Rahmendaten für die Ausrichtung ihrer eigenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (Abbildung 3). Das 2011 vorgelegte 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung setzt Schwerpunkte auf den Bereichen Energieeffizienz und erneuerbare Energien.

Abbildung 3  
Energieforschungs-  
politische Meilensteine



### 3. Neue Akzente im 6. Energieforschungsprogramm

Die Zusammenarbeit von Wirtschaft, Wissenschaft und staatlicher Förderpolitik ist von außerordentlicher Bedeutung für die erfolgreiche Entwicklung und Markteinführung neuer Energietechnologien. Daher ist das 6. Energieforschungsprogramm Ergebnis eines umfangreichen Konsultationsprozesses. Es ist gut abgestimmt mit den Forschungsaktivitäten der Wirtschaft, der wissenschaftlichen Institutionen und der Bundesländer.

Aus folgenden Organisation von Wissenschaft und Wirtschaft kamen die Vorschläge:

- Energietechnologien 2050 (Fraunhofer Gesellschaft)
- Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren (HGF)
- Leopoldina, acatech, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften

- ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)
- Bundesverband Deutscher Industrie (BDI)
- Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (DECHEMA)
- Verband der Chemischen Industrie (VCI)
- Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE)
- Deutsche Solarthermie-Technologieplattform (DSTTP)

Mit Blick auf die effiziente Umsetzung des neuen Energieforschungsprogramms hat die Bundesregierung folgende Leitlinien festgelegt:

- **Strategische Fokussierung** auf die Schwerpunkte erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Energiespeicher, Netztechnologien und das Zusammenwirken der Technologien im Gesamtsystem. Damit sollen viel versprechende, innovative Technologien, die für die Beschleunigung der Energiewende notwendig sind, schneller in den Markt geführt werden.

- **Ressortübergreifende Zusammenarbeit** durch gemeinsame Förderstrategien auf ausgewählten und strategisch wichtigen Feldern, um Synergievorteile zu nutzen. Die erste gemeinsame Förderbekanntmachung zum Schlüsselthema „Energiespeicher“ startete in 2011 und hat ein Fördervolumen von 200 Mio EURO. Die Technologiefelder „Netze“ und „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ sollen folgen.
- **Internationale Kooperation**, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass Technologieentwicklungen aus einer globalen Perspektive heraus zu bewerten sind. Im Europäischen Kontext wird der Beitrag Deutschlands am SET-Plan (strategischer Energietechnologieplan) eine wichtige Rolle bei der nationalen Forschungsförderung spielen. Dabei werden Projekte mit europäischer Dimension (u. a. Netze, erneuerbare Energien, Smart Cities) priorisiert. Weiter wird das Engagement Deutschland bei Forschungsk Kooperationen im Rahmen der IEA verstärkt.
- **Abstimmung und Koordination** der Zusammenarbeit von Wirtschaft, Wissenschaft und staatlicher Förderpolitik ist für die erfolgreiche Umsetzung des neuen Energieforschungsprogramms ausschlaggebend. Die beim BMWi angesiedelte „Koordinierungsplattform Energieforschungspolitik“ wird daher ausgebaut und Förderaktivitäten der Länder und der europäischen Förderinstitutionen integrieren sowie zur effektiven Zusammenarbeit mit der Wirtschaft und Wissenschaft genutzt werden.
- **Finanzierung aus Energie- und Klimafonds:** Die Bundesregierung stellt im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms für die Forschungsförderung im Energiebereich 2011–2014 ca. 3,5 Mio. EURO zur Verfügung. Dies entspricht einer Steigerung von 75 % gegenüber der Vergleichsperiode 2006 bis 2009. Dieser beachtliche Aufwuchs speist sich größtenteils aus dem zum 1. Januar 2011 eingerichteten Sondervermögen „Energie- und Klimafonds“. Die aus diesem Fonds bereitgestellten Mittel werden ausschließlich für Forschungsvorhaben in den Bereichen „Erneuerbare Energien“ und „Energieeffizienz“ verwendet.

## 4. Implikationen auf die Forschungslandschaft

- **Fokussierung: erneuerbare Energien und Energieeffizienz**

Die Zukunft staatlicher Förderung im Energiebereich gehört der Energieeffizienz und den Erneuerbaren Energien. Von der zusätzlichen Finanzierung aus dem Energie- und Klimafonds profitieren ausschließlich diese beide für die künftige Energieversorgung Deutschlands wichtige Bereiche. In 2014 werden fast 80 % des Forschungsbudgets auf erneuerbare Energie und Energieeffizienz investiert.

- **Flexibilität: projektorientierte Förderung**

Das 6. Energieforschungsprogramm legt ein besonderes Gewicht auf eine Neuausrichtung der projektorientierten Förderung von Forschung und Entwicklung moderner Energietechnologien. Dadurch ist es am ehesten möglich, flexibel zu reagieren und schnell Erfolge beim Umbau der Energieversorgung zu erzielen.

- **Transparenz: zentrales Informationssystem und Bundesbericht**

Mit Blick auf die zahlreichen neuen Forschungsinitiativen mit Energiebezug ist Transparenz in der staatlichen Förderpolitik ein wichtiges Thema im 6. Energieforschungsprogramm. Durch geeignete Verfahren soll eine bessere Bewertung von Entwicklungen auf dem Bereich neuer Energietechnologien ermöglicht werden. Dazu wird beim BMWi ein *zentrales Informationssystem* eingerichtet und jährlich ein *Bundesbericht Energieforschung* vorgelegt.

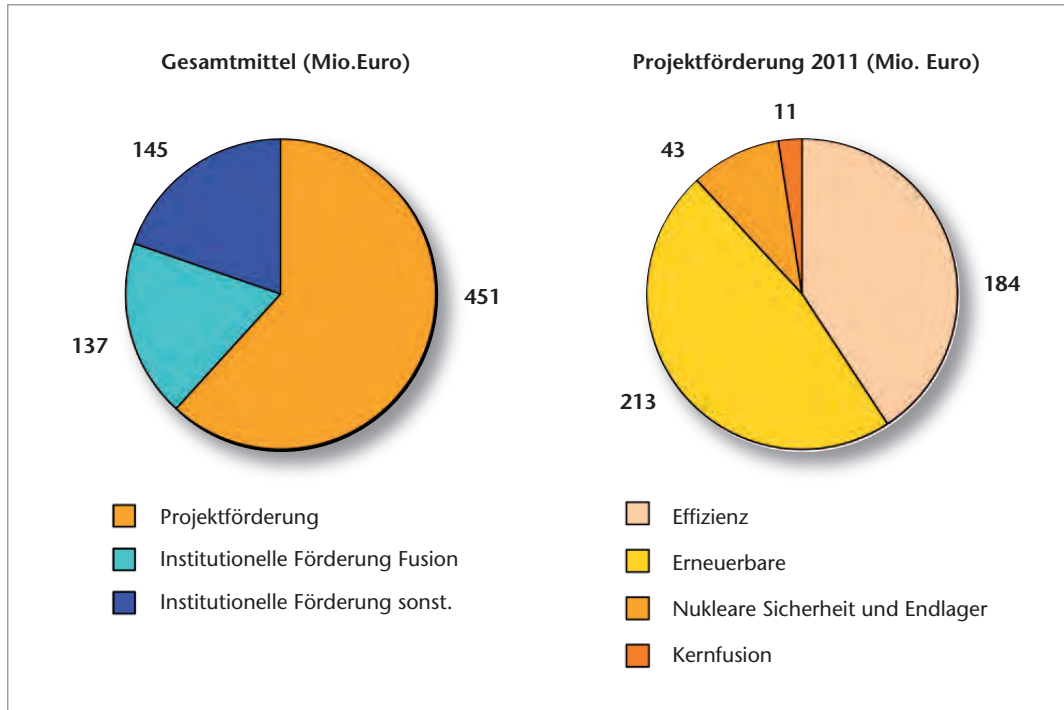
Zur Qualitätssicherung in der Forschungsförderung bedarf es der regelmäßigen Evaluierung und der kontinuierlichen Optimierung von Strukturen, Regelungen und Entscheidungsverfahren.

links:

Abbildung 4  
Gesamtmittel 2011  
(Mio. €)

rechts:

Abbildung 5  
Projektförderung 2011  
(Mio. €)

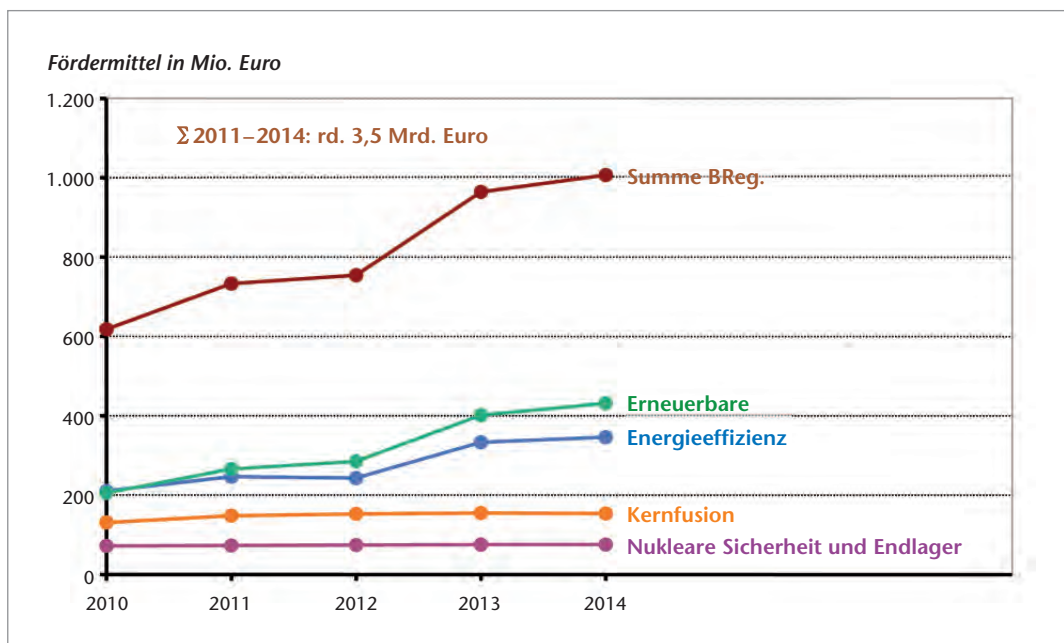


Die *Abbildungen 4* und *5* zur Mittelverteilung in der Energieforschung für das Jahr 2011 (Plandaten) verdeutlichen die Prioritäten bei der Forschungsförderung moderner Energietechnologien: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz einerseits und das flexible Instrument der projekt-orientierten Förderung.

#### 4.1 Fördermittel des Bundes für Energieforschung

Erneuerbare Energie und Energieeffizienz profitieren als einzige von der geplanten Mittelaufstockung, die größtenteils aus dem Energie- und Klimafonds eingespeist wird.

Abbildung 6  
Fördermittel des Bundes für Energieforschung

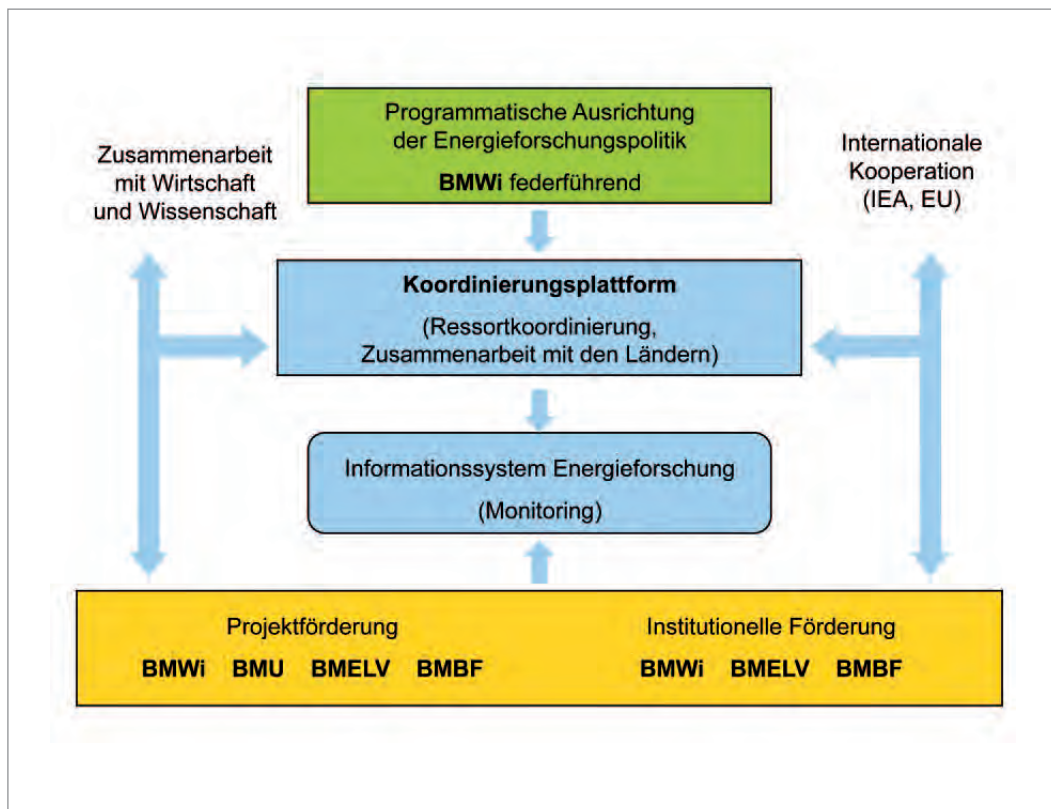


#### 4.2 Struktur der Forschungsförderung im Energiebereich

Die fachspezifische Arbeitsaufteilung zwischen den beteiligten Ressorts hat sich als produktiv und vorteilhaft herausgestellt:

- BMWi: Energieeffizienz
- BMU: erneuerbare Energien ohne Biomasse
- BMELV: Biomasse
- BMBF: Grundlagenforschung.

Gleichzeitig erfordert sie eine gut organisierte und produktive Koordination, die durch das federführende BMWi im Rahmen der Koordinierungsplattform erfolgt. Diese wird in Zukunft gestärkt und zur besseren Zusammenarbeit nicht nur innerhalb der Bundesregierung sondern auch mit den Bundesländern und den europäischen Förderinstitutionen genutzt werden.



# Empfehlungen des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien für die Forschungspolitik der Bundesregierung



Dr. Gerd Stadermann  
FVEE-Geschäftsführer  
fvee@helmholtz-berlin.de

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) hat wenige Tage nach der Reaktorkatastrophe in Fukushima einen Parlamentarischen Abend veranstaltet, um aktuelle und dringlicher gewordene Botschaften des ForschungsVerbunds zur Ausgestaltung des neuen 6. Energieforschungsprogramms (EFP) der Bundesregierung an die Politik zu senden. Im Vorfeld hatte der FVEE bereits 2010 einen Beitrag für die Erarbeitung des 6. EFP erarbeitet und den Ministerien zugeleitet. Erfreulicherweise wurden zwar viele dieser Anregungen aufgenommen, doch vor dem Hintergrund der Kernschmelzen in Fukushima gab es eine besondere Dringlichkeit des Umbaus der Energieversorgung, die mit dem inzwischen gefassten Beschluss der Bundesregierung, aus der Kernenergieerzeugung auszusteigen bestätigt wurde.

Der Bericht der Ethik-Kommission, der den Ausstiegsbeschluss inhaltlich vorbereitete, ist vom ForschungsVerbund begrüßt und mit einer Stellungnahme kommentiert worden.<sup>1</sup> Der FVEE will dazu beizutragen, dass die Empfehlungen der Ethik-Kommission von der Politik auch tatsächlich aufgegriffen und rasch umgesetzt werden.

Die im vorliegenden Artikel ausgesprochenen Empfehlungen beziehen sich auf das 6. EFP und den Bericht der Ethik-Kommission. Sie sollen die FVEE-Positionen unterstreichen, die Ansichten des ForschungsVerbunds zur Energie- und Forschungspolitik der Bundesregierung formulieren und gegenwärtige Entscheidungen kommentieren.

## 1. Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

Der FVEE besteht aus 12 Mitgliedsinstituten mit rund 2800 Mitarbeitenden. Sie machen den FVEE zum größten Kompetenznetzwerk für erneuerbare Energien in Deutschland und Europa (*Abb. 1*).

Die Institute des FVEE arbeiten auf allen Gebieten der erneuerbaren Energien und in vielen Bereichen der Energieeffizienz. Die im Zusammenhang mit der Transformationsforschung besonders wichtigen Themen sind Systemanalyse, Energie- und Wirtschaftsrecht und Energiepolitik. Inzwischen sind ca. 10% der Personalkapazität des FVEE auf diesen Gebieten tätig und die Bedeutung dieser Themen nimmt ständig zu. Erfreulicherweise spiegelt sich dieser Trend auch im 6. EFP wieder.

## 2. Die Energiewende 2011

Die Energiewende wird charakterisiert durch einen schnelleren Ausstieg aus der Kernkraft und einen rascheren Einstieg in die erneuerbaren Energien sowie die Energieeffizienztechniken. Die Energiewende ist eine Aufgabe größter Dimension. Besonders wichtig ist daher eine Neuausrichtung der Energieforschung wie sie von den für Forschung und Entwicklung zuständigen Ministerien vorgenommen wurde. Denn Aufgabe der Wissenschaft und Forschung ist es, den Umbau der Energieversorgung zu einem nachhaltigen System wissenschaftlich zu begleiten und voranzutreiben.

<sup>1</sup> Stellungnahme im Internet:  
[www.fvee.de/publikationen/publikation/download/stellungnahme-des-fvee-zum-bericht-der-ethikkommission/](http://www.fvee.de/publikationen/publikation/download/stellungnahme-des-fvee-zum-bericht-der-ethikkommission/)



# Gemeinsam forschen für die Energie der Zukunft

- 
**DLR**  
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
 in der Helmholtz-Gemeinschaft
- 
**Forschungszentrum Jülich**  
 in der Helmholtz-Gemeinschaft
- 
**Fraunhofer IBP**  
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- 
**Fraunhofer ISE**  
 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
- 
**Fraunhofer IWES**  
 Fraunhofer-Institut für Windenergie  
 und Energiesystemtechnik
- 
**GFZ**  
 Helmholtz-Zentrum Potsdam  
 Deutsches GeoForschungsZentrum
- 
**HZB**  
 Helmholtz-Zentrum Berlin  
 für Materialien und Energie
- 
**ISFH**  
 Institut für Solarenergieforschung  
 Hameln/Emmerthal
- 
**IZES**  
 Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH
- 
**WI**  
 Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
- 
**ZAE Bayern**  
 Bayerisches Zentrum für Angewandte  
 Energieforschung e. V.
- 
**ZSW**  
 Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-  
 Forschung Baden-Württemberg



Abbildung 1  
Die Mitgliedsinstitute des FVEE und ihre Standorte

Abbildung 2  
Forschungsthemen im FVEE

## Forschungsthemen im FVEE

Photovoltaik	27%	Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • HZB • ISFH • Jülich • ZAE Bayern • ZSW
Solarthermische Kraftwerke	4%	DLR • Fraunhofer ISE
Solare Wärme und Kälte	4%	DLR • Fraunhofer IBP • Fraunhofer ISE • ISFH • IZES • ZAE Bayern
Systemtechnik und Netzmanagement	10%	DLR • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • IZES • Jülich • ZAE Bayern
Solares und energieeffizientes Bauen	12%	Fraunhofer IBP • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • IZES • ZAE Bayern • ZSW
Biomasse	3%	DLR • Fraunhofer IBP • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • IZES • Jülich • ZAE Bayern • ZSW
Kraftstoffe	3%	DLR • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • ZAE Bayern • ZSW
Geothermie	3%	Fraunhofer IBP • GFZ • ZAE Bayern
Wind- und Meeresenergie	5%	Fraunhofer IWES
Brennstoffzellen und Wasserstoff	19%	DLR • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • HZB • IZES • Jülich • ZAE Bayern • ZSW
Energiespeicherung	8%	DLR • Fraunhofer IBP • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • IZES • ZAE Bayern • ZSW
Technikfolgenabschätzung, Energierrecht und -wirtschaft	2%	DLR • Fraunhofer ISE • Fraunhofer IWES • IZES • Jülich • ZSW

In den 12 Mitgliedsinstituten arbeiten insgesamt ca. 2800 Mitarbeitende an den verschiedenen Themen. Die Personalkapazität je Thema ist in Prozent angegeben.



Die Bundesregierung hat am 30. Juni 2010 eine Fülle neuer Gesetze und Maßnahmen erlassen, um die Energiewende umzusetzen. Die Neuausrichtung des Energieforschungsprogramms ist eine der Maßnahmen:

- rascherer Einstieg in die Nutzung erneuerbarer Energien vom Nischenmarkt zum Volumenmarkt
- Verbesserung der Ressourceneffizienz zur Energieerzeugung und -nutzung
- Energieeinsparverordnung (EnEV)
- KfW-Gebäudesanierungsprogramm
- Ausbau der Energienetze für Strom, Wärme und Kraftstoffe (Netzausbaubeschleunigungsgesetz)
- Neuausrichtung der Energieforschung:
  - 6. Energieforschungsprogramm
  - Förderinitiative Energiespeicherung

### 3. Bericht der Ethikkommission: „Deutschlands Energiewende – Ein Gemeinschaftswerk für die Zukunft“

Der Bericht der Ethikkommission, der innerhalb von wenigen Wochen vorgelegt wurde, ist aus Sicht des FVEE von hervorragender Qualität, weil er nicht nur die technische und gesellschaftliche Machbarkeit des Ausstiegs aus der Kernenergienutzung beschreibt, sondern vor allem die technische, ökonomische und soziale Machbarkeit des Einstiegs in die erneuerbaren Energien und die Energieeffizienz aufzeigt.

Die Ethik-Kommission empfiehlt folgende gesellschaftliche und sozialwissenschaftliche Forschungen für die Energiewende:

- Entwicklung neuer Formen der Beteiligung von Gesellschaft und Wirtschaft
- Interaktion von Technologieentwicklung und rechtlichen, ethischen und sozialpolitischen Aspekten
- Entwicklung neuer Formen der Bürgerbeteiligung und von Betreibermodellen
- Einführung des Amtes eines unabhängigen Parlamentarischen Beauftragten für die Energiewende

- Einrichtung eines Nationalen Forums Energiewende
- Einbeziehung der Forschung in einen Monitoring-Prozess

Besonders wichtig erscheint dem FVEE die Interaktion von Technologieentwicklung mit rechtlichen, ethischen und sozialpolitischen Aspekten, die in neue Formen der Beteiligung von Wirtschaft und Bürgern münden soll und die Forderung zur Einführung von Ämtern und Gremien, um das Projekt der Energiewende als Ganzes im Auge zu behalten. Der FVEE unterstützt insbesondere die Forderung nach einem Monitoring des Umbauprozesses.

Konsequenterweise wird Wissenschaft und Forschung eine besondere Rolle im Bericht der Ethik-Kommission zugemessen:

- Forschung zur raschen Kostensenkung der erneuerbaren Energien
- Forschung für neue Energiespeichertechnologien
- Entwicklung der Elektromobilität
- verstärkte Beachtung des systemischen Charakters der Energieforschung
- energetische Stadtsanierung
- Dezentralität der Energieerzeugung in Kommunen und Regionen

### 4. Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung

Der FVEE begrüßt das neue Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, denn mit einer Finanzplanung von 2,4 Mrd. Euro für Forschung und Entwicklung bis 2014 setzt es verlässliche forschungspolitische Rahmenbedingungen. Zum ersten Mal in einem deutschen Energieforschungsprogramm dominieren mit 73 % des Budgets die finanziellen Ansätze für erneuerbare Energien und Energieeffizienztechnologien. Damit geht eine deutliche Ausweitung der Forschungsthemen für erneuerbare Energien und Energieeffizienz in ganzer Bandbreite einher.

Das 6. EFP bietet damit einen neuen strategischen Forschungsansatz für den Umbauprozess des Energiesystems, der auch eine verstärkte Vernetzung der Forschung innerhalb der EU fördert. So werden Wissenschaft und Forschung zu einer treibenden Kraft des Transformationsprozesses und ihnen wird der Stellenwert zugewiesen, der Ihnen laut Ethik-Kommission auch zukommen sollte.

#### Kritikpunkte seitens des FVEE:

##### 1. Förderstruktur

Das Programm ist in seiner Förderstruktur zu stark auf die einzelnen Ministerien BMU, BMWi, BMBF und BMELV zugeschnitten. Es ist kein Forschungsprogramm aus einem Guss.

##### 2. Ressourceneffizienz/Energieeffizienz

Der Begriff der Ressourceneffizienz wird neben den der Energieeffizienz gestellt. Unter Ressourceneffizienz versteht man den sparsamen und effizienten Einsatz der natürlichen Ressourcen. Zu ihnen zählen aber auch die erneuerbaren Energien, die zwar im Überfluss vorhanden sind, nicht aber die Rohstoffe, Materialien und Techniken, um sie zu ernten und zu nutzen. Daher sollte der Begriff Ressourceneffizienz zum Überbegriff werden für alle rationellen Energietechniken und die Energieeffizienz speziell für den rationellen Energieeinsatz.

##### 3. Von der Systemintegration zur Systemtransformation

Die Systemtechniken bilden im 6. EFP einen wichtigen Schwerpunkt. Doch ist in diesem Zusammenhang nur von Systemintegration der erneuerbaren Energien die Rede. Der Begriff Systemtransformation wird dagegen im 6. EFP nicht genannt. Doch das Energiesystem der Zukunft wird vielschichtiger, komplexer und dezentraler, wobei Systemgrenzen der einzelnen Technologien überschritten werden. Dieser Entwicklung müssen sich alle Energietechniken anpassen – die Konventionellen ebenso wie die Erneuerbaren. Es geht daher nicht mehr nur um eine Systemintegration der erneuerbaren Energien, sondern es geht um eine Systemtransformation des gesamten Energiesystems, bei der sich die Energie-Infrastrukturen – Strom-, Gas- und Kraftstoffverbundnetze – miteinander vernetzen.

##### 4. Informations- und Kommunikationstechniken im 6. EFP verstärken

Die Informations- und Kommunikationstechnologien werden im Systemtransformationsprozess eine Schlüsselrolle spielen. Der erzeugte Strom muss je nach Bedarf und Kostenoptimierung über die verschiedenen Formen der Energiespeicherung mit der Wärmebereitstellung und mit den Kraft- und Brennstoffen verbunden werden. Diese müssen wieder in Strom oder Wärme umgewandelt werden können. Mit anderen Worten, die einzelnen dezentralen erneuerbaren Energien (PV, Wind, Wasser, Bioenergie) und Speichertechniken müssen über Informations- und Kommunikationstechnologien mit den so genannten regenerativen Kombikraftwerken (das können zum Beispiel Stadtwerke sein, die den Strom vergleichmäßigen) alle miteinander verbunden sein. Daher ist die Entwicklung spezieller dafür geeigneter Informations- und Kommunikationstechnologien essentiell – d. h., die Entwicklung eines zukünftigen „Energieinternets“ ist eine Grundvoraussetzung für ein reibungsloses Zusammenspiel aller dezentralen Einzeltechniken, der regenerativen Kraftwerke und der Energie-Infrastrukturen. In ein solches Energieinternet sollten sich auch die Bürger aktiv einbringen oder passiv beteiligen können, es wäre sozusagen die Software für ein dezentrales, zuverlässiges und robustes Versorgungssystem.

Weil Systemtransformation im 6. EFP noch kein explizites Thema ist, sind auch die dafür notwendigen Informations- und Kommunikationssysteme bisher nicht in Förderprogramme einbezogen. Auch die Verbindung der verteilten Kraftwerke mit einem demokratischen Energieinternet ist noch nicht als Forschungs- und Entwicklungsthema erkannt. Doch gerade auf diesem Feld könnte und sollte in Zukunft viel geschehen, um die Übernahme der Verantwortung der Bürger für die Energiewende zu fördern und Mitgestaltung zu ermöglichen. Dazu bedarf es der Transparenz von Verbrauch, Erzeugung und Kosten.

##### 5. Transformationsforschung als neues Themenfeld

Transformationsforschung steht im Kontext des gesamten 6. EFP. Der Begriff Transformationsforschung – vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) und FVEE empfohlen – wird im 6. EFP

aber nur im Zusammenhang mit gesellschaftlichen und sozialen Prozessen aufgegriffen. Der FVEE meint aber, dass Transformationsforschung mehr ist. Denn man kann die zentrale Frage: „Wie kann das Energiesystem am effizientesten umgebaut werden?“ nur in einer Zusammenschau von Technologieentwicklung und soziale Prozessen beantworten. Die Themen der Jahrestagung 2011 zeigen diese Verbindung und weisen alle über den Horizont der Einzeltechnologien hinaus und berühren auch technologieeitig das Leben der Bürger:

- Systemanalysen, Zusammenspiel der Technologien, Langfristszenarien
- Beobachtung des Strukturwandels des Energiesystems
- Entwicklung von Modellregionen, Stadt- und Quartierskonzepte
- Ressourcenmonitoring für Stoffe in der Produktion von Energietechnologien
- Vermeidung von Nutzungskonflikten bei begrenzten Energierohstoffen
- politische Rahmenbedingungen für Forschung, Wirtschaft und Bürgerbeteiligung
- Anreizsysteme für Investitionen, die der Markt nicht generiert: Kapazitätsmärkte
- neue Modelle zur Kopplung von Forschung und Industrie
- Akzeptanz- und Partizipationsforschung

Auch die Ethikkommission empfiehlt, die Interaktion von Technologieentwicklung und rechtlichen, ethischen sowie sozialpolitischen Aspekten zu erforschen und neue Ansätze zu entwickeln. In den Querschnittsförderungen des BMU und BMBF sind derlei Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zwar angelegt, doch wäre hier eine deutlichere und transparentere Forschungsförderung wünschenswert.<sup>2</sup> Da das 6. EFP laut BMBF ein „lernendes Forschungsprogramm“ sein wird, ist der FVEE zuversichtlich, dass die Förderbereiche sich weiterentwickeln und ausgebaut werden.

<sup>2</sup> Inzwischen gibt es Überlegungen, die Forschungsförderung in diese Richtung zu erweitern.

## 6. Entwicklung der Forschungsstrukturen

Um die Forschungsförderung in den nächsten Jahren gezielt zu steuern, sind im 6. EFP mehrere Instrumente vorgesehen:

1. Ausbau der Koordinierungsplattform „Energieforschungspolitik der Ministerien“
2. Aufbau eines zentralen Informationssystems zur Erhöhung der Transparenz der verschiedenen Förderungen der Ministerien
3. Entwicklung eines Technologieradars am BMBF

Diese Instrumente der Steuerung der Forschung und Entwicklung können sicher die kritisierte Untergliederung des 6. EFP in die Ministeriums-bereiche ein Stück weit kompensieren.

Darüber hinaus ist es eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeit, in Zukunft Forschungsnetzwerke verstärkt zu fördern. Erneuerbare Energien sind dezentraler und vielfältiger in ihrer Wirkungsweise. Dies spiegelt sich in der deutschen Forschungslandschaft deutlich wider. Sie ist insbesondere in den Bereichen der Erneuerbaren und der Energieeffizienz dezentral strukturiert. Dabei engagieren sich die FVEE-Institute in regionalen Aktivitäten. Diese Forschungskultur gilt es zu erhalten und weiter zu fördern, um das Konzert der Erneuerbaren zu einem nachhaltigen Gesamtsystem zusammenzuführen, die Vielfalt der Forschungs- und Entwicklungsansätze zu erhalten und um regionale und interdisziplinäre Einflüsse besser in die Projekte aufzunehmen.

Auch für die Steuerung der Forschungsförderung durch die Ministerien sind die Signale aus den Bundesländern, den Städten, Gemeinden und Regionen wichtig. Sie kommen zum großen Teil aus Forschungsinstituten. Der FVEE wird sich bemühen, diese Signale den Ministerien möglichst gebündelt zur Verfügung zu stellen, bzw. dem Technologieradar des BMBF zu übergeben.

## 7. Zur Finanzierung von Forschung und Entwicklung

Die Finanzplanung im 6. EFP ist entsprechend des Zuschnitts der Programmstruktur auf die Ministerien nicht aus einem Guss. Die verschiedenen Finanzplanungstabellen werden zwar informell zusammen geführt, aber sie weisen meist keine thematischen Bezüge und keine Prioritätenset-

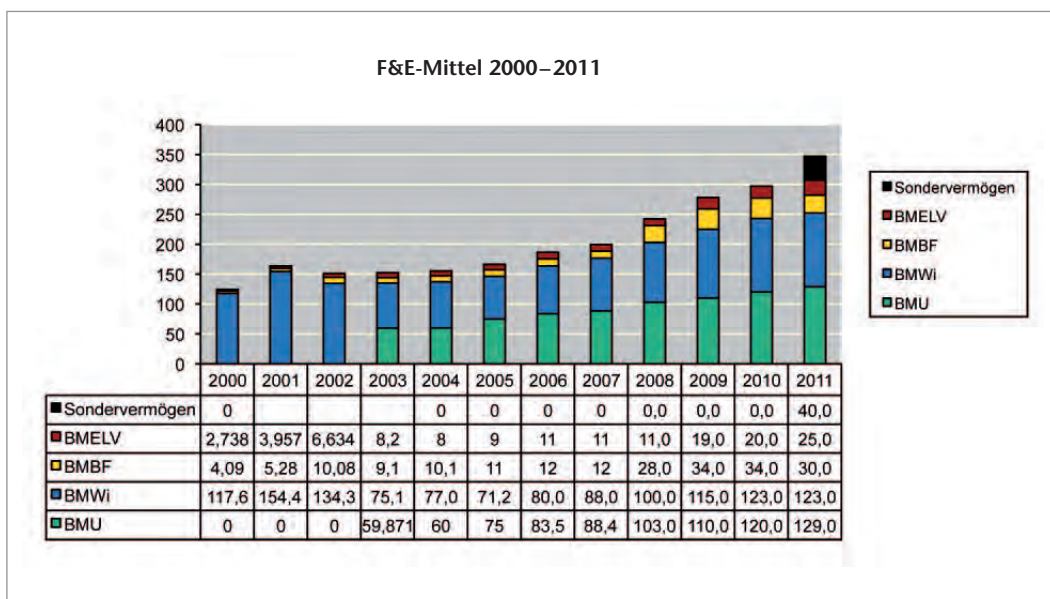
zung aus. Besonders wichtig wäre eine deutlich bessere Finanzierung von Themen der Grundlagenforschung. Denn Forschung muss auch im Bereich der Erneuerbaren grundsätzlich zukunfts-offen sein. Große Durchbrüche sind vor allem durch ganz neue Ansätze zu erreichen. Dafür ist sowohl eine verlässlich steigende institutionelle Förderung der Energieforschung notwendig als auch Projektförderung im Grundlagenforschungsbereich. Gerade im FVEE wird die Förderung der Grundlagenforschung benötigt, weil die Helmholtz-Zentren hier ihren Schwerpunkt haben.

Doch es gibt ein Problem. Während die HGF- und Fraunhofer-Institute durch die Projektförderung auch immer Teile der Institutsverwaltung, des so genannten Overheads, mitfinanzieren können, ist das für die Landesinstitute nicht möglich. Das ist ungerecht und verhindert das Wachstum dieser Institute. Diese gegenwärtig unterschiedliche Förderpraxis für Bundes- und Landesinstitute behindert den Wettbewerb und den Ausbau exzellenter Forschungskapazitäten. Der Forschungsverbund Erneuerbare Energien moniert diese Förderpraxis schon seit Jahren, ohne dass sich bisher etwas geändert hätte. Daher wird dieses Problem auch ein Thema für das Monitoring sein.

Aus finanzieller Sicht empfiehlt der FVEE:

- Die Finanzplanung des 6. EFP sollte eine thematische Prioritätensetzung stärker erkennbar machen und eine Gliederung in Grundlagenforschung und Projektförderung ausweisen.
- Die Dimension des energetischen Umbaus erfordert auch in diesem Bereich eine kontinuierliche und steigende Forschungsförderung.
- Eine Angleichung der Förderpraxis für alle Forschungsinstitute, also auch der Landesinstitute ist notwendig.
- Der WBGU empfiehlt in seinem Hauptgutachten „Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation“ eine Verzehnfachung der Forschungsausgaben im Energiebereich. Der FVEE schließt sich dieser Empfehlung an und empfiehlt, die öffentliche und die institutionelle Forschungsförderung um jährlich 20 Prozent kontinuierlich anzuheben.

In *Abbildung 3* ist die Entwicklung der Forschungs- und Entwicklungsmittel in den vergangenen zehn Jahren dargestellt. Wenn diese Entwicklung anhält, können wir mit Optimismus in die Zukunft schauen. Die Planungen im 6. EFP sind hoffnungsvoll und wenn der Dialog zwischen Forschung und Politik fruchtbar weitergeführt und intensiviert wird, können wir gemeinsam die Herausforderungen des Transformationsprozesses meistern.



*Abbildung 3*  
Entwicklung der Fördermittel für Forschung und Entwicklung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz

## 5. Monitoring für Technologieentwicklung und Akzeptanz

Am 6. Juni 2011 ist in einem Grundsatzpapier des Umweltministers zur Energiewende beschlossen worden, mit einem Monitoring den Transformationsprozess zu überwachen. Dafür müssen aus Sicht des FVEE Technologie-Monitoring, Systemanalyse und Transformationsforschung stärker gefördert werden, und zwar auch als ein Bestandteil von Forschungsvorhaben. Denn wenn Wissenschaft und Forschung eine Schlüsselrolle im Transformationsprozess innehaben, dann ist damit auch eine Überwachung des Prozesses verbunden. Ein Monitoring muss die Veränderungen im Prozess der Transformation bundesweit systemanalytisch beobachten und bietet durch strategische Systemanalysen eine kontinuierliche energiepolitische Orientierung, es wirkt als treibende Kraft und erlaubt eine konstruktive und kritische Begleitung der Umbauprozesse.

Wissenschaft und Forschung müssen überdies in die Diskussion über die Interpretation der Ergebnisse des Monitoringprozesses sowie in die Entscheidungsfindungen einbezogen werden.

Inzwischen ist der Monitoringprozess am 19.10.2011 von der Bundesregierung unter der Überschrift „Energie der Zukunft“ begonnen worden. Damit soll der Transformationsprozess hin zu „einer umweltschonenden, zuverlässigen und bezahlbaren Energieversorgung“ kontinuierlich überprüft werden. Das Monitoring wird gemeinsam von BMWi und BMU gesteuert. Das BMWi beobachtet die Themen Netzausbau, Kraftwerksbau, Ersatzinvestitionen und Energieeffizienz. Das BMU beobachtet den Ausbau der erneuerbaren Energien. Beide Ministerien wollen jährlich gemeinsam einen Monitoring-Bericht erstellen und alle drei Jahre einen Fortschrittsbericht.

Dabei wird es wichtig sein, dass Technologieentwicklungen, der aktuelle Stand des Umbaus und die demnächst erforderlichen Maßnahmen in die Öffentlichkeit getragen werden, damit diese den Umbau verstehen und von der Richtigkeit der Veränderungsprozesse überzeugt sind.

## Zusammenfassung der Empfehlungen

- Ressourceneffizienz zur Energieerzeugung und -nutzung in das Zentrum der Energieforschungsförderung rücken
- Förderung von Informations- und Kommunikationstechniken für das Zusammenspiel der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienztechniken
- Systemtransformation als zentralen Begriff in das Zentrum des 6. Energieforschungsprogramms rücken
- Verstärkte Förderung der Transformationsforschung zur Entwicklung der Interaktion von Technologieentwicklung und gesellschaftlich sozialen Entwicklungen
- Verstärkte Förderung von Forschungsnetzwerken
- Verstärkte Förderung der Grundlagenforschung
- Eine Angleichung der Förderpraxis für alle Forschungsinstitute
- Einbeziehung von Wissenschaft und Forschung in das Monitoring des Transformationsprozesses

## Podiumsdiskussion

# Wie können Forschung und Politik die Systemtransformation vorantreiben?

## Projektförderung im Fokus

**Tryfonidou:** Wir müssen unterscheiden: Es gibt die institutionelle Förderung des Bundes, vorwiegend Grundlagenforschung, und die Projektförderung. Wir sehen in der Projektförderung ein flexibles Instrument, um auf Entwicklungen reagieren zu können und schneller zu Erfolgen zu kommen. Wir meinen, dass der Zuwachs an Mitteln, der ja vorwiegend vom Energie- und Klimafonds kommt, dazu dienen sollte, kurz- bis mittelfristig zu Ergebnissen zu kommen. Dafür ist die anwendungsnahe und marktnahe Entwicklung von Energietechnologien erforderlich, also ist der Zuwachs eher in diesem Bereich zu verzeichnen.

**Weber:** Die Unterscheidung Grundlagenforschung/angewandte Forschung ist unterschiedlich zur Unterscheidung institutionelle Förderung/

Projektförderung. Wenn ich das Beispiel USA zitieren darf: Da wird die tiefste Grundlagenforschung, auch die, die dann die Nobelpreise bringt, über Projektförderung finanziert. Da werden Anträge gestellt, die sich im Wettbewerb mit anderen Grundlagenforschungsanträgen durchsetzen und die besten werden gefördert. Wir brauchen natürlich institutionelle Förderung für große Projekte. Aber meines Erachtens können gute Grundlagenforschungsprojekte sich genauso gegen andere Grundlagenforschungsprojekte durchsetzen. Insofern bin ich sehr erfreut über diese wirklich klare Betonung der Projektförderung. Denn das ist das, was den Wettbewerb ausmacht und was garantiert, dass die Mittel auch wirklich in die besten Projekte fließen.

**Tryfonidou:** Der Schwerpunkt des 6. EFP liegt tatsächlich auf der anwendungsbezogenen, marktnahen Forschung, aber das schließt natür-

Dr. Rodoula  
Tryfonidou  
BMW

RDIR'in Kerstin Deller  
BMU

Prof. Dr. Eicke Weber  
Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Frithjof Staiß  
ZSW

Dr. Andreas Bett  
Fraunhofer ISE

Prof. Dr. Gerd Hauser  
Fraunhofer IBP

Moderation:  
Micheale Hustedt





RDir'in Kerstin Deller

lich nicht alles andere aus. Und ganz ehrlich: Bei dieser Ausstattung wird es nicht an den Mitteln scheitern. Viel mehr wird es darum gehen, dass die richtigen Themen eingereicht werden.

**Deller:** Wir haben ja ausführlich dargestellt, dass für Mittelaufwuchs bei der Projektförderung im Rahmen der Haushaltsplanung gesorgt ist. Angesichts der allgemeinen Haushaltssituation und der Eurokrise sind wir in der Energieforschung ziemlich gut aufgestellt. Man muss letztlich auch realistisch bleiben im Hinblick darauf, wie schnell Institute wachsen können und wie schnell der Nachwuchs qualifiziert werden kann. Ein realistischer, kontinuierlicher Aufwuchs ist hier die richtige Herangehensweise.

## Haushaltsmittel vs. Energie- und Klimafonds

**Deller:** Wir sind in der Vergangenheit und aktuell gut damit gefahren, dass es uns gelungen ist, die Bedeutung der Energieforschung herauszustreichen und deutlich zu machen, dass dafür entsprechende Mittel notwendig sind. Im Haushalt steht man natürlich immer im Wettbewerb zu völlig anderen Fragestellungen. Wenn die Mittel knapper werden, wird gefragt: Wieso gibt die Bundesregierung das Geld für Energieforschung und nicht beispielsweise für soziale Belange aus? Im Energie- und Klimafonds dagegen haben die Mittel eine ganz klare Zweckbestimmung: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz – das ist ein Vorteil. Wie die Mittelausstattung im EKF aussieht, ist auch davon abhängig, ob wir erfolgreich dabei sind, eine anspruchsvolle Klimapolitik innerhalb der EU festzulegen. In dem Moment, in dem sich die Mitgliedstaaten dazu bereit erklären, ihre Treibhausgasemissionen um 30 % bis 2020 zu mindern, muss man sich um eine angemessene Ausstattung des Energie- und Klimafonds, der sich ja aus den Emissionshandelserlösen speist, keine Sorgen machen.

**Tryfonidou:** Wir werden aufgrund der Finanz- und Schuldenkrise auch in Deutschland deutlich sparen müssen. Da wären Haushalte nicht unbedingt eine sichere Bank.

## Rolle der Politikberatung

**Deller:** Ich möchte differenzieren zwischen Forschung zur Energiepolitik insgesamt und staatlicher Förderung für technologieorientierte Energieforschung.

Bei der Energiepolitik geht es ganz wesentlich um die Schaffung von Rahmenbedingungen, um gesetzliche Regelungen wie das EEG, das Emissionshandelssystem usw. Das BMU fördert daher die Erforschung der notwendigen gesellschaftlichen, ökonomischen Rahmenbedingungen für eine Energieversorgung auf der Basis von erneuerbaren Energien. Aufgabe der Forschung ist in diesem Fall die Beratung der Politik. Dafür gibt es neben entsprechenden Forschungsaufträgen eigens Gremien: SRU, WBGU, auch speziell für das Monitoring der Energiewende wird wissenschaftliche Expertise eingebunden. Es gilt, mit Hilfe sozial- und wirtschaftswissenschaftlicher Forschung Lösungen zu entwickeln, wie Rahmenbedingungen ausgestaltet werden können, so dass sie auch funktionieren. Der Emissionshandel oder das EEG sind ja auch nicht im luftleeren Raum entstanden, zuvor haben sich auch Wissenschaftler Gedanken darüber gemacht, wie ein solches Instrument aussehen kann. Umgesetzt werden muss es dann im politischen Prozess.

In diesem Kontext steht auch die Akzeptanzforschung. Auch hier würde ich differenzieren zwischen Akzeptanzforschung und der Tatsache, dass die Rahmenbedingungen für Akzeptanz zu schaffen eine Aufgabe der Politik ist. Partizipation zu organisieren ist eine Aufgabe der Politik. Dazu kann Forschung einen Beitrag leisten, aber letztlich ist auch hier die Rolle der Forschung eine Beratung und Begleitung der Politik. Akzeptanz zu schaffen bleibt letztlich eine politische Gestaltungsaufgabe.

Bei der staatlichen Förderung technologieorientierter Energieforschung – also dem Kern dessen, was im Kontext des 6. Energieforschungsprogramms gefördert wird, geht es im Wesentlichen darum, Technologien – eben auch gerade im Bereich der erneuerbaren Energien – weiter zu entwickeln und kostengünstiger zu machen.

## Begleitforschung

**Tryfonidou:** Das EFP ist ein technologieorientiertes Programm. Es geht um die Forschung und Entwicklung von neuen Energietechnologien, es geht aber auch um begleitende Forschung. Sowohl techno-ökonomische Aspekte als auch soziale Aspekte haben ihren Platz in der Energieforschung. Im BMWi subsumieren wir das unter dem Begriff der Systemanalyse, wo auch die begleitende Forschung zur Technologie-Entwicklung gefördert wird. Diese Forschungsfragen variieren. Akzeptanzfragen sind aktuell ein sehr wichtiges Thema und deshalb werden sie auch in unseren Schwerpunkten berücksichtigt.

Technologien kommen dann wirklich zum Einsatz, wenn sie kostengünstig sind. Dann haben wir eine schnelle Ausbreitung der Technologie und schnelle Effekte. Genau das ist das Ziel des EFP, sowohl im Bereich der erneuerbaren Energien als auch bei den Effizienz-Technologien.

**Bett:** Es ist allgemein akzeptiert, dass Begleitforschung/Akzeptanzforschung ein wichtiger Punkt ist. Ich habe das auch im 6. EFP so herausgelesen, dass das von der Politik wahrgenommen wurde. Und ich glaube auch, dass die Begleitforschung mit der Technologie gekoppelt sein muss. Die Interaktion zwischen den ökonomischen Forschungen und der Technologie ist ganz wichtig. Die Frage ist, wie hoch der finanzielle Anteil für diesen Bereich sein muss. Sollte man 10 % Begleitforschung und Akzeptanzforschung machen? Das ist vielleicht ein Punkt, der noch nicht klar definiert ist. Es ist wohl absolut anerkannt, dass das EEG letztlich die treibende Kraft war dafür, dass wir Technologie-Entwicklung machen konnten und dass auch weitere Gelder von der Industrieseite zur Verfügung gestellt wurden. Deswegen sollten die politischen Rahmenbedingungen auch entsprechend erforscht werden, aber immer im Zusammenhang mit Technologie.

**Staiß:** Die Frage muss vielleicht ein bisschen anders formuliert werden. Es gab immer schon die Querschnittsforschung und die Energiesystem-Analyse. Am Anfang steht immer erst einmal eine technische Invention, eine Idee oder ein Gerät. Daher war die Systemanalyse am Anfang auch mehr eine technische Systemanalyse. Wie integriere ich z. B. eine PV-Anlage ins Netz? Die Fragestellung hat sich dann erweitert um die strategische

Systemanalyse. Was bedeutet das eigentlich ökonomisch? Auch im Zusammenwirken und in Bezug auf die Optimierung von Systemen. Auch die Frage der Beschäftigungseffekte ist ja noch nicht alt, das machen wir erst seit fünf Jahren.

Wir haben aktuell einen sehr grundsätzlichen Wandel im Gesamtsystem. Wir brauchen eine no-regret-Entwicklung. Wir drehen jetzt Räder, die wir nicht ohne weiteres wieder zurückdrehen können. Die einzelnen Windmühlen werden irgendwann mal in ein Alter kommen, wo man sie ersetzen muss oder wo sich die Frage stellt: Wollen wir sie überhaupt noch ersetzen? Ja oder Nein? Das geht aber bei den anstehenden Infrastrukturentscheidungen einfach nicht mehr. Und die zweite Ebene ist: Wir sitzen in Deutschland nicht auf einer Insel. Wir müssen diese Transformation mindestens auf der europäischen Ebene sehen. Und dann drehen wir noch einmal größere Räder. Und drittens müssen wir sehen: Wie nehmen wir Entscheidungsträger, wie nehmen wir die Bevölkerung mit, um solche Prozesse besser abzusichern? Da gehört auch die soziologische Systemanalyse mit dazu, die wir bisher in diesem Umfang nicht wirklich hatten.

**Tryfonidou:** Es gibt auch noch die „versteckte“ Begleitforschung, die aber themenspezifisch ist. Das haben wir nicht als extra Schwerpunkt angeführt, aber ich nenne als Beispiel den Bereich „Energieoptimiertes Bauen“. Das ist ein großer Förderschwerpunkt. Und neben den Projekten, wo es um Technologie-Entwicklung und auch um den Piloteinsatz von Technologien geht, gibt es z. B. auch Untersuchungen dazu: Wie gehen die Nutzer in einer energetisch modernisierten Wohnung mit der Technologie um? Setzen sie sie richtig ein? Diese Fragen werden themenspezifisch in dem Bereich „Energieoptimiertes Bauen“ oder „Energieeffiziente Stadt“ im Rahmen von Begleitforschungsprojekten untersucht.

**Weber:** Wir sprechen da auch über ganz andere Größenordnungen von Finanzbedarf. Wenn wir eine Technologie entwickeln, kostet das Millionen. Eine begleitende Forschung, die diese Aspekte berücksichtigt, liegt meistens im einstelligen Prozentbereich dessen, was die Technologie-Entwicklung kostet und sollte natürlich gestützt werden. Ich habe mich gefreut über diese Zahl von 10 Millionen, das wird schon eine ganze Menge tragen können.



Dr. Rodoula  
Tryfonidou



**Publikumskommentar: Schweizer-Ries**, Leiterin Forschungsgruppe Umweltpsychologie: Es sollten verstärkt große interdisziplinäre Forschungsprojekte unterstützt werden. Meine Gruppe ist z. B. bei dem eEnergy-Projekt RegMod Harz mit dabei, allerdings nur nachträglich als sozialwissenschaftliche Begleitforschung, weil wir am Anfang aus dem Forschungsantrag rausgestrichen wurden. Wir sprechen von transdisziplinärer Forschung, davon, wie wir Forschung wirklich in die Realität bekommen. In dem Zusammenhang war es sehr traurig, dass wir erst drei Jahre später mit dabei sein konnten. Es wäre sehr wichtig, dass man jetzt Forschungsprojekte in dieser Interdisziplinarität und der Transdisziplinarität fördert.

**Deller:** Die Ministerien sagen im Bereich der Technologieforschung ja nicht, was geforscht werden soll. Das Prinzip ist anders herum. Es werden Vorschläge eingereicht, welche Projekte unterstützt werden sollten und dann entscheiden die Ministerien, welche dieser Projekte im Rahmen der Mittelverfügbarkeit gefördert werden können. Was ich mir vorstellen kann ist, dass man z. B. innerhalb eines Technologieforschungsprojektes eine akzeptanzbezogene Frage hat, die förderwürdig ist, und dafür auch Sozialwissenschaftler einbindet, also etwa: Wie ist im Fall eines speziellen solarthermischen Kraftwerks dessen mögliche Akzeptanz? Kann ich die Technologie so ausgestalten, dass sie eine höhere Chance hat, bei der Bevölkerung akzeptiert zu werden? Also eine ganz konkrete Fragestellung.



Michaele Hustedt

**Hustedt:** Es gibt noch andere Beispiele. Beim Projekt der Bioenergieregionen des BMBF werden Netzwerke in der Region aufgebaut, um Bioenergie auszubauen. Dort gibt es von vornherein eine Begleitforschung bzw. Akzeptanzforschung mit dem Ziel zu schauen: Was sind die Tipps für anderen Regionen, die das auch machen wollen? Damit die nicht wieder bei null anfangen müssen. Was muss man beachten? Sozialwissenschaftlich, nicht technisch. Wie viel Zeit muss man sich für die Zielentwicklung nehmen? Wie sind solche Netzwerke erfolgreich? Woran können sie scheitern? Es ist ein wichtiger Beitrag, dass das aufbereitet und begleitet wird und den Regionen, die mitmachen wollen, zur Verfügung gestellt wird.

## Ökonomieforschung / Politische Rahmenbedingungen

**Staiß:** Das aktuelle ökonomische Regime passt nicht mehr zu dem, was technisch möglich ist und umgesetzt werden sollte. Wir müssen uns wirklich etwas Neues überlegen. Und das Feld fängt beim Marktdesign an. Wann brauchen wir die Kapazitätsmärkte? Brauchen wir die jetzt oder brauchen wir die in fünf Jahren?

Aber es gibt noch eine zweite Ebene und ich glaube das werden sich die klassischen großen Energieversorgungsunternehmen einfach umstellen müssen. Nehmen wir mal die Schlagworte „Smart Grid“ und „Smart Metering“. Wenn man sich die Spreizung zwischen den Tarifen anschaut, so sind die völlig ungeeignet, um überhaupt Lasten zu verschieben. Das heißt, hier muss sich auch grundsätzlich etwas ändern. „Smart Metering“ braucht smarte Mieter. Das gilt jetzt für den Neubau-Bereich, aber wir haben ja Millionen Mieter in bestehenden Gebäuden, die diese Lastverschiebung beeinflussen sollen. Wie setze ich die Anreize, dass die das machen? Denn nur wenn ich eine große Menge an Haushalten mobilisiere, werden wir überhaupt einen Effekt sehen. Das heißt, ich muss die Tarifierung so machen, dass sie verlässlich ist und Menschen veranlasst, das Gewünschte zu tun. Für nur einen Cent Spreizung stellt man seine Waschmaschine nicht nachts an.

**Bett:** Ich glaube auch, dass die Umstellung über Marktanreize funktionieren wird. Wieder das Beispiel EEG: Man greift anfangs in den Markt ein und dann muss man irgendwann die Förderung zurückfahren, was im EEG von vornherein angelegt war. Und genauso muss man jetzt Anreizprogramme für Verbraucher schaffen. Und es muss erforscht und entwickelt werden, welche die zielführendsten sind. Das EEG hat auch eine Entwicklungshistorie hinter sich. Es gab Vorläufer, wo man anders gefördert hat. Letztendlich ist der Kern des Erfolges, dass auf den Markt eingegangen wurde, dass es eine marktgerechte Förderung darstellte.

**Staiß:** Was wir jetzt diskutieren, das Design von Märkten, die Preissignale und Rahmenbedingungen, betrifft nicht nur die erneuerbaren Energien, sondern in starkem Maße auch die Energieeffi-

zienz. Wir haben eine ganz seltsame Schiefelage: Die Förderprogramme, die jetzt aufgelegt wurden, sind sehr gut. Da gibt es ganz viele Optionen, wie wir Dinge weiterentwickeln können. Wir haben allerdings eine stark unterschiedliche Entwicklung. Die erneuerbaren Energien treiben und man verkündet Erfolgsmeldung nach Erfolgsmeldung. Aber im Gebiet Energieeinsparung passiert viel zu wenig. Das fängt beim Strom an: Es ist mir völlig unklar, wie man mit dem derzeitigen Entwicklungstempo 25 % Strom einsparen will bis 2050, oder 10 % bis 2020, und die Gebäudesanierung und all diese Dinge, bis hin zur KWK und der weißen Ware – das ist für mich alles offen. Und wir müssen aufpassen, dass wir, auch wenn man ökonomische Dinge anspricht, beide Seiten vernünftig miteinander verknüpfen, sonst fehlt uns die eine Hälfte der Medaille und dann funktioniert das Gesamte nicht.

Ich wollte noch etwas zu den finanziellen Größenordnungen sagen. Es geht ja neben dem Klimaschutz auch um Fragen der ökonomischen Stabilität des gesamten Systems Volkswirtschaft. Da spielt die abnehmende Verfügbarkeit fossiler Ressourcen in der EU eine große Rolle und letztlich die Volatilität der Preise bei den außer-europäischen Energieimporten. Wir hatten letztes Jahr eine Ölrechnung von 80 Milliarden Euro. Die springt aber auch mal schnell 20 Milliarden Euro rauf oder runter. Und wenn man sich diese Beträge anschaut, dann ist das, was wir gerade diskutiert haben, eine sehr gute, lohnende Investition. Sie bedarf aber auch des Mutes. Wir tauschen diesen Mittelabfluss in heimische Wertschöpfung. Denn gerade im Baubereich beträgt die lokale Wertschöpfung mindestens 90 %. Deswegen ist es für mich überhaupt nicht einsehbar, warum man in diesem Bereich so zögerlich ist. Wenn man jetzt sagen würde, wir schaffen die 3 % Sanierungsrate im Mittel nicht, aber wir schaffen statt der aktuellen 0,8 % wenigstens 2 %. Dann hätte man zumindest einen Einstieg. Denn wenn Unternehmen erst einmal in einen Bereich reingehen, dann bleiben sie auch länger da. Ich sage mal ganz salopp: Besser am Anfang eine kleine Überförderung in Kauf nehmen, damit das trägt. Die kann man dann wieder zurücknehmen und hat dann einen besseren Hebel.

## Rolle der großen Stromversorger

**Weber:** Bisher sind die Stromversorger völlig auf dem falschen Dampfer. RWE ist stolz darauf, dass sie eine Tochterfirma RWE Innogy gegründet haben und gibt angeblich 1 Milliarde Euro jährlich für erneuerbare Energien aus. Aber das heißt doch, dass der Rest von RWE einfach nach dem alten Konzept weitermacht. Die großen Stromversorger müssten eigentlich in das Zentrum dieses Transformationsprozess kommen. Angefangen bei den Stromtarifen. In den USA steigt der Stromtarif mit dem Verbrauch. Das ist ein sehr wirksames Instrument, um Energieeffizienz durchzusetzen. Bei uns gibt es Stromtarife für Großstromverbraucher, so dass die weniger für Strom zahlen, nur weil sie Energieverschwender sind. Die großen EVU müssen den Transformationsprozess endlich ernst nehmen und mit der Forschung zusammen in die richtigen Bahnen kommen, was Marktmechanismen und Anreizprogramme angeht. Mein Traum wäre, dass die EVU damit anfangen, Erneuerbare-Energien-Anlagen zu verkaufen. Früher oder später kommen sie aus ökonomischen Gründen dazu. Die Frage ist nur: wie schnell?

**Publikumskommentar: Alfred Schulz,** Ingenieur: Ich vermisse hier die Damen und Herren von der Energiewirtschaft, die eigentlich diese Transformation mitmachen müssen. Sonst habe ich den Eindruck, wir prägen denen was auf und sie werden sagen: Das und das geht nicht. Wir haben nicht gewollt, dass die Onshore-Windtechnik sich so manifestiert, denn das manifestiert automatisch wieder die zentralisierte Energiewirtschaft in Richtung zentrale Netze, damit bleibt die Wertschöpfung zentral. Ich habe die Befürchtung, dass die Energieversorger, auch wenn sie jetzt per Gesetz aus der Atomenergie aussteigen mussten, ganz genau wissen, wie sie weiterhin eine zentrale Energieversorgung erhalten können. Und wir werden uns wahrscheinlich noch umgucken, wenn wir sie nicht in das Boot reinbekommen, so dass gemeinsam gerudert wird.



Prof. Dr. Frithjof Staiß

## Brücke zwischen Forschung und Industrie

**Weber:** Die Brücke zwischen Forschung und Industrie ist solide und in heftigem Betrieb. Die Industrie arbeitet mit uns sehr intensiv zusammen.

**Deller:** Das BMU fördert vorzugsweise Forschungsprojekte, bei denen Wissenschaft und Wirtschaft im Verbund versuchen, eine Fragestellung zu lösen, und versucht den Anteil dieser Projekte kontinuierlich hochzuhalten.

**Tryfonidou:** Im Bereich des BMWi nimmt die Energiewirtschaft sehr rege Anteil an der Forschung. Viele kleinere kommunale Unternehmen stellen wirklich vorzeigbare Projekte auf die Beine, auch mit unserer Unterstützung und immer als Verbundprojekte mit Forschungsinstituten oder auch der Wohnungswirtschaft. – Aber auch die großen Energieversorger sind in verschiedenen Bereichen aktiv. In der Stellungnahme des BDEW zum EFP wurden diese Anstrengungen sehr begrüßt. Auf der anderen Seite muss man sich auch die Frage stellen: In wie fern brauchen große Energieversorger staatliche Unterstützung bei Forschungsprojekten? Diese Frage stellt sich das BMWi jedes Mal sehr gewissenhaft, aber wir unterstützen auf jeden Fall die Kooperation der Energieversorger mit der Wissenschaft und anderen kleineren Akteuren.



Prof. Dr. Gerd Hauser

## Gebäudesanierung/ Energieeffizienz

**Weber:** Bei Neubauten sind wir auf dem richtigen Weg, da geht es schon in Richtung Plus-Energie-Haus. Das Hauptproblem ist der Altbau-Bestand. Will man das gesetzlich vorschreiben, gibt es einen großen Aufschrei. Keiner will sich zu Ausgaben zwingen lassen. Es gab Versuche, eine Art EEG für Wärme einzuführen, ein Anreizprogramm, aber so richtig gegriffen hat das nicht. Da wäre die Diskussion mit Ökonomen nötig. Was wären finanziell vernünftige Anreize? Das Problem ist: Man muss am Anfang eine erhebliche Menge Geld ausgeben, das man dann über 10, 20 Jahre wieder reinbekommt. Aber wie kann man dafür Anreize schaffen?

**Hauser:** Die Forschung hat dafür schon Instrumente entwickelt, aber die Politik will sie nicht umsetzen. Selbst in dem Energiekonzept der Bundesregierung sind Fördermöglichkeiten und steuerliche Abschreibungsmöglichkeiten formuliert. Zudem ist das Modell der steuerlichen Abschreibungsmöglichkeiten, wie es jetzt vorgesehen ist, ausschließlich für Gesamtanierungen konzipiert, so dass ein bestehendes Gebäude nach Komplettanierung unter das Niveau eines Neubaus kommt, und das ist in den seltensten Fällen möglich. Das ist leider ein Papiertiger. Wir hatten vor etwa 15 Jahren schon einmal die Abschreibungsmöglichkeiten über den Paragraphen 82a des Einkommensteuergesetzes. Das wäre ein guter Weg. Er kostet den Staat zunächst Geld, allerdings wird es durch die deutliche Wiedererwirtschaftung von Mitteln zum Selbstläufer. Es würde nämlich deutlich mehr Leute in Arbeit bringen, so dass deutlich mehr umgesetzt wird. Ich finde es sehr schade, dass dieser Weg nicht stärker gegangen wird.

Die Sanierungen sind noch zu teuer. Wir müssen kostengünstige Lösungen entwickeln. Wir sind jetzt in der Lage, dass wir in Altbauten mit relativ einfachen Mitteln zentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung einbauen können, indem wir die Zu- und Abluftkanäle in das Wärmeverbundsystem integrieren. Das ist eine Möglichkeit, bei der wir die Kosten für solche Anlagen fast auf ein Fünftel herunterfahren können. Wir brauchen mehr solcher technischen Lösungen. Denn es macht schon einen ziemlichen Aufwand, wenn wir die Gebäude mit 16 bis 18 Zentimeter Wärmedämmung versehen und andere Verglasungen einsetzen wollen. Und daran scheitert es leider in vielen Fällen. Hier fehlen uns noch innovative Lösungen.

**Tryfonidou:** Es ist Aufgabe des BMWi, bei der Entwicklung solcher Technologien zu unterstützen. Wir geben im „Energieoptimierten Bauen“ 20 Millionen im Jahr aus, um zu zeigen dass die Technologien, die über die Jahrzehnte entwickelt wurden, auch funktionieren. Wir fördern Demonstrationsprojekte wie das in Freiburg, evaluieren und versuchen, die Kosten zu minimieren. Das ist der Beitrag, den das BMWi für die Energieforschung leisten kann. Für das, was dann noch dazukommt, sind dann andere Kollegen in der Bundesregierung zuständig.

## 100 % Erneuerbare-Energien-Regionen

**Weber:** Eine Möglichkeit, einige Probleme zu überwinden, ist natürlich, etwas kleiner anzufangen: Mit Inseln oder Regionen, die, aus welchen geografischen Gründen auch immer, modellhaft durchspielen können, 100 % erneuerbar versorgt zu werden. Da kann man die Themen Speicher, Vernetzung, Netze, zeitlich fluktuierende Quellen vorspielen. Und dann kann man das natürlich auf die größere Situation übertragen.

**Deller:** Das BMU unterstützt konkret das „100 % Erneuerbare-Energie-Regionen“-Projekt, allerdings nicht im Kontext der Technologieforschung im engeren Sinn. Darüber hinaus fördern wir im Rahmen des Programms e-energy zwei Projekte, Modellstadt Mannheim und Modellregion Harz. In diesen Projekten geht es darum, Modelle für Haupt- oder Vollversorgung durch erneuerbare Energien zu entwickeln und zu untersuchen wie das Zusammenspiel der verschiedenen erneuerbaren Energien in einer konkreten Region, mit konkreten Verbrauchern, konkreten Systemen, auch in Verbindung mit Informations- und Kommunikationstechnologien, so funktionieren kann, dass eine ganze Region als regeneratives Kombikraftwerk funktioniert und ihre Energieversorgung in Hinblick auf eine weitgehende erneuerbare Vollversorgung optimiert.

## Dialog zwischen Politik und Forschung verstärken

**Weber:** Wir haben den WBGU, den SRU und eine Vielzahl anderer Räte dieser Art. Aber ein Parlamentsbeauftragter zusammen mit einem Forum, das könnte unter Umständen den Nukleus zu etwas bilden. Dabei müsste man dann die bestehenden Gremien und die Wirtschaft in vernünftiger Weise mit einbeziehen.

**Bett:** Wir brauchen eine Nahtstelle zum Parlament, wo die Entscheidungen gefällt werden. Wir haben von Herrn Hauser gehört: Im Prinzip haben wir die Ideen, wir haben die Instrumente. Sie werden aber nicht so umgesetzt, wie wir uns das wünschen. Einen direkten Draht zum Parlament zu haben und Wissenschaft und Industrie zu integrieren, halte ich deshalb für absolut sinnvoll.

**Staiß:** Ich glaube, solche Informationen und Verbindungen entstehen auch von unten. In Baden-Württemberg hat sich die neue grün-rote Landesregierung auf die Fahnen geschrieben, den Anteil der Windenergie in den nächsten zehn Jahren mindestens zu verzehnfachen oder gar zu zwanzigfachen. Und auch das muss kommuniziert werden. Deswegen gibt es immer begleitende Informationsveranstaltungen, um auch den Ausgleich zwischen energiepolitischen und ökologischen Interessen herbeizuführen. Wir haben das Beispiel gehört mit den 100 %-Kommunen, die sich jährlich treffen. Das heißt, die haben ihre Plattformen, wie sie diesen Prozess gestalten. Und wenn eine Kommune das beginnt, dann muss sie die Bevölkerung mitnehmen. Mir ist da gar nicht bang, dass wir aus den Erfahrungen dann soviel lernen können, dass sich das dann auch nach oben transportiert.

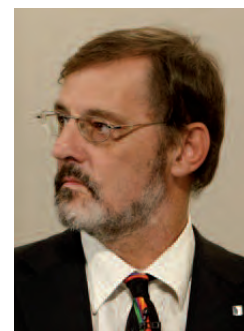
**Tryfonidou:** In den Bereichen des BMWi sorgen wir dafür, dass dieser Dialog mit den verschiedenen Akteuren stattfindet. Das heißt, in den verschiedenen Gremien, Workshops usw. mit den jeweiligen Akteuren in den Förderschwerpunkten, in der Koordinierungsplattform, wo die Ressorts gemeinsam über Dinge sprechen. Geplant ist, dass dies ergänzt wird mit Teilnehmern aus Wirtschaft und Wissenschaft, sowie der Bundesländer, so dass wir in der Forschungsförderung versuchen, solche Plattformen zu installieren und dort die Abstimmung zu verbessern.

## Koordinierung zwischen Forschung, Wirtschaft und Politik

**Tryfonidou:** Es gibt den Austausch mit der Wirtschaft. Da sind die Unternehmen, die in dem jeweiligen Bereich auch forschen, mit den verschiedenen Verbänden. Sie sprechen aber mehr die energiepolitischen Fragen an, das sind andere Gremien, die da eingesetzt werden. Das ist weniger ein Beitrag der Forschung. Ich wollte gern den „Bürgerdialog Energie“ des BMBF erwähnen. Das ist auch eine Möglichkeit, mehr Menschen einzubinden.



Prof. Dr. Eicke Weber



Dr. Andreas Bett

**Deller:** Im BMU führen wir diesen Dialog regelmäßig, u. a. im Rahmen von Strategiegelgesprächen zu den einzelnen Technologien.

## Schlussworte

**Staiß:** Ich war letzte Woche in Amerika und es kam immer wieder die Frage nach dem Atomausstieg. Man reibt sich da ein bisschen ungläubig die Augen. Aber wenn man dann akzeptiert hat, dass wir das tun, dann ist der Eindruck: Macht vielleicht keinen Sinn, aber wenn es jemand schafft, dann die Deutschen. Und das können wir nur gemeinsam. Ich bin mit dem EFP von der Forschungsseite her zufrieden, wenn der Energie- und Klimafonds dann auch so gespeist wird, wie vorgesehen.

**Bett:** Ich bin sehr zufrieden mit dem EFP, auch dass die Steigerung wirklich angegangen wird. Was mir noch wichtig ist: Am Beispiel USA sieht man sehr schön, dass Kontinuität wichtig ist. In den USA ist die Förderung fluktuierend, und ich sehe bei den Kollegen aus den USA, dass die manchmal sehr schöne Technologien entwickeln und diese dann nicht weiter entwickeln dürfen. Doch der Weg von der Forschung zum industriellen Produkt ist lang. Oft sind zwei oder drei Jahre Projektzeit zu wenig. Aber wir in Deutschland haben eine gute Kontinuität der Förderung und das schätze ich sehr.

**Weber:** Grundsätzlich möchte ich dem voll zustimmen. Ich finde es wirklich sehr erfreulich, dass jetzt die bewusste Betonung auf Projektfinanzierung gelegt wird, weil das allen Spielern, auch kleinen und neuen Instituten, eine Chance gibt, an interessante Projekte heranzukommen. Ich denke, ein ganz spezifischer deutscher Vorteil ist die wirklich vertrauensvolle Zusammenarbeit und Abstimmung der Ministerien. Insgesamt bin ich sehr zuversichtlich das sehr bald andere Länder – England, Australien und später auch die USA – erkennen, welchen ganz knallharten ökonomischen Benefit Erneuerbare haben: Arbeitsplatzeffekte, ein gigantisches Konjunkturankurbelungsprogramm in globalem Maßstab. Wir verwenden unser Geld um die Energietransformation zu verwirklichen. Wir sind auf dem richtigen Weg und ich hoffe wir können alle gemeinsam helfen, auch auf diesem Weg zu bleiben.

**Tryfonidou:** Ich wünsche mir etwas von der Forschung. Wir haben genug Geld für die Forschungsförderung. Das möchte das BMWi so wirksam wie möglich verwenden. Es ist ein Appell an alle Forschenden, gute Förderanträge zu stellen, in allen Themen, die die Energieforschung betreffen: bei den erneuerbaren Energien und bei der Energieeffizienz auf der Erzeugungs- als auch auf der Nachfrageseite. Damit wir mit dem Geld, was wir glücklicherweise zur Verfügung stellen können, gute Forschungsförderung für eine nachhaltige Energiezukunft gestalten können.

**Deller:** Ich glaube, dass das 6. EFP sowohl von der Mittelausstattung her als auch in Bezug auf die Ausrichtung auf erneuerbare Energien und Energieeffizienz wirklich eine gelungene Sache ist. Und: die ressortübergreifende Speicherinitiative war eine richtige Initiative zur richtigen Zeit. Im Übrigen freut sich natürlich auch das BMU auf qualitativ hochwertige Forschungsprojekte, die die Energiewende voranbringen.

## ■ Strategien, Potenzialanalysen und Prognosen

- Das Energiesystem von morgen – Strategien und Forschung für die Transformation zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien
- Langfriststrategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland
- Ausbau von Speicherkapazitäten für eine effiziente Stromversorgung mit erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa bis 2050
- Prognosen der zeitlich-räumlichen Variabilität von Erneuerbaren

# Das Energiesystem von morgen – Strategien und Forschung für die Transformation zu hohen Anteilen erneuerbarer Energien



MinR Dr. Wolfhart  
Dürschmidt  
BMU  
Referatsleiter für  
„Allgemeine und  
grundsätzliche  
Angelegenheiten  
der Erneuerbaren  
Energien“  
wolfhart.duerschmidt@  
bmu.bund.de

## Zusammenfassung

Langfristig kann die Energieversorgung vollständig auf der Nutzung erneuerbarer Energien (EE) basieren – in Deutschland, in der EU und global. Die nachhaltig erschließbaren Potenziale dafür sind vorhanden. Die entsprechenden Strategien sowie Forschung und Entwicklung sollten sich in der Übergangsphase vor allem folgenden (vernetzten) Elementen widmen:

- Weiterentwicklung der EE-Nutzung in allen Sparten, dabei Erfüllung aller Kriterien der Nachhaltigkeit
- Sicherheit
- Verknüpfung mit Energieeffizienz und Energieeinsparung
- Aufbau komplementärer Strukturen (flexible Gas-BHKW, Energiespeicher, Lastmanagement, Steuerung und Regelung, Kombination von Anlagen)
- Stärkung regionaler, dezentraler Strukturen sowie zugleich der regionalen und überregionalen Vernetzung
- Vorrang der EE vor und Zusammenspiel mit dem sinkenden Einsatz konventioneller Energieträger
- Partizipation und Akzeptanz, Fachinformation, Qualifikation, Überprüfung der Lebensstile und Fragen der Ethik mit interdisziplinärer Begleitung

## Leitbild Nachhaltigkeit und qualitative Ziele

Strategien und Forschung für unser zukünftiges Energiesystem in Deutschland mit hohen Anteilen erneuerbaren Energien sollen sich am Leitbild der Nachhaltigkeit ausrichten [1, 2, 3, 4]. Das heißt, die Energieversorgung ist zukünftig gleicherma-

ßen nach ökologischen, ökonomischen und sozialen Kriterien zu gestalten. Dabei sind folgende qualitativen Ziele von besonderer Bedeutung:

- Energiesicherheit: Versorgungssicherheit sowie innere und äußere Sicherheit
- Klimaschutz und Biodiversität
- Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz
- Modell für qualitatives Wachstum und Modell für globales Handeln
- Demokratieförderung, Partizipation und Akzeptanz

Das gesamte Energiesystem soll dabei so verändert werden, dass die EE-Anteile kontinuierlich steigen und bereits mittelfristig die Hauptenergiequelle bilden. Der Übergang dazu ist in einem Transformationsprozess zu organisieren und umzusetzen.

## Erste Phase der Energiewende von 1980 bis 2010

Mit einem kurzen Rückblick lassen sich viele Erkenntnisse für unser zukünftiges Handeln gewinnen. Die erste Phase der Energiewende ist bereits erfolgreich geschafft: Pioniere in Wissenschaft, Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft haben in drei Jahrzehnten Arbeit aus Überzeugung und mit hohem persönlichem Engagement gehandelt. Obwohl der „Mainstream“ noch Mitte der 90er-Jahre üblicherweise behauptete, dass die EE auch langfristig nur maximal 10 % zur Energieversorgung beitragen könnten, haben sich die Vorreiter davon nicht beirren lassen.

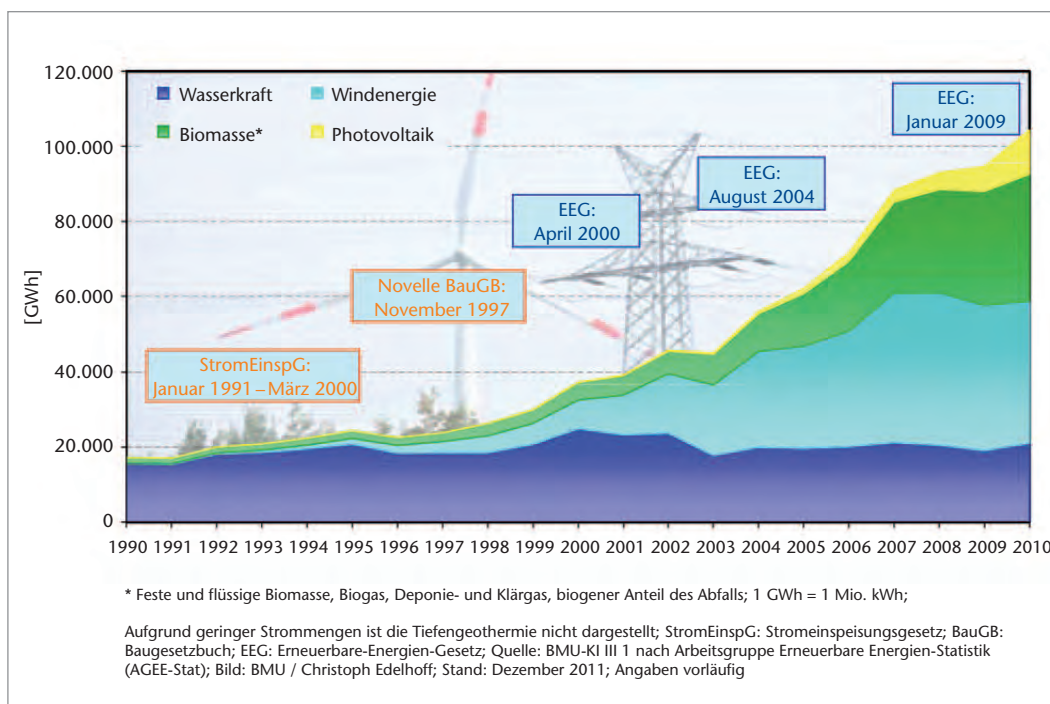
Das Bundesumweltministerium (BMU) tritt seit etwa zwei Jahrzehnten aktiv für die EE ein. Seit 1998 werden Studien zur Systemanalyse sowie ein Monitoring der EE-Entwicklung im Auftrag des

BMU erarbeitet [5, 6]. Hervorzuheben sind dabei insbesondere:

- Langfristszenarien; wegen ihrer Leitfunktion als „Leitstudien“ bezeichnet [7]
- Arbeiten zu den Instrumenten zum Ausbau der EE [5]
- Arbeiten zu EE und nachhaltiger Innovation [4, 5]
- Daten, Statistik, Methoden, Berichtspflichten sowie Aufbau der Arbeitsgruppe EE-Statistik (AGEE-Stat) [5, 8]
- Fachinformation und Ausarbeitungen in Einzelvorhaben [5, 6]

Seit dem Jahr 2002 ist das BMU federführend zuständig für die EE innerhalb der Bundesregierung. Damit konnte ein nahtloser Übergang geschaffen werden von Forschung und Entwicklung über Markteinführungsprogramme zu einer passenden Rahmengesetzgebung (EEG, EEWärmeG, Genehmigung der EE-Anlagen im jeweiligen Fachrecht), ergänzt durch Fachinformation, Beteiligung relevanter Akteure und einem Monitoring-Prozess. In allen Feldern hatte die wissenschaftliche Expertise des FVEE [9] und weiterer Institute maßgeblichen Anteil an der fachgerechten Ausgestaltung der Maßnahmen und der Durchsetzungsfähigkeit gegenüber Bedenkenträgern und Gegnern des EE-Ausbaus.

In der EU-Richtlinie zur Förderung von EE wurde im Jahr 2001 für den EE-Stromanteil in Deutschland ein Ziel von 12,5 % für 2010 angelegt. Im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2004 wurden als verpflichtende Ziele für den EE-Stromanteil mind. 12,5 % für 2010 und mind. 20 % für 2020 beschlossen. Diese Ziele wurden damals mit Unterstützung der Wissenschaft vom BMU gegen großen Widerstand durchgesetzt. Das EEG entfaltete eine besonders investitionsfördernde Wirkung, sodass der reale EE-Ausbau deutlich über der 2010-Zielmarke lag. So wurde im Jahr 2010 bereits ein EE-Strom-Anteil von 17% erreicht, der sich 2011 auf etwa 20 % steigern dürfte. Die erfolgreiche Entwicklung der EE ist in *Abbildung 1* und *Tabelle 1* für den Zeitraum von 1990 bis 2010 wiedergegeben. Als besonders effizientes Instrument hat sich die gesetzlich verankerte Einspeiseregulierung erwiesen mit dem Stromeinspeisungsgesetz von 1990 und dem im Jahr 2000 daraus hervorgegangenen Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).



*Abbildung 1*  
Beitrag der erneuerbaren Energien zur Stromerzeugung in Deutschland



Anteile der erneuerbaren Energien an der Energiebereitstellung in Deutschland	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Endenergieverbrauch (EEV) [%]													
Stromerzeugung (bezogen auf den gesamten Brutto-Stromverbrauch)	3,1	4,5	6,4	6,7	7,8	7,5	9,2	10,1	11,6	14,3	15,1	16,3	17,0
Wärmebereitstellung (bezogen auf gesamte Wärmebereitstellung)	2,1	2,1	3,9	4,2	4,3	5,0	5,5	6,0	6,2	7,4	7,3	8,9	9,5
Kraftstoffverbrauch <sup>1)</sup> (bezogen auf gesamten Kraftstoffverbrauch)	0,0	0,1	0,4	0,6	0,09	1,4	1,8	3,7	6,3	7,2	5,9	5,5	5,8
Anteil EE am gesamten EEV	1,9	2,2	3,8	4,1	4,5	5,0	5,9	6,8	8,0	9,5	9,3	10,3	10,9
Primärenergieverbrauch (PEV) [%]													
Anteil EE am gesamten PEV <sup>2)</sup>	1,3	1,9	2,9	2,9	3,2	3,8	4,5	5,3	6,3	7,9	8,1	8,9	9,4

Tabelle 1

## Zweite Phase der Energiewende ab 2011

Mit dem Energiewendebeschluss von Bundesregierung, Bundestag und Bundesrat vom Juni/Juli 2011 wurde die zweite Phase der Energiewende eingeleitet. Der Beschluss umfasst eine Strategie mit einem Maßnahmenbündel und anspruchsvollen quantitativen Zielen [10], u. a.:

- Ziele für den EE-Strom-Anteil (Bruttostromverbrauch) gemäß EEG 2012 (Das neue EEG wurde im Juni 2011 beschlossen und tritt am 1.1.2012 in Kraft): bis spät. 2020 mind. 35 %; bis spät. 2030 mind. 50 %, bis spät. 2040 mind. 65 %, bis spät. 2050 mind. 80 %;
- Ziele für den EE-Endenergie-Anteil (Strom, Wärme/Kälte, Mobilität): 2020 18 %; 2030 30 %; 2040 45 %; 2050 60 %
- Ziele für den Primärenergieverbrauch insgesamt: -20 % bis 2020 und -50 % bis 2050 (bezogen auf 2008)
- Ziele für die Treibhausgas-Emissionen: -40 % bis 2020 und -80 bis -95 % bis 2050 (bezogen auf 1990)
- Ziel für die Nutzung der Kernenergie, verankert im Atomgesetz: Ausstieg bis spätestens Ende 2022

## Instrumentenmix

Als erfolgreich hat sich ein abgestimmtes Maßnahmenbündel aus Forschung und Entwicklung, Programmen zur Markteinführung und Ordnungsrecht mit Vorrangregelungen für die EE erwiesen, das für die Umsetzung der Energiewende weiter zu entwickeln ist:

- staatliche Fördermittel:
  - Forschung und Entwicklung (technische Entwicklung, ökologische Begleitforschung, Kosteneffizienz, systemanalytische Forschung, sozialwissenschaftliche Forschung etc.)
  - Investitionszuschüsse, staatl. Markteinführungsprogramme sowie Einzelvorhaben
- weitere Forschung und Entwicklung und Förderung durch Wirtschaft und Gesellschaft
- Ordnungsrecht: Genehmigung und Zulassung der EE-Anlagen im jeweiligen Fachrecht mit einer weiteren schrittweisen Anpassung der seit rund 20 Jahren erfolgten Praxis. Hier sind Bund, Länder und Kommunen in der Pflicht zu handeln
- Mix aus Ordnungsrecht und Markteinführung zur Steuerung des EE-Ausbaus:
  - EEG: Anschlusspflicht der EE-Anlagen an das Netz, vorrangige Abnahme und Vergütung des Stroms, bundesweiter Ausgleich sowie weitere Regelungen; das EEG sollte weiterhin keine Subvention, d. h. keine staatliche Beihilfe sein
  - EEWärmeG: Anforderungen vor allem an Neubauten, kombiniert mit staatlichen Fördermitteln aus dem Markteinführungsprogramm (MAP) für EE; Erfahrungsbericht zum EEWärmeG Ende 2011; Novelle ist für 2012 vorgesehen

- Korrespondierend zum kräftigen Ausbau der EE werden zunehmend Instrumente zur Anpassung des „gewachsenen“ Energiesystems erforderlich, die im Energiekonzept 2010 und im Energiewendebeschluss 2011 enthalten sind [10].

## Zusammenspiel EE-Ausbau mit nuklearem Ausstieg und fossilem Rückgang

Der Ausbau der EE sowie Energieeinsparung und Verbesserung der Energieeffizienz müssen eine Leitfunktion für das zukünftige Energiesystem übernehmen. Alle EE-Sparten sind nach den Kriterien der Nachhaltigkeit weiter auszubauen. Die Langfristszenarien der EE-Leitstudie zeigen ein belastbares, bewusst konservativ ermitteltes EE-Mengengerüst für die kommenden Jahrzehnte. Sie beschreiben die Wechselwirkungen mit dem restlichen System, erforderliche Optimierungsaufgaben und Erkenntnisse für die resultierende Strategie ([7], siehe auch Beitrag von Nitsch et. al. in diesem Band und [14]).

Zur Optimierung des vernetzten und sich dynamisch verändernden Energiesystems empfiehlt es sich, die Erkenntnisse der wissenschaftlichen Arbeiten zu komplexen Systemen heranzuziehen. Dabei ist die Stabilität des Gesamtsystems zu optimieren mit einer Vielzahl von EE-Anlagen, kleinräumiger und großräumiger Vernetzung, stärkerer Informations- und Kommunikations-Anwendungen und der Etablierung stabiler Teilsysteme. Mit der dezentraleren Verteilung vieler EE-Anlagen sollte es gelingen, die Verletzlichkeit unserer Energieversorgung deutlich zu reduzieren.

Der Vorrang der Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energiequellen sollte weiter bestehen. Mit Blick auf das zum Teil fluktuierende EE-Angebot sollten EE-Anlagen zunehmend auch systemstabilisierende Funktionen übernehmen:

- Frequenz- und Spannungshaltung
- positive und negative Regelung
- kurz-, mittel- und längerfristige Energiespeicherung
- bedarfsgerechte Steuerung
- sichere Leistung etc.

Träge Grundlastkraftwerke werden im zunehmend flexiblen System immer weniger benötigt. Die residuale Last kann mit flexibler, dezentraler Gas-KWK gesichert werden.

## Synergien durch Verschränkungen: EE/Effizienz sowie Strom/Wärme/Mobilität

Die Leitstudie 2010 zeigt: EE und Energieeinsparung erbringen bis 2050 jeweils etwa gleich große Beiträge zur Treibhausgas-Minderung. Im Strombereich überwiegt die Wirkung des EE-Ausbau; trotzdem ist auch hier die Verbesserung der Effizienz wichtig. Im Wärme-/Kälte-/Gebäudebereich überwiegt die Wirkung der Energieeinsparung; trotzdem ist auch hier der EE-Ausbau wichtig. Für die zukünftige Mobilität sind EE und Effizienz etwa gleich bedeutsam.

Mit Wind- und Wasserkraft, Solar- und Bioenergie einschließlich biogenem Abfall sowie der Geothermie bietet die EE-Stromgewinnung ein besonders großes realisierbares Potenzial. Mit der Verbindung von hohen Wirkungsgraden ist die Verwendung von EE-Strom zunehmend geeignet auch für den Einsatz in bisher klassischen Mobilitäts- und Wärmebereichen. So lässt sich EE-Strom für den Schienenverkehr und den Antrieb von Elektro-PKW effizient nutzen; zugleich können die Batterien bidirektional als Energiespeicher fungieren. In energieoptimierten Gebäuden kann EE-Strom die spezifischen EE-Wärme-Anwendungen ergänzen.

## Synergien durch komplementäre Strukturen

Es wird in Zukunft auf ein kluges, optimales Zusammenspiel der wachsenden EE-Anlagen untereinander ankommen und den Aufbau komplementärer Strukturen wie:

- flexibel regelbare, dezentrale fossilen KWK-Anlagen
- Ausbau von Stromtrassen und Modernisierung der Stromnetze, die bidirektional genutzt werden (sog. Smart Grids)

- Lastmanagement, d. h. ein Ansteuern von Stromverbrauchern als Reaktion auf die residuale Last
- Energiespeicher, die EE-Überschüsse speichern zur zeitlich versetzten Nutzung und dabei auch den Bedarf für neue Stromtrassen mindern
- Stärkung sowohl regionaler, dezentraler Strukturen als auch regionaler und überregionaler Vernetzung

Zur Verbesserung der Systemeigenschaften können Kombikraftwerke beitragen, d. h. Ensemble aus fluktuierenden und regelbaren EE-Anlagen plus Energiespeicher und regelbare Lasten. Sie können regional platziert sein, um Netzengpässe zu vermeiden und die Versorgungssicherheit zu verbessern. Werden sie überregional als virtuelle Kraftwerke betrieben, reduziert sich zwar der regionale Bezug, es erhöht sich aber auch dabei die bedarfsgerechte Energieversorgung. Ferner ist in einer Übergangsphase die Kombination mit flexiblen, dezentralen, fossil betriebenen Einheiten möglich. Dezentrale Gas-KWK-Anlagen lassen sich sowohl mit Erdgas als auch mit EE-Gas betreiben, so dass ein kontinuierlicher und langfristig angelegter Übergang zur EE-Versorgung möglich ist. Damit können Angebotsschwankungen der fluktuierenden EE-Sparten Wind und Solar ausgeglichen werden. Die Erdgas-Infrastruktur lässt sich zum Transport und als großer Speicher nutzen.

## Kosten-Nutzen-Analyse und Rahmen für den Markt

Mit dem EE-Ausbau und der Umstrukturierung unseres Energiesystems werden Investitionen in notwendige Zukunftstechnik ermöglicht. Dies ist so zu organisieren, dass sowohl am Gemeinwohl gemessene als auch betriebswirtschaftliche Vorteile erwachsen. Dies gelingt dann, wenn privates Kapital investiert und in die Transformation zu einem nachhaltigen Energiesystem gelenkt wird.

Im historisch gewachsenen Energiemarkt existieren allerdings immer noch verzerrte Marktbedingungen, weil bei den konventionellen Energieträgern große Kostenanteile ausgeblendet

und an anderer Stelle sozialisiert werden. Bei EE sind diese externen Effekte deutlich geringer, so dass ihre Vollkosten mit Teilkosten der konventionellen Energien konkurrieren müssen. Zudem haben wir es mit zwei Märkten zu tun: dem Markt für die EE-Anlagen sowie dem Markt für das mit EE-Anlagen erzeugte Produkt, d. h. die „Waren“ Strom, Wärme/Kälte oder Kraftstoff. Für beide Marktsegmente sollten faire Marktbedingungen geschaffen werden.

Ein Instrument zur Verbesserung des Markttrahmens ist die Internalisierung der externen Effekte der konventionellen Energieträger. Dies wird erreicht mit Hilfe des Emissionshandels für fossile Energien, der Energiebesteuerung oder generell mit Regelungen zur Verteuerung konventioneller Energien. Zur Verstärkung der Wirkung sollte das Mittelaufkommen weitgehend zur Umsetzung der Energiewende eingesetzt werden. Die Vorrang- und Vergütungs-Regelung des EEG schafft einen gestützten Markt und wirkt in diesem Sinn den verzerrten Marktbedingungen entgegen. Ziel muss es also sein, einen Rahmen dafür zu schaffen, dass für alle Energiearten Marktbedingungen auf Vollkostenbasis entstehen, so dass sich die EE-Sparten zunehmend am Markt bewegen und mittelfristig wirtschaftlich selbst behaupten können.

Die systemanalytischen Differenzkosten der EE betragen nach der Leitstudie 2010 [7, 8] rd. 10,3 Mrd. € für Strom und Wärme in Deutschland im Jahr 2010 (gegenüber dem verdrängten Einsatz konventioneller Energien und deren Teilkosten). Auf der anderen Seite beträgt der systemanalytische Nutzen der EE durch vermiedene Umweltschäden (Klima und Schadstoffe) rund 8,3 Mrd. € für den Strom- und Wärmebereich (rd. 118 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente THG-Minderung bei 70 € pro t CO<sub>2</sub>). Die durch EE vermiedenen externen Kosten der Kernenergie wurden dabei ausgeklammert, da diese schwieriger zu quantifizieren sind. Da der ökonomische Nutzen der EE weitgehend ausgeblendet ist, benötigen sie nach wie vor finanzielle Unterstützung. Diese sollte so kosteneffizient wie möglich erfolgen, wobei nicht nur ökonomische, sondern auch die ökologischen und sozialen Maßstäbe der Nachhaltigkeit angelegt werden.

Mit dem überwiegend dezentralen Charakter der EE geht eine Steigerung der regionalen Wertschöpfung einher (Arbeitsplätze, Steuereinnahmen etc.). Rund 370.000 Arbeitsplätze waren bis 2010 in Deutschland im Bereich der EE entstanden, dazu zählen auch Zulieferfirmen sowie Arbeitsplätze für Installation, Betrieb und Wartung der Anlagen. Die Zahl der im EE-Bereich in Deutschland Beschäftigten lässt sich mittelfristig auf 500.000 erhöhen. Der ökonomische Nutzen der EE wird durch die Schaffung zukunftsgerichteter Arbeitsplätze, regionale Wertschöpfung und Exporte hiesiger Firmen weiter erhöht [5, 8].

Der hiesige Anlagen- und Maschinenbau hat sich mit Unterstützung von Forschung und Entwicklung auf dem Weltmarkt eine hervorragende Ausgangsposition verschafft. Es gilt, diesen Vorsprung zu halten und neue Märkte zu erschließen, weiterhin auf der Basis von Forschung und Entwicklung. Der Umsatz deutscher Unternehmen mit EE betrug 2010 rd. 25 Mrd. € (inkl. Export). Durch die Nutzung der EE in Deutschland wurden Energieimporte von rd. 6 Mrd. € vermieden [5, 8]. Global betragen die Investitionen in EE-Technik derzeit etwa 200 Mrd. € pro Jahr. Das Marktvolumen global wird für 2050 auf rd. 1 Billion € pro Jahr geschätzt, so dass faire Marktbedingungen – auch in anderen Ländern – zur wirtschaftlichen Stärkung in Deutschland beitragen können.

## Ressourceneffizienz und qualitatives Wachstum

Ziel der Bundesregierung ist es, die Ressourcenproduktivität bis 2020 zu verdoppeln (bezogen auf das Jahr 1994). Angesichts der begrenzten Rohstoffe kann dies sicherlich nur ein erster Schritt sein. Für die EE-Branche ergibt sich die strategische Aufgabe, die EE-Anlagen sowie komplementäre Technik mittelfristig so zu konstruieren, dass ein möglichst vollständiges Recycling erfolgen kann. Es gilt dabei, den Einsatz knapper Rohstoffe, v. a. seltener Erden, soweit wie möglich zu vermeiden.

Energie und Wasser als besonders wichtige globale Ressourcen sollten eine Symbiose eingehen: Die Kombination der Energieversorgung auf der Basis der EE mit der Wasserversorgung kann mit

Hilfe solarer bzw. EE-betriebener Meerwasser-Entsalzung ein zentrales Zukunftsfeld werden. Dies gilt besonders für aride und semiaride Regionen. Ferner gilt es, den EE-Einsatz und den Schutz natürlicher Ressourcen in Einklang bringen (Biodiversität, Naturräume, Böden, Gewässer etc.).

Die Ablösung der Kernenergie und der fossilen Energieträger durch die EE kann als Beispiel für qualitatives Wachstum gesehen werden. Es dürfte sich lohnen zu untersuchen, inwieweit sich aus der positiven EE-Entwicklung Erkenntnisse für qualitatives Wachstum in anderen Wirtschaftsbereichen gewinnen lassen. Umgekehrt können einschlägige Innovationen der Materialwissenschaften, des Recyclings und qualitativen Wachstums in anderen Gebieten einen wichtigen Input leisten für den Transformationsprozess im Energiebereich.

## Akzeptanz und Partizipation

Im Rahmen der EE-Querschnittsforschung des BMU wurde bereits eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Bereich der Sozialwissenschaften zu Akzeptanz, Partizipation, Arbeitsplätzen, Qualifikation und Fachinformation gefördert [5, 6]; (s. auch den Beitrag zu Akzeptanz und Partizipation von Schweizer-Ries in diesem Band).

Insbesondere Kommunen, Kreise und Regionen haben die Vorteile der EE-Versorgung erkannt. Die Vorreiter vor Ort mit Engagement und Eigeninitiative haben sich als treibende Kräfte zur regionalen Wirtschaftsförderung und Wertschöpfung mittels EE-Ausbau erwiesen. Der dritte 100 %-EE-Regionen-Kongress in Kassel Ende September 2011 hat gezeigt, dass sich bereits rund 120 solcher 100 %-Regionen und -Kommunen in Deutschland die Vollversorgung mit EE auf die Fahnen geschrieben haben [12]. Die Umsetzung dieser Projekte sollte wissenschaftlich gut begleitet werden.

Akzeptanz und Partizipation spielen auch bei den Anliegen des Umwelt- und Naturschutzes eine wichtige Rolle: Der EE-Ausbau und die Umstrukturierung des Energiesystems sind in Einklang zu bringen mit dem Schutz des Klimas, der Natur, von Boden, Luft und Wasser und nicht zuletzt der menschlichen Gesundheit. Bei der Verbrennung

fossiler Energien konnten die Schadstoffemissionen durch die inzwischen erfolgte Abgasreinigung deutlich gesenkt werden, zumindest in vielen Ländern. Die Freisetzung von Treibhausgasen aber führt über die Klimaänderungen weiterhin zu dramatischen ökologischen Schäden [1, 2, 3, 10]. Damit ist die Transformation des Energiesystems zu hohen EE-Anteilen auch eine Voraussetzung für den Schutz unserer natürlichen Umwelt. Da allerdings bei der Nutzung der EE diesbezüglich Fehler gemacht werden können, z. B. bei ungeeigneter Standortwahl, muss ihr Ausbau auch mit Blick auf wirksamen Umwelt- und Naturschutz ausgestaltet werden.

Fachinformation, Qualifikation, Bildung und Ausbildung sind dabei bedeutsam. Das BMU und andere Ministerien sowie weitere Einrichtungen haben hierbei bereits viel geleistet. Wenn der Umbau unseres Energiesystems nach Kriterien der Nachhaltigkeit gelingen soll, sind diese Anstrengungen zu intensivieren [5, 10].

## Überprüfung der Lebensstile und Fragen der Ethik

Die Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des 11. Deutschen Bundestages ist bereits in ihrem Abschlussbericht von 1990 davon ausgegangen, dass ein gewisses Maß an verantwortungsbewusstem Verhalten notwendig ist für wirksamen Klimaschutz [11]. Angesichts der aktuellen Kenntnislage der Klimaänderungen und ihrer Folgeschäden sowie vielfältiger weiterer Probleme hat sich die globale Perspektive drastisch verschärft und die Notwendigkeit für ethisch geleitetes Handeln weiter erhöht, wie die Berichte des WBGU, des Rats für Nachhaltige Entwicklung und des SRU eindringlich darlegen [1, 2, 3]. Dem weiteren technisch-wissenschaftlichen Fortschritt kommt bei der Bewältigung der Probleme auch in Zukunft eine hohe Bedeutung zu. Es ist jedoch davon auszugehen, dass damit allein die Probleme nicht gelöst werden können. Die Lebensstile in den Industrieländern mit ihrem bisher inhärenten materiellen Wachstum – und entsprechend in den Schwellen- und Entwicklungsländern – sind daher gründlich zu überprüfen. Es ist naheliegend, dass dabei verschiedene

Disziplinen interdisziplinär zusammenarbeiten sollten [1, 2, 3].

Besonders engagierte Menschen, die die EE vorgebracht haben, wurden zuweilen als „Überzeugungstäter“ eingestuft, was oft abwertend gemeint war. Allerdings hat diese Überzeugung und intrinsische Motivation ganz maßgeblich zum Erfolg des EE-Ausbaus beigetragen. Im Bereich der Energie- und Ressourcen-Einsparung wurde der Begriff der Suffizienz entwickelt, um sich diesem Thema zu nähern. Gemeint ist damit eine Lebens- und Wirtschaftsweise, die sich auf das wirklich Notwendige besinnt und so dem Überverbrauch von Gütern und Energie ein Ende setzt. Es ist sehr zu begrüßen, dass sich natur- und ingenieurwissenschaftliche mit sozial- und gesellschaftswissenschaftlichen Innovationen wechselseitig befruchten.

Es dürfte in Zukunft noch stärker auf die Motive, Motivation und ethische Ausrichtung vieler einzelner Menschen sowie der Gesellschaft insgesamt ankommen. Die aktuell arbeitende Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität – Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der Sozialen Marktwirtschaft“ des Bundestages geht solchen Fragen nach [13]. Die Ergebnisse dieser Arbeiten dürften auch für die Transformation des Energiesystems zu hohen EE-Anteilen wertvoll sein. Dieser Prozess zum Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung – in Deutschland, der EU und global – dürfte nur dann gelingen, wenn nicht allein ökonomische oder technische Fragen beantwortet werden, sondern wenn er als eine zentrale gesellschaftliche Aufgabe zum Überleben auf unserem Globus verstanden wird, für die jede/r im eigenen Umfeld Verantwortung trägt.

## Literatur und weitere Informationen

- [1] Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen der BReg: s. insbes. das WBGU-Gutachten 2011 „Welt Im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation“ sowie frühere WBGU-Gutachten: s. [www.wbgu.de](http://www.wbgu.de)

- [2] Rat für Nachhaltige Entwicklung der BReg – RNE: Berichte und Stellungnahmen des RNE: s. [www.nachhaltigkeitsrat.de](http://www.nachhaltigkeitsrat.de)
- [3] Sachverständigenrat für Umweltfragen des BMU: Berichte und Stellungnahmen des SRU: s. [www.umweltrat.de](http://www.umweltrat.de)
- [4] BMU: Erneuerbare Energien – Innovationen – Nachhaltigkeit: aktualisierte Auflage erscheint im Herbst 2011 in deutscher und englischer Fassung; s. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [5] BMU-Webseite zu erneuerbaren Energien mit spartenübergreifenden und spartenspezifischen BMU-Arbeiten zu erneuerbaren Energien sowie Studien und Vorhaben i. A. des BMU: s. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [6] Projektträger Jülich – PTJ: Übersicht über FuE-Vorhaben zu EE: s. [www.ptj.de](http://www.ptj.de)
- [7] DLR, IWES, IfnE: Langfristszenarien/ Leitstudie 2010 (mit engl. Kurzfassung): s. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [8] BMU / AGEE-Stat: Erneuerbare Energien in Zahlen, aktualisierte Auflage: September 2011 (in deutscher und englischer Fassung); s. [www.erneuerbare-energien.de](http://www.erneuerbare-energien.de)
- [9] ForschungsVerbund Erneuerbare Energien – FVEE, s. [www.fvee.de](http://www.fvee.de)
- [10] BMU-Webseite: s. [www.bmu.de](http://www.bmu.de)
- [11] Deutscher Bundestag: „Schutz der Erde: Eine Bestandsaufnahme mit Vorschlägen zu einer neuen Energiepolitik“; Dritter Bericht der Enquete-Kommission „Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre“ des 11. Dt. Bundestags, Bonn 1990
- [12] dENet: Projekt: „100 %-Erneuerbare-Energie-Regionen“, s. [www.100-ee-kongress.de](http://www.100-ee-kongress.de)
- [13] Enquete-Kommission „Wachstum, Wohlstand, Lebensqualität – Wege zu nachhaltigem Wirtschaften und gesellschaftlichem Fortschritt in der Sozialen Marktwirtschaft“ des 17. Dt. Bundestags, s. [www.bundestag.de](http://www.bundestag.de)
- [14] Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; de Tena, D. L.; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; von Oehsen, A.; Schwinn, R.; Pape, C.; Hahn, H.; Wickert, M.; Wenzel, B.: „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ Kurzbezeichnung: „BMU-Leitstudie 2011“ Berlin 29. März 2012 <http://www.fvee.de/publikationen/publikation/download/bmu-leitstudie-2011-2932012/>

# Langfristszenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland



**DLR**

Dr. Joachim Nitsch

jo.nitsch@t-online.de

Dr. Thomas Pregger

thomas.pregger@dlr.de

**Ingenieurbüro für neue Energien**

Dr. Bernd Wenzel

bwenzel@ifne.de

Seit Herbst 2010 besteht mit dem Energiekonzept der Bundesregierung ein politischer Konsens über das Ziel, langfristig ein weitaus effizienteres und von erneuerbaren Energien (EE) dominiertes Energiesystem in Deutschland zu erreichen. Mit dem im Juni 2011 beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie hat sich der Druck auf eine konsequente Umsetzung dieser Ziele erheblich verstärkt. Der Ausbau der EE muss hierzu mit einer beträchtlichen Dynamik in allen Bereichen des Energiesystems und einhergehend mit wachsenden Märkten erfolgen. Die im Auftrag des BMU in den letzten 10 Jahren entstandenen Leitstudien erstellten und analysierten konsistente Mengengerüste des EE-Ausbaus und der gesamten Energieversorgung in Deutschland. Die derzeit in der Fertigstellung befindliche „Leitstudie 2011“ beschreibt den notwendigen Transformationsprozess, um die Ausbauziele des Energiekonzepts in allen Bereichen des Energiesystems mit plausiblen Entwicklungen zu erreichen.

Um die Ziele des Energiekonzepts (*Tabelle 1*) zu erreichen, ist eine konsequente Umsetzung von Effizienzpotenzialen in allen Bereichen, eine sehr dynamische Entwicklung der erneuerbaren Strom- und Wärmeerzeugung sowie ein wirksamer Durchbruch neuer Fahrzeugkonzepte mit elektrischem Antrieb erforderlich.

## Kennwerte der zukünftigen Stromversorgung

*Abbildung 1* zeigt die langfristige Entwicklung der Struktur des Bruttostromverbrauchs und der Beiträge der erneuerbaren Energien. Der Endenergieverbrauch beim Strom sinkt aufgrund von Effizienzmaßnahmen bis 2050 um 25 % gegenüber 2008. Dennoch steigt die Bruttostromerzeugung langfristig wieder an, da EE-Strom zunehmend zur neuen „Primärenergiequelle“ wird und längerfristig direkt oder über Wasserstoff oder Methan auch im Wärmesektor und im Verkehr fossile Brenn- und Kraftstoffe substituiert.

*Tabelle 1*

Quantifizierte Ziele des Energiekonzepts der Bundesregierung

	2020	2030	2040	2050
Minderung der THG-Emissionen (bezogen auf 1990)	-40 %	-55 %	-70 %	-80 bis 95%
Anteil der EE am (Brutto-) Endenergieverbrauch	18 %	30 %	45 %	60 %
Anteil der EE am Bruttostromverbrauch	35 %	50 %	65 %	80 %
Minderung des Primärenergieverbrauchs *)	-20 %			-50 %
Minderung des Stromverbrauchs	-10 %			-25 %
Minderung des Endenergieverbrauchs Verkehr	-10 %			-40 %
Reduzierung des Wärmebedarfs (2020) bzw. des Primärenergiebedarfs (2050) von Gebäuden **)	-20 %			-80 %

Weiteres Ziel (Beschluss des Bundestages vom 30.6.2011): Vollständiger Ausstieg aus der Kernenergie bis 2022

\*) Steigerung Energieproduktivität um im Mittel 2,1 % pro Jahr

\*\*) Steigerung der energetischen Sanierungsrate von 1 % auf 2 % pro Jahr

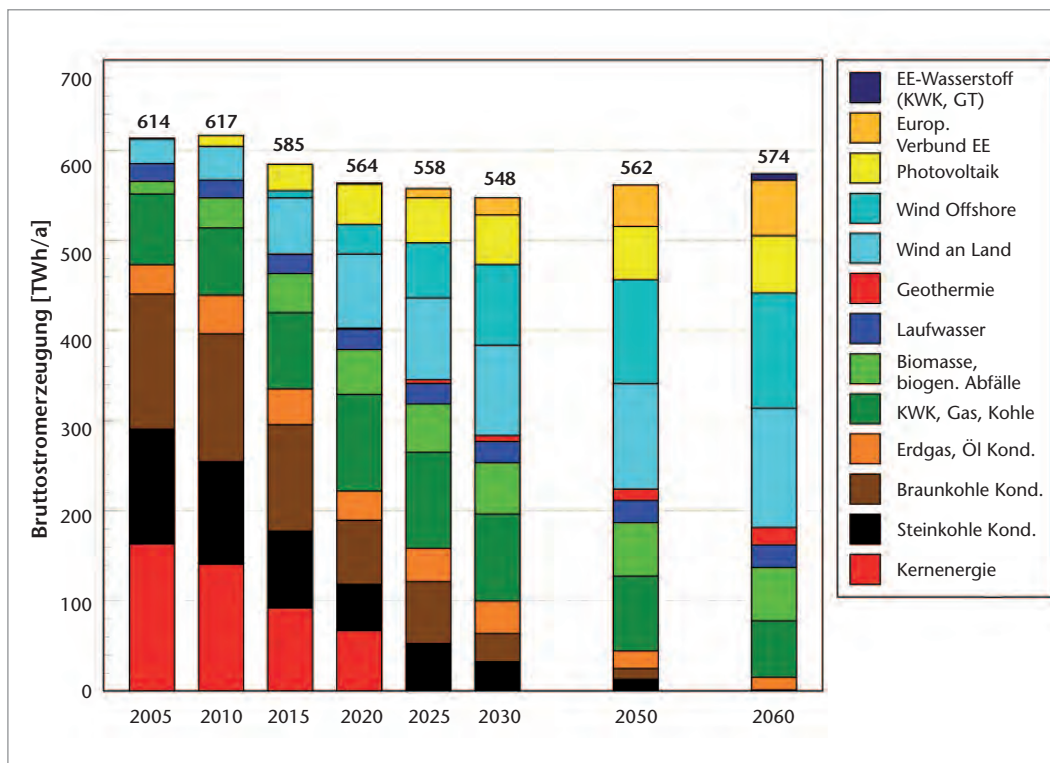


Abbildung 1  
Entwicklung der  
Bruttostromerzeugung  
in Deutschland bis  
2050 im Szenario  
2011 A (Nitsch et al.;  
Leitstudie 2011)

Die EE-Stromerzeugung erreicht im Jahr 2020 aufgrund der sich entwickelnden Marktdynamik einen Anteil von etwa 40%, im Jahr 2050 wird ein Anteil von über 85% erreicht. Die Wachstumsdynamik wird überwiegend von der Windenergie und der Solarstrahlung getragen, während das Potenzial der Biomasse zur Stromerzeugung um 2030 mit rund 60 TWh/a ausgeschöpft sein wird.

Für die Stromerzeugung wird nach 2020 auch der Import von EE-Strom im Rahmen eines europäischen Stromverbunds bedeutend. Im Jahr 2050 werden in diesem Szenario etwa 15% des Gesamtstromverbrauchs als EE-Strom importiert.

Abbildung 2 zeigt die installierten Leistungen zur Stromerzeugung. Durch den starken Zubau bei Photovoltaik und Windkraft erhöhen sich die insgesamt installierten und insbesondere die nichtregelbaren Leistungen stark. Die Erzeugungscharakteristiken erneuerbarer Technologien erfordern eine zunehmend fluktuierende Restlastdeckung durch regelbare Erzeugungskapazitäten. Um genügend Flexibilität in der Stromerzeugung für die Deckung dieser Residuallast zu haben und um gleichzeitig die CO<sub>2</sub>-Minderungsziele einhal-

ten zu können, müssen Kohlekraftwerke in größerem Umfang stillgelegt und Gaskraftwerke ausgebaut werden. Insgesamt geht der Bedarf an fossilen Kraftwerken deutlich zurück. Im Szenario sinkt die Leistung fossiler Kraftwerke von derzeit 82 GW auf 24 GW im Jahr 2050.

Zusammen mit Biomasse-, Geothermie- und Wasserkraftwerken mit einer Leistung von 21 GW, einer ausgeweiteten Speicherkapazität (einschließlich wasserstoffgefeuerter Kraftwerke) von 19 GW und einem (geringen) Anteil der Leistungen fluktuierender EE-Erzeugung, sowie weiteren Lastmanagementmaßnahmen, ist jederzeit die erforderliche Leistung zur Deckung der Lastnachfrage vorhanden.

Mit dem beschriebenen Leitszenarien 2010 bzw. 2011 A wird im Jahr 2050 ein EE-Beitrag (gesamte Endenergie) von knapp 60% erreicht (Strom allein 85%). Der Endenergieverbrauch ist dabei definiert als gesamter Primärenergieeinsatz abzüglich aller Umwandlungs- und Verteilungsverluste und abzüglich des nichtenergetischen Verbrauchs. Zusammen mit der unterstellten Effizienzsteigerung können die Treibhausgasemissionen damit um rund 80% (gegenüber 1990)



Abbildung 2  
Entwicklung der Bruttoleistung der Kraftwerke in Deutschland bis 2050 im Szenario 2011A (Grafik und Tabelle in GW)

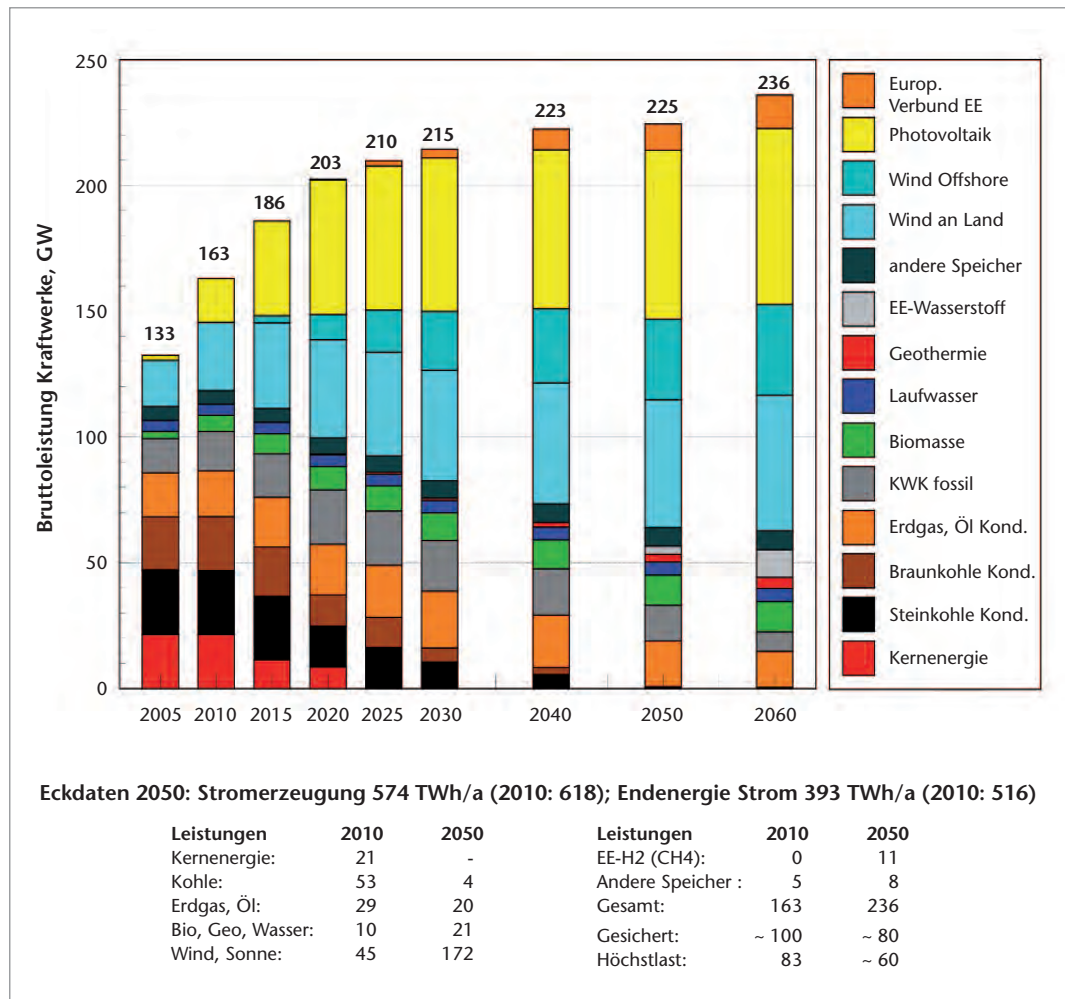
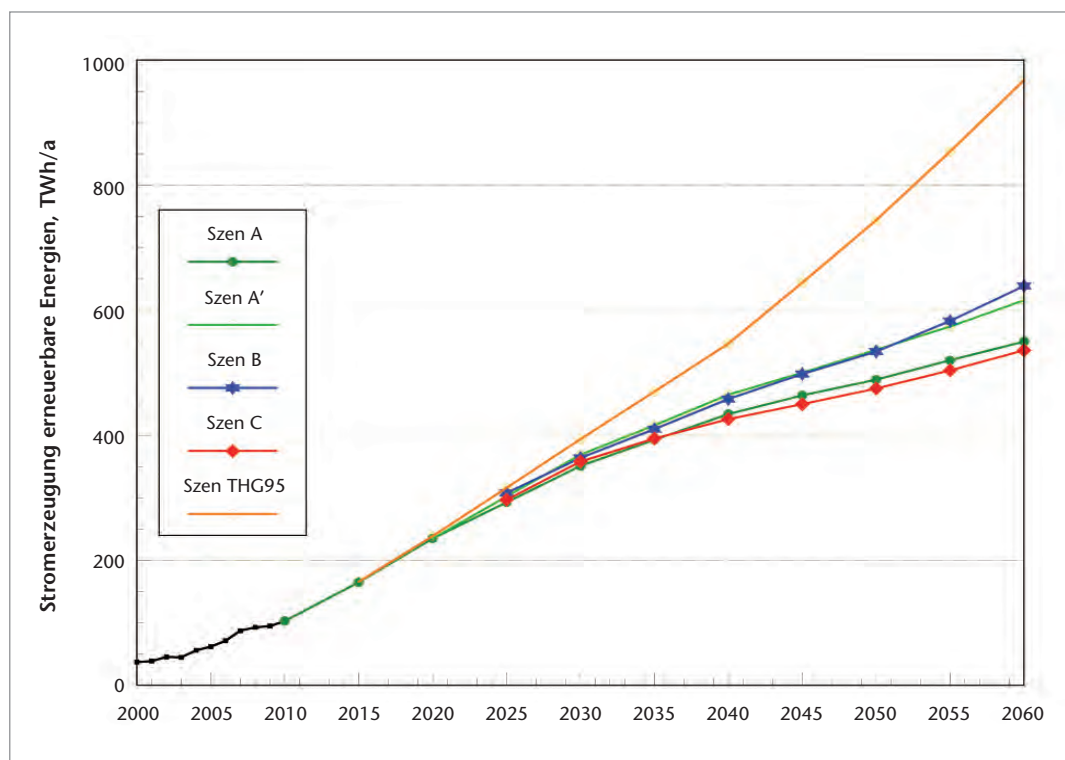


Abbildung 3  
Korridor der zukünftigen EE-Stromerzeugung in den fünf Szenarien 2011. (Szenarien A, B und C mit weitgehender Zielerfüllung des Energiekonzepts, aber unterschiedlichen Strategien im Verkehrssektor; Szenario A' mit geringerer Effizienzsteigerung beim Strom; Szenario THG95 mit Erreichung des oberen THG-Minderungsziels bis 2060)



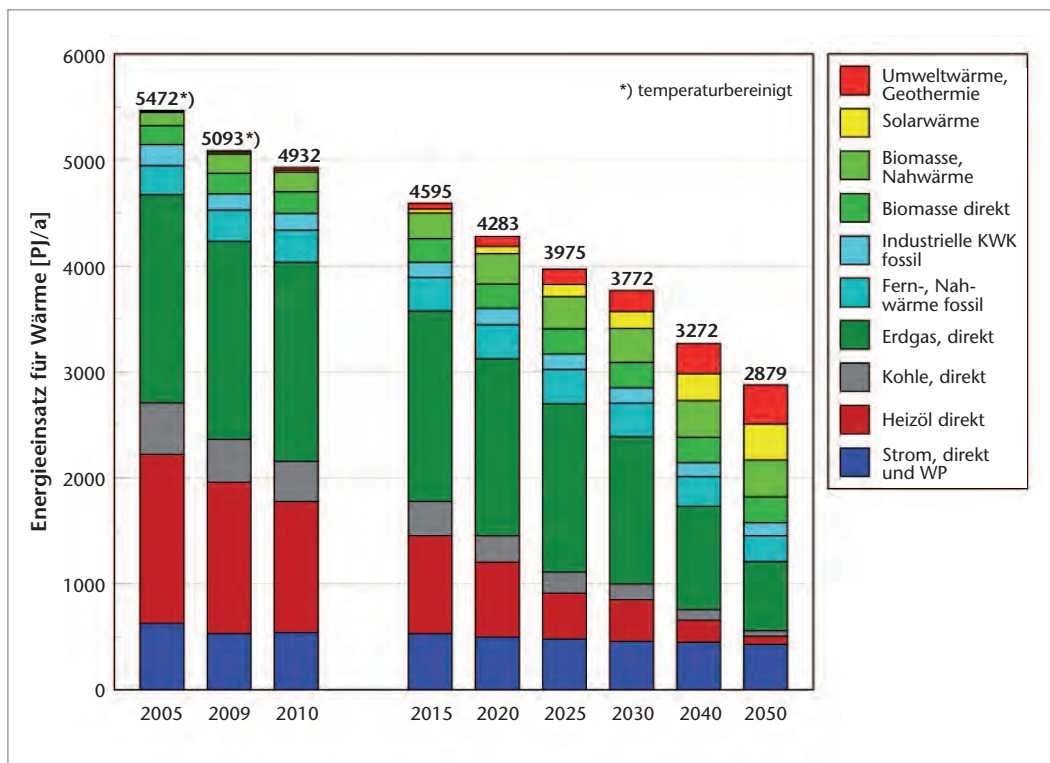


Abbildung 4  
Entwicklung der  
Endenergie für  
Wärmeerzeugung in  
Deutschland bis 2050  
(Endenergie ist definiert  
als Energiebedarf aller  
Verbraucher)

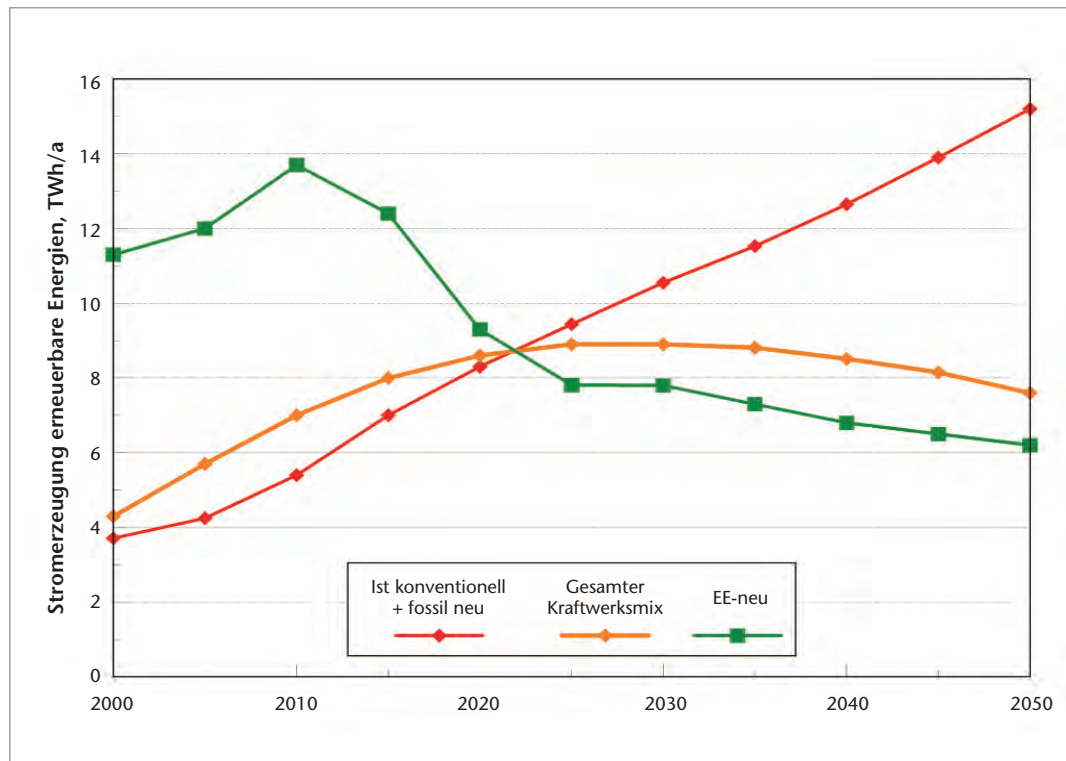
reduziert werden. EE-Strom trägt dazu mit rund 550 – 600 TWh/a bei (2010: 103 TWh/a). Damit das im Energiekonzept genannte obere Klimaschutzziel von 95 % erreicht werden kann, ist eine praktisch emissionsfreie Energieversorgung, also eine Vollversorgung mit EE erforderlich. *Abbildung 3* zeigt die dazu erforderliche Steigerung der „Primärenergie“ EE-Strom. Mit einem EE-Stromangebot von knapp 1000 TWh/a können bis zum Jahr 2060 fossile Energieträger aus allen Nutzungsbereichen verdrängt werden (orange-farbene Kurve für das THG95-Szenario). Große Anteile dieses EE-Stroms können direkt im Wärmesektor und im Verkehrssektor eingesetzt werden, ein beträchtlicher Anteil stellt jedoch momentan nicht nutzbaren „Überschussstrom“ dar und kann daher nur über den Weg einer chemischen Speicherung einer Nutzung zugeführt werden. Dafür werden in 2050 rund 180 TWh/a und im Jahr 2060 bereits 380 TWh/a eingesetzt. Als chemischer Energieträger stehen Wasserstoff und/oder Methan zur Verfügung.

## Eckwerte im Wärmesektor

Im EE-Wärmemarkt muss die Wachstumsdynamik deutlich verstärkt werden. Im Jahr 2030 sind jährlich 11 GWth/a und in 2050 rund 16 GWth/a an thermischen EE-Anlagen zu installieren – das sind das Zwei- bzw. Dreifache des heutigen Wertes. Dazu muss vorwiegend in Solarkollektor- und Erdwärmeanlagen sowie in Wärmepumpen investiert und das gesamte Förderinstrumentarium umfangreicher und effektiver ausgestaltet werden. Der erneuerbare Anteil an der Wärmebereitstellung kann damit von derzeit 10% auf 52% im Jahr 2050 steigen, wenn gleichzeitig eine erfolgreiche Effizienzstrategie eine Verringerung der Wärmenachfrage auf etwa 54% des heutigen Verbrauchs bewirkt (*Abbildung 4*).

Stärker als die Gesamtmenge muss die Wärmeversorgung mit Nahwärmenetzen wachsen, um die im Szenario vorgeschlagene Ausweitung der EE-Wärmeversorgung mit Solarkollektoren und Erdwärme realisieren zu können. Eine systematische und flächendeckende Planung und Verwirklichung kommunaler Wärmekonzepte muss daher stärker als bisher im Mittelpunkt stehen.

Abbildung 5  
Strompreisentwicklung bei zukünftig ausschließlich fossilen Kraftwerken, bei Neuanlagen der EE-Stromerzeugung und bei einer Kombination gemäß Leitszenario 2010 bei merklich steigenden fossilen Brennstoffpreisen und Preisen für CO<sub>2</sub>-Zertifikate (Nitsch et al: Leitstudie 2010)



## Eckwerte im Verkehrssektor

Im Verkehrssektor werden im Personenverkehr im Jahr 2050 mit rund 750 PJ/a noch 45 % der derzeitigen Endenergie benötigt. Wegen der erwarteten beträchtlichen Wachstumsraten des Güterverkehrs kann die Effizienzsteigerung hier nur den Verbrauchszuwachs dämpfen, der Endenergieverbrauch des Güterverkehrs liegt 2050 nur 12 % unter dem derzeitigen Verbrauch (2009: 900 PJ/a). Im Jahr 2050 wird im Verkehr mit 780 PJ/a nur noch ein Drittel des heutigen fossilen Kraftstoffbedarfs benötigt.

Der aus Nachhaltigkeitsgründen auf 300 PJ/a begrenzte Beitrag von Biokraftstoffen wird flankiert durch ähnlich hohe Beiträge von EE-Wasserstoff und den Einsatz von EE-Strom für Elektromobilität, was aus den prinzipiell attraktiven Potenzialen aller drei Optionen resultiert. Da in Energiesystemen mit hohen EE-Anteilen generell aus EE erzeugte chemische Energieträger (EE-Wasserstoff oder daraus erzeugtes EE-Methan) benötigt werden, legt dies auch ihre rechtzeitige Einführung im Verkehrssektor nahe.

## Kosten und Nutzen des Ausbaus der erneuerbaren Energien

Die Leitstudien beleuchten auch die langfristigen Kosten- und Nutzeneffekte der abgebildeten Ausbaupfade. Das Investitionsvolumen in alle EE-Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung pendelt sich nach der durch die Photovoltaik bestimmten Spitze der Jahre 2009 bis 2011 mit bis zu 27 Mrd. €/a relativ konstant bei 18–20 Mrd. €/a ein. Erst nach 2030 wächst es nochmals auf 22 Mrd. €/a. Bis 2010 wurden in EE-Anlagen zur Strom- und Wärmebereitstellung insgesamt rund 150 Mrd. € investiert. Zwischen 2011 und 2020 wird das kumulierte Investitionsvolumen mit weiteren 180 Mrd. € noch deutlich steigen. Auch in den darauf folgenden Jahrzehnten bleibt es auf diesem Niveau. Die in den Szenarien angenommene Wachstumsdynamik ist weiterhin erforderlich, um die Kostendegressionen der Einzeltechniken durch steigende Umsätze kompensieren zu können. Das ist auch eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die Technolo-

gieführerschaft Deutschlands für die Mehrzahl der EE-Techniken auf dem Weltmarkt gehalten werden kann.

Durch diese massive Verlagerung von „Energieausgaben“ auf die investive Seite spart die deutsche Volkswirtschaft beträchtliche Ausgaben für den Einkauf teurer werdender fossiler Energien ein. Derzeit sind es rund 6 Mrd. €/a, bis 2030 steigt die Einsparung bereits auf 30–40 Mrd. €/a und bis 2050 sind es 60–70 Mrd. €/a. Dies ist nur ein Nutzenaspekt des EE-Ausbaus.

Für die EE-Techniken zur Stromerzeugung stellen sich aufgrund der erwarteten Lernraten längerfristig niedrige Gestehungskosten zwischen 5 und 9 Ct/kWh ein. Die durchschnittlichen Stromgestehungskosten aller installierten EE-Neuanlagen lagen im Jahr 2010 bei knapp 14 Ct<sub>2009</sub>/kWh. Es wird erwartet, dass der Mittelwert des Gesamtmixes bis 2020 auf ca. 9 Ct/kWh, und längerfristig auf rund 6 Ct/kWh sinken wird (*Abbildung 5*). Mit dieser Entwicklung kann der drohende stetige Anstieg der Energie- bzw. Stromkosten beim Verharren auf einer „fossilen“ Strategie gebremst und längerfristig kann durch EE sogar eine Kostensenkung erreicht werden.

Zusätzlich entsteht ein gewaltiger ökologischer Nutzen beim Übergang in eine klimaneutrale, ressourcenschonende, risikoarme und unbegrenzt verfügbare Energieversorgung auf EE-Basis. Diesen heute ökonomisch noch sehr unzulänglich berücksichtigten Wert mittels weiterer Instrumente und Maßnahmen rasch sichtbar zu machen und entsprechende Marktkorrekturen einzuleiten, muss die vorrangige Aufgabe der Energiepolitik in diesem Jahrzehnt sein.

## Literatur

Nitsch, J.; Pregger, T.; Sterner, M.; Gerhardt, N.; Wenzel, B. u. a.: „Leitstudie 2010“. Projektbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Februar 2011

([www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010\\_bf.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2010_bf.pdf)).

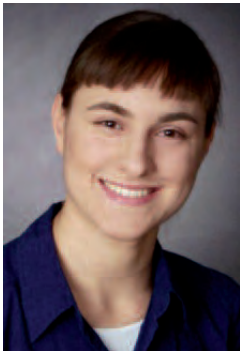
Dito „Leitstudie 2011“, in Vorbereitung.

Nitsch, J.; Pregger, T.; Naegler, T.; Heide, D.; de Tena, D. L.; Trieb, F.; Scholz, Y.; Nienhaus, K.; Gerhardt, N.; Sterner, M.; Trost, T.; von Oehsen, A.; Schwinn, R.; Pape, C.; Hahn, H.; Wickert, M.; Wenzel, B.: „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“

Kurzbezeichnung: „BMU-Leitstudie 2011“  
Berlin 29. März 2012

<http://www.fvee.de/publikationen/publikation/download/bmu-leitstudie-2011-2932012/>

# Ausbau von Speicherkapazitäten für eine effiziente Stromversorgung mit erneuerbaren Energien in Deutschland und Europa bis 2050



**DLR**

Yvonne Scholz  
yvonne.scholz@dlr.de

**ZSW**

Maïke Schmidt  
maïke.schmidt@zsw-bw.de

**Fraunhofer IWES**

Dr. Michael Sterner  
michael.sterner@iwes.fraunhofer.de

**ZAE Bayern**

Dr. Andreas Hauer  
hauer@muc.zae-bayern.de

In der Leitstudie 2010 [BMU 2010] wird die installierte Leistung der Erneuerbaren aus Wind, PV, Wasserkraft und Geothermie in Deutschland bis zum Jahr 2050 auf ca. 153 GW gesteigert. Aber diese Leistung steht nicht zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung und wird auch nicht immer genau dann gebraucht, wenn sie erzeugt wird. Denn die Spitzenlast, d. h., die maximal zu einem Zeitpunkt benötigte Leistung beträgt im Jahr 2050 nur noch rund 74 GW und der Strombedarf wird dann in ca. einem Drittel des Jahres von der möglichen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien überstiegen. Andererseits steht zu anderen Zeitpunkten mit wenig Sonne und Wind nicht genügend Energie zur Bedarfsdeckung bereit.

Zur Anpassung der Stromeinspeisung durch Erneuerbare an den Strombedarf können Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Batterien und die chemischen Energieträger Wasserstoff und Methan dienen und so auch zur Netzstabilität beitragen. Um den Bedarf an Lastverlagerung zu ermitteln, müssen Strombedarf und fluktuierende Stromerzeugung in ihrem stündlichen Verlauf analysiert werden.

Der Anteil erneuerbarer Energieträger an der Bruttostromerzeugung in Deutschland wird im Basisszenario A der Leitstudie 2010 [1] bis zum Jahr 2050 auf 87 % gesteigert. Die Kapazität der installierten Photovoltaik-, Windenergie-, Wasserkraft- und Geothermieanlagen wächst im gleichen Szenario von rund 50 GW im Jahr 2010 auf das Dreifache (ca. 153 GW) im Jahr 2050. Gleichzeitig sinkt durch Effizienzmaßnahmen der Strom-Endenergiebedarf und mit ihm die Spitzenlast. Wenn man den Jahreslastgang Deutschlands des Jahres 2006 linear mit dem Szenario-Strombedarf skaliert, ergeben sich für das Jahr 2010 rund 80 GW Spitzenlast, im Jahr 2050 hingegen nur noch ca. 74 GW. Legt man den Strombedarf aus den Szenarien des Energiekonzeptes [2]

zugrunde, ergeben sich sogar nur noch rund 60 GW an Spitzenlast im Jahr 2050. Das Verhältnis der fluktuierenden Erzeugungskapazität bestehend aus Wind-, PV- und Wasserkraftanlagen zur Spitzenlast beträgt entsprechend [1] im Jahr 2010 0,6. Im Jahr 2050 beträgt dieses Verhältnis 2,1. Dies bedeutet, dass im Jahr 2050 bei gleichzeitiger Stromproduktion der fluktuierenden Erzeugungskapazitäten bei Nennleistung die Spitzenlast um mehr als das Doppelte überschritten wird. Einerseits wird ein solches gleichzeitiges Einspeisen bei Nennleistung wegen des Einflusses von Wetter und Anlagenverteilung (z. B. PV auf Südwest- und Südost-Dächern) nicht vorkommen, andererseits verschärfen zusätzlich wärmegeführte KWK-Anlagen das Verhältnis nicht regelbarer Erzeugungskapazitäten zu stündlichem Strombedarf.

Abbildung 1 veranschaulicht die Entwicklung der Verhältnisse in Deutschland entsprechend [1]. Zum Vergleich sind auch die Verhältnisse in Europa entsprechend der Studie „Trans-CSP“ [3] dargestellt. In Europa beträgt das Verhältnis der PV-, Windenergie-, Wasserkraft- und Geothermie-Erzeugungskapazität zur Spitzenlast 0,5 im Jahr 2010; im Jahr 2050 beträgt es 1,1 bei einem Anteil erneuerbarer Stromerzeugung von dann 80 %. Der Anteil regelbarer erneuerbarer Stromerzeugung in Europa ist durch den Einsatz solarthermischer Kraftwerke und einen deutlich höheren Anteil an Biomasse-Kraftwerken größer als in Deutschland.

Wegen der hohen installierten Leistung von nicht regelbaren erneuerbaren Erzeugungskapazitäten mit teilweiser wetterabhängiger Stromerzeugung ist neben starken Einspeiseschwankungen ab 2030 auch mit deutlichen Produktionsüberschüssen zu rechnen.

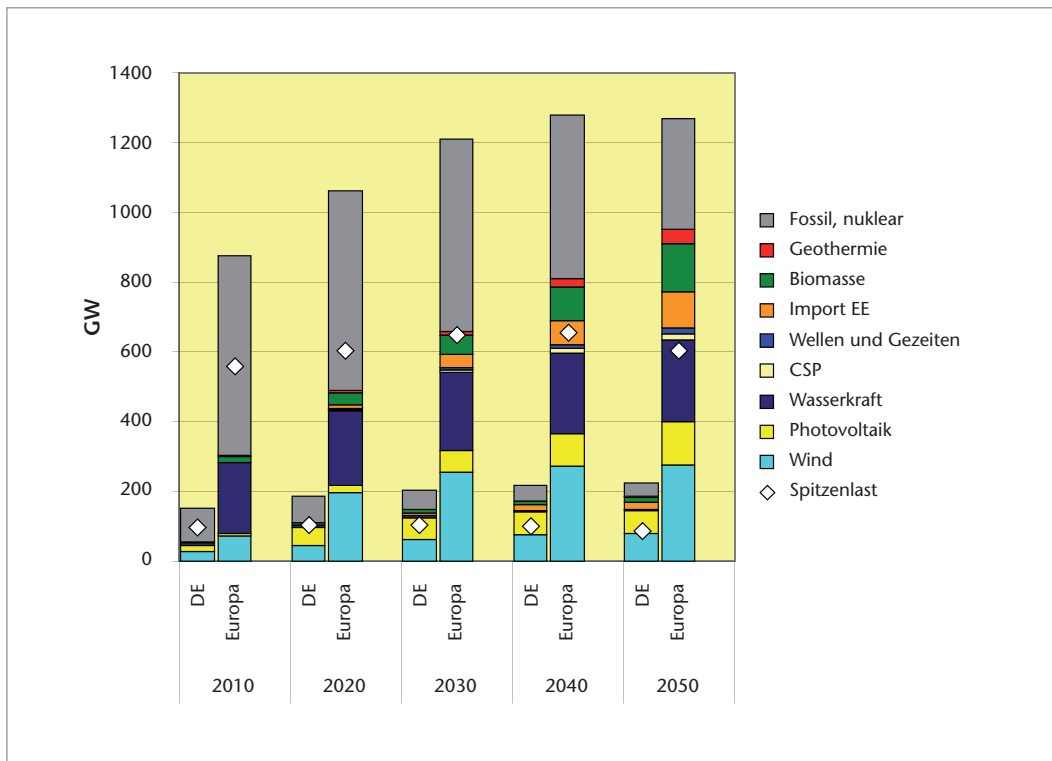


Abbildung 1

	EE-Anteil	Import	Leistung	Speicherkapazität
Leitstudie 2010, Basis A [BMU 2010]	87 %	20 %	H2-Erzeugung für den Verkehrssektor	
Trans-CSP [Trieb 2006]	80 %	20 %	Import von Regelenergie aus CSP	
[SRU 2011] / [Scholz 2010]	100 %	0 %	32 GW	0.8 TWh
[UBA 2010]	100 %	0 %	Elektrolyse: 44 GW GuD-Kraftwerk: 30 GW	40 TWh

Tabelle 1 Speichereinsatz in verschiedenen Szenarien

Trotz dieser Überschüsse kann der Strombedarf nicht zu jeder Zeit durch die fluktuierenden erneuerbaren Erzeugungskapazitäten gedeckt werden. Zur Deckung der noch bestehenden Versorgungslücken (Restlast) können flexible, regelbare Erzeugungskapazitäten eingesetzt werden. In diesem Fall müssen allerdings Überschüsse durch das Abregeln der fluktuierenden Erzeugungskapazitäten vermieden werden.

In Ergänzung zu einem angepassten regelbaren Kraftwerkspark kann die Restlast geglättet werden durch:

- Lastmanagement
- internationalen Stromaustausch
- Speicher.

Da Speicher andere Lastglättungsmöglichkeiten ergänzen oder mit ihnen konkurrieren, kann der Einsatz von Speichern nur dann als „Speicherbedarf“ bezeichnet werden, wenn alle anderen Komponenten eines Stromerzeugungssystems in einem Szenario vorgegeben sind. Werden diese variiert, variieren auch die Dimensionierung und der Einsatz von Speichern. Dadurch kann es zu sehr unterschiedlichem Speicherausbau und -einsatz in verschiedenen Szenarien kommen, wie Tabelle 1 zeigt.

In der Studie „Trans-CSP“ [3], in welcher nationale Szenarien für die Regionen Europa, Nordafrika und Naher Osten erstellt wurden, wird der Problematik der fluktuierenden Erzeugung bei 80 % EE-Anteil dadurch begegnet, indem weniger

direkt wetterabhängig einspeisende Erzeugungskapazitäten (Wind, PV) und mehr regelbare Leistung aus solarthermischen Kraftwerken installiert und der Strom nach Europa importiert wird.

Im Gegensatz dazu, wird im Basisszenario A der Leitstudie 2010 [1] mit 87% EE-Anteil nicht unmittelbar verwendbarer Strom durch Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt, welcher dann für den Verkehrssektor zur Verfügung steht.

Zwei Studien mit 100% EE-Anteil in Form einer Selbstversorgung Deutschlands als Inselform ohne Importe und Exporte wurden in den letzten beiden Jahren veröffentlicht: „Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen“ [4] und „Wege zur 100% Erneuerbaren Stromversorgung“ [5]. Die beiden Studien kommen bei ähnlichen Rahmenbedingungen zu sehr ähnlichen Ergebnissen für die installierte Speicherleistung: 32 GW bidirektionale Speicherleistung [5] und 44 GW Elektroplus 30 GW GuD-Kraftwerk [4]. Die Ergebnisse für die Speicherkapazität unterscheiden sich jedoch stark: während in [5] nur 0.8 TWh Speicherkapazität eingesetzt werden [6], sind es in [4] 40 TWh. Der Grund hierfür liegt in den Annahmen zum Biomasseinsatz: in [5] wird ein Teil der Biomasse für die Wärmebereitstellung und den Verkehr reserviert. Die für die Stromerzeugung oder KWK freigestellte Biomasse wird allerdings vorwiegend zur Stromerzeugung in Zeiten mit niedriger Einspeisung aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen eingesetzt. Sie macht so einen saisonalen Speicher überflüssig. In [4] wird die Biomasse dem zugrunde gelegten Szenario entsprechend vorwiegend in KWK-Anlagen verstromt. Für längere Windflauten im Winter wird daher ein saisonaler Speicher erforderlich.

Die Unterschiede im Speichereinsatz können auch durch unterschiedliche Methoden für die Ermittlung des Speichereinsatzes beeinflusst sein. Zwei Methoden lassen sich unterscheiden:

a) Vorgabe eines Szenarios der Stromerzeugung oder eines gesamten Energiesystems und Untersuchung der zeitlich aufgelösten Restlast (Strombedarf, welcher nicht durch fluktuierende Erzeugungskapazitäten gedeckt wird) nach Festlegung einer Einsatzreihenfolge.

b) Zeitlich aufgelöste Last- und Erzeugungsdaten als Input in ein Optimierungsmodell mit oder ohne Szenariovorgaben und Festlegung der freien Systemvariablen für ein volkswirtschaftliches Kostenminimum unter gegebenen Kostenannahmen.

Methode (a) setzt voraus, dass es eine Einsatzreihenfolge gibt und dass die Erzeugung regelbarer Kraftwerke diese nicht beeinflusst. Sie ist dabei übersichtlich, die Ergebnisse sind einfach zu interpretieren und anschaulich darzustellen. Es wird dabei jedoch nicht berücksichtigt, dass sich die regelbaren Systemkomponenten gegenseitig beeinflussen können, z. B. kann ein regelbares Kraftwerk Strom zum Beladen eines Speichers erzeugen, damit das Speicherkraftwerk später eine Bedarfslücke füllen kann, was allein durch Beladung mit EE-Strom evtl. nicht möglich gewesen wäre. Solche Wechselwirkungen können mit einem Optimierungsmodell berücksichtigt werden. Allerdings sind die Ergebnisse häufig weniger übersichtlich und wegen der Wechselwirkungen des Einsatzes verschiedener Technologien schwerer zu interpretieren.

Beide Analysen erfordern Zeitreihen des Strombedarfs und der Stromeinspeisung bzw. der potenziellen Stromerzeugung mit einer möglichst stündlichen Auflösung. Im Folgenden wird die Erzeugung der Zeitreihen kurz erläutert und ein Restlastverlauf, d. h. der Lastverlauf nach Abzug der Stromerzeugung in Photovoltaik-, Windenergie-, Wasserkraft- und Geothermiekraftwerken in den Jahren 2020 und 2050 abgeleitet. Anhand des Restlastverlaufs wird beispielhaft die mögliche Lastglättung durch die vorhandenen Pumpspeicherkapazitäten aufgezeigt.

Zur Analyse von – wo nötig stündlichen – Stromerzeugungspotenzialen erneuerbarer Energieträger sind drei Schritte erforderlich:

1. Ressourcenanalyse
2. Flächenanalyse
3. Anwendung eines Kraftwerksmodells.

Die **Ressourcenanalyse** umfasst die Bereitstellung und evtl. Aufbereitung von wetterabhängigen, stündlichen Ressourcendaten wie direkte und diffuse Sonneneinstrahlung, Windgeschwindigkeit oder von nicht wetterabhängigen Daten wie Temperaturen im Gestein.

Im zweiten Schritt wird die **Fläche** analysiert, auf der eine Stromerzeugungstechnologie für die jeweilige Ressource eingesetzt werden kann: Auf welchen Flächen ist die Anwendung grundsätzlich möglich? Welcher Anteil der Fläche muss für Konkurrenznutzungen reserviert werden? Gibt es Einschränkungen durch Naturschutz oder durch gesellschaftliche Hemmnisse?

Nach der Ermittlung der jeweiligen Ressourcen und nachdem Annahmen zu den nutzbaren Flächen und Flächenanteilen getroffen wurden, kann im dritten Schritt ein **Kraftwerksmodell** eingesetzt werden, wodurch die jeweiligen Stromerzeugungspotenziale berechnet werden können.

Am Beispiel der Windenergie ist das z. B. die Leistungskennlinie einer Windkraftanlage, an der für jede Windgeschwindigkeit die entsprechende Produktionsleistung abgelesen werden kann.

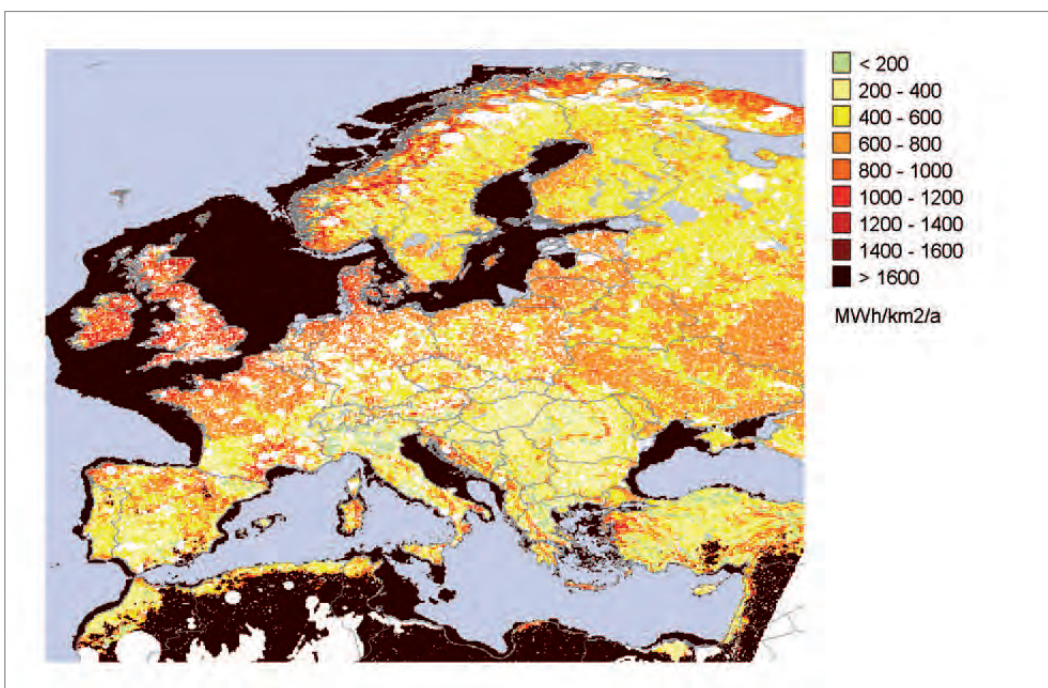
*Abbildung 2* zeigt ein Ergebnis einer solchen Analyse für die Windenergie: Eine Karte mit der Jahressumme der potenziellen Stromerzeugung durch Windenergieanlagen in MWh/km<sup>2</sup>/a (Ressourcendaten: Jahr 2006). *Abbildung 3* zeigt die für Deutschland aggregierte Zeitreihe der maximalen potenziellen Stromerzeugung durch Windkraftanlagen (onshore + offshore). Es wird ersichtlich, dass die Stromerzeugung aus Wind-

energie sowohl starken saisonalen als auch täglichen Schwankungen unterworfen ist.

In ähnlicher Weise können Potenzialanalysen für die anderen erneuerbaren Energieträger durchgeführt werden. Die potenzielle Stromerzeugung kann dann mit Szenarioannahmen zur tatsächlich installierten Kapazität in bestimmten Jahren skaliert werden.

Stündliche Zeitreihen der Netzlast in Deutschland, d. h. des Endenergiebedarfs an elektrischem Strom plus Netzverluste, sind bei den einzelnen Transportnetzbetreibern oder bei deren europäischer Dachorganisation, der ENTSO-E, verfügbar. Zieht man die mit Szenarioannahmen zur installierten Kapazität skalierten Einspeisezeitreihen von Photovoltaik-, Windenergie-, Wasserkraft- und Geothermieanlagen von der Lastzeitreihe ab, so erhält man die entsprechende Restlast.

*Abbildung 4* zeigt die Restlast für die Jahre 2020 und 2050 entsprechend den Annahmen aus dem Basisszenario A der Leitstudie 2010. Es ist im Verlauf des Jahres 2020 zu erkennen, dass es schon zu geringfügigen Überschüssen durch die Stromerzeugung fluktuierender Erzeugungskapazitäten kommt und es kein Grundlastband mehr gibt. Grundlastkraftwerke müssten also entweder zeit-



*Abbildung 2*



Abbildung 3

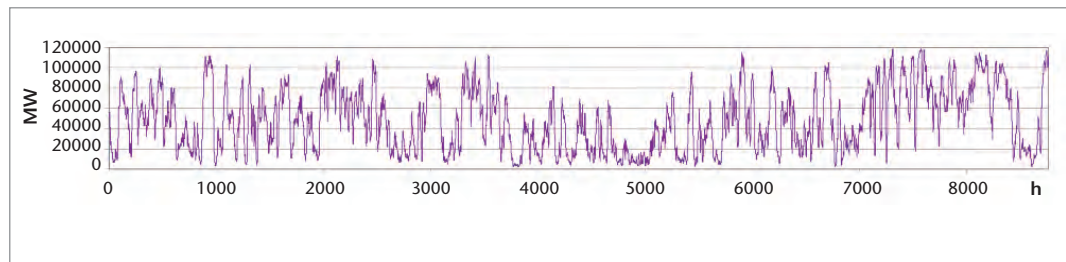
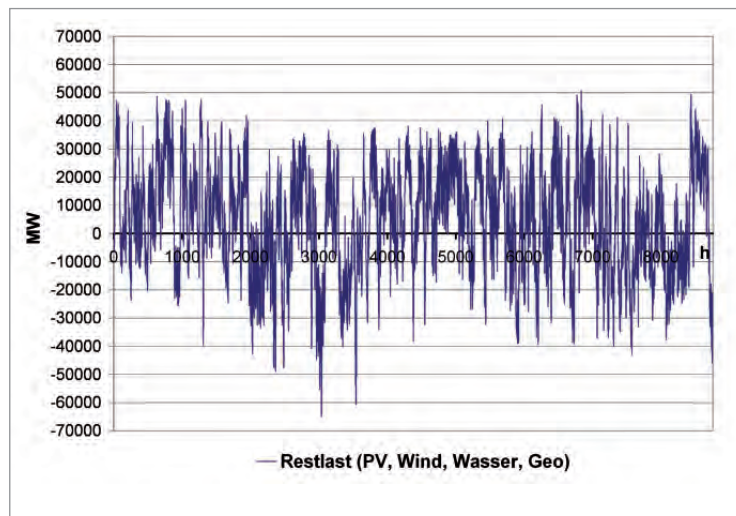
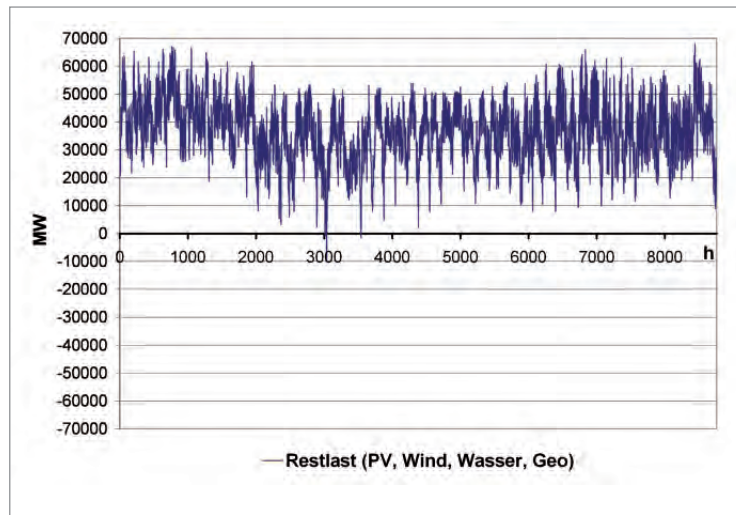


Abbildung 4



weise abgeschaltet, EE-Stromerzeuger abgeregelt oder die Restlast mit Hilfe von Lastmanagement- und Speicherkapazitäten geglättet werden.

Im Jahr 2050 treten auch nach Abzug der fluktuierenden erneuerbaren Stromerzeugung immer noch Lastspitzen mit bis zu 50 GW auf. Zusätzlich gibt es Zeiten, in denen die Einspeisung durch fluktuierende Erzeugungskapazitäten den Bedarf um mehr als 60 GW überschreitet.

Einen besseren Überblick über die Häufigkeit der Lastsituationen gibt eine sogenannte Dauerlinie der Restlast. Diese wird durch das Ordnen der Stundenmittelwerte der Restlast nach ihrer Höhe ermittelt. *Abbildung 5* zeigt die Dauerlinie für die oben abgebildete Restlastzeitreihe des Jahres 2050. An der Dauerlinie kann für eine jährliche Mindestlaufzeit die installierbare Kapazität eines Kraftwerks oder einer Kraftwerkskategorie abgelesen werden. So können z. B. Mittellastkraftwerke

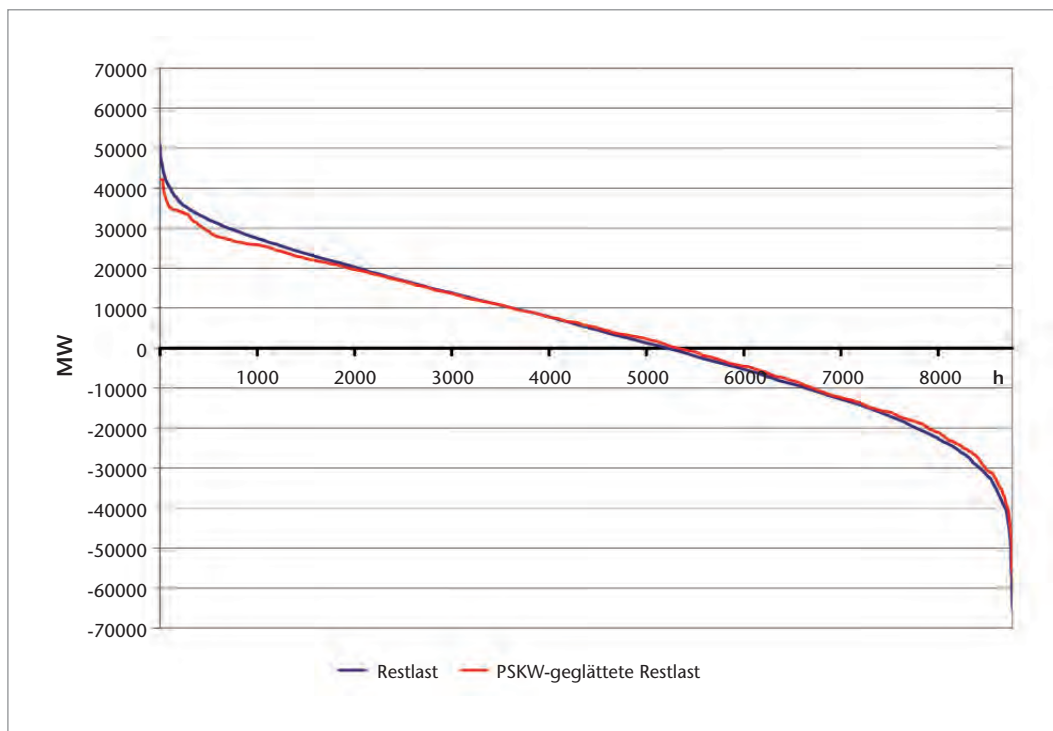


Abbildung 5

mit insgesamt ca. 20 GW Kapazität installiert werden, die 2000 Stunden oder länger in Volllast betrieben werden können. Typische Grundlastkraftwerke laufen heute 7000 Stunden und länger. Im Jahr 2050 gibt es ohne Lastverlagerungsmaßnahmen keinen entsprechenden Grundlastbetrieb mehr. Spitzenlastkraftwerke mit einer Kapazität von 31 GW können den Lastbereich zwischen 20 GW und der Restspitzenlast von ca. 51 GW decken.

In *Abbildung 5* ist zusätzlich die Dauerlinie der mit Hilfe von Pumpspeicherkraftwerken geglätteten Restlast eingezeichnet. Pumpspeicher sind typischerweise für den täglichen Ausgleich von Lastspitzen und Lasttälern ausgelegt. Für die Glättung wurde angenommen, dass im Jahr 2050 8,6 GW bidirektionale Pumpspeicherleistung mit einem für sechs Stunden Volllastbetrieb der Pumpen/Turbinen-Einheit ausgelegten Speicher in Deutschland installiert sind, dass die Jahresspitzenlast/der Jahresspitzenüberschuss vorrangig reduziert wird und dass ansonsten der Speicher immer dann entleert/befüllt wird, wenn die aktuelle Stundenmittellast die Tagesmittellast unterschreitet/überschreitet und der Speicherfüllstand es zulässt.

Entsprechend der Annahme, dass Pumpspeicherkraftwerke weiterhin als Kurzzeitspeicher ausgelegt werden, können sie über das ganze Jahr 2050 hinweg ihre Leistung von ca. 8,6 GW zur täglichen Lastglättung zur Verfügung stellen. Die benötigte Mittellastkapazität ändert sich dadurch nur geringfügig, die Spitzenlastkapazität kann aber um die Pumpspeicherleistung auf 42 GW reduziert werden. Auch die maximale Höhe der Überschussleistung wird entsprechend reduziert.

Die Dauerlinie zeigt, dass die Menge des Überschussstroms durch den Pumpspeichereinsatz kaum reduziert wird. Am Jahresverlauf der Restlast kann man sehen, dass neben den täglichen Lastschwankungen längerfristige Flauten und Überschussituationen auftreten. Um die Last entsprechend zu verlagern, sind Langzeitspeicher erforderlich, die größere Energiemengen speichern können als die Pumpspeicherwerke und zudem über eine größere Be- und Entladekapazität verfügen.

Im Basisszenario A der Leitstudie 2010 werden zunächst Import- und Exportmöglichkeiten in andere europäische und auch nordafrikanische Länder berücksichtigt. Es werden dann Lastmanagementoptionen genutzt (Elektromobilität, KWK oder Wärmepumpen mit verschiebbaren Wärme-

lasten) und Pumpspeicherkraftwerke eingesetzt. Die verbleibende Restlast wird mit noch bestehenden fossilen Kraftwerken gedeckt. Mit den dann noch verbleibenden Überschüssen wird mittels Elektrolyse Wasserstoff hergestellt, der im Verkehr als Treibstoff eingesetzt wird. Wasserstoff dient hier als Platzhalter und kann durch andere chemische Energieträger wie z. B. Methan ersetzt werden. Das erfordert zwar einen zusätzlichen Umwandlungsschritt, bietet aber den Vorteil, dass die Infrastruktur für Methan – das Erdgasnetz – bereits besteht und ohne Zusatzkosten als Speicher und für den Transport verwendet werden kann.

Wie eingangs diskutiert sind Speicher eine von mehreren Möglichkeiten, die sichere Stromversorgung bei zunehmenden Schwankungen der Stromerzeugung zu gewährleisten. Unterschiedliche Kriterien und Gewichtungen von Kriterien wie z. B. Importabhängigkeit, Kosten, Flächenverbrauch, gesundheitliche Auswirkungen von Energieanlagen und gesellschaftliche Akzeptanz führen zu verschiedenen Szenarien eines Stromversorgungssystems mit unterschiedlichem Speichereinsatz. Dieser sollte also immer im Zusammenhang mit dem Aufbau des gesamten Stromversorgungssystems und mit den zugrundeliegenden Kriterien ausgewiesen und bewertet werden.

## Quellen

- [1] BMU (2010). Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der Erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Umweltpolitik. BMU. Berlin.
- [2] BMWI (2010). Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. BMWI, EWI, GWS, Prognos.
- [3] Trieb, F. (2006). Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power. N. C. a. N. S. G. BMU (Federal Ministry for the Environment. Stuttgart, German Aerospace Center (DLR), Institute of Technical Thermodynamics, Section Systems Analysis and Technology Assessment.
- [4] UBA (2010). Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen. Umweltbundesamt. Dessau, Umweltbundesamt: 194.
- [5] SRU (2011). Wege zur 100 % Erneuerbaren Stromversorgung. S. f. Umweltfragen.
- [6] Scholz, Y. (2010). Möglichkeiten und Grenzen der Integration verschiedener regenerativer Energiequellen zu einer 100 % regenerativen Stromversorgung der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2050. Materialien zur Umweltforschung. SRU, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

# Prognosen der zeitlich-räumlichen Variabilität von Erneuerbaren

## Einleitung

Den höchsten Anteil an der Stromerzeugung in Deutschland sollen in Zukunft Windenergie und Photovoltaik erbringen. Beides sind wetterabhängige Erzeuger, deren Produktion nicht dem Verbrauch folgt, sondern durch das Wetter vorgegeben ist. Da trotzdem Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein müssen, muss die Anpassungsleistung von anderen Kraftwerken und von Speichern erbracht werden. Dazu muss die Variabilität der erzeugten Wind- und PV-Leistung in Zeit und Raum so genau wie möglich prognostiziert werden.

Außerdem werden in Zukunft auch die erneuerbaren, wetterabhängigen Erzeuger Systemdienstleistungen, wie z. B. Regenergie bereitstellen und Betriebsführung des Stromnetzes übernehmen müssen, für die ebenfalls Prognosen benötigt werden.

In diesem Beitrag wird zunächst der aktuelle Stand der operationellen Wind- und PV-Leistungsprognose mit der heute erreichten Prognosegüte dargestellt. Aus der Transformation des Energiesystems ergeben sich aber neue Anforderungen für die die Prognosen weiterentwickeln werden müssen.

## Wind-Leistungsprognose

Die Übertragungsnetzbetreiber benötigen für einen stabilen Netzbetrieb Aussagen über die aus Windenergie erzeugte Leistung. Dies beinhaltet sowohl die aktuelle Einspeisung, als auch Vorhersagen für die nächsten Stunden bzw. Tage.

Dabei wird von den einzelnen Regelzonen der Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) bzw. Gesamtdeutschland ausgegangen um die benötigte Regenergie zu bestimmen. Die Windleistungs-

prognosen werden daher für die einzelnen Regelzonen der ÜNB beziehungsweise Gesamtdeutschland erstellt.

Bei der Windleistungsvorhersage wird die Einspeisung von elektrischer Energie durch Windenergieanlagen in das elektrische Netz prognostiziert. Diese Prognose wird auf der Grundlage von Wettervorhersagen erstellt und hat einen Prognosehorizont von wenigen Stunden (Kurzfristprognose) bis zu mehreren Tagen (Folgetagsprognose).

Die Folgetagsprognose hat einen Prognosehorizont von bis zu 96 Stunden. Als Grundlage werden ein oder mehrere Wettermodelle genutzt, deren Prognosen von Windgeschwindigkeit und anderen meteorologischen Parametern verwendet werden. Aus diesen werden für den Standort eines Windparks mit Hilfe des Windleistungsprognosemodells Leistungswerte berechnet. Da die Windleistungsprognose direkt an das Wettermodell gekoppelt ist, hängt der Prognosehorizont und die Häufigkeit der Aktualisierung der Prognose vom Wettermodell ab.

Eine Vorhersage für eine größere Region bzw. Gesamtdeutschland wird mit Hilfe von Windleistungsprognosen mehrerer, über die Region verteilter, Windparks realisiert. Basierend auf einem Hochrechnungsalgorithmus, der die Verteilung der installierten Leistung aller Windparks in Deutschland kennt, kann aus den Leistungsvorhersagen der einzelnen Windparks eine Gesamtleistungsvorhersage für eine Region oder für Gesamtdeutschland berechnet werden.

Durch den zunehmenden täglichen Stromhandel gewinnen die Prognosen für kürzere Prognosehorizonte im Bereich von Stunden an Bedeutung. Hierzu werden sogenannte Kurzfristprognosemodelle verwendet (*Abbildung 1*).



**Fraunhofer IWES**

**Bernhard Lange**

bernhard.lange@iwes.fraunhofer.de

**Kurt Rohrig**

kurt.rohrig@iwes.fraunhofer.de

**Jan Dobschinski**

jan.dobschinski@iwes.fraunhofer.de

**Arne Wessel**

arne.wessel@iwes.fraunhofer.de

**Yves-Marie Saint-Drenan**

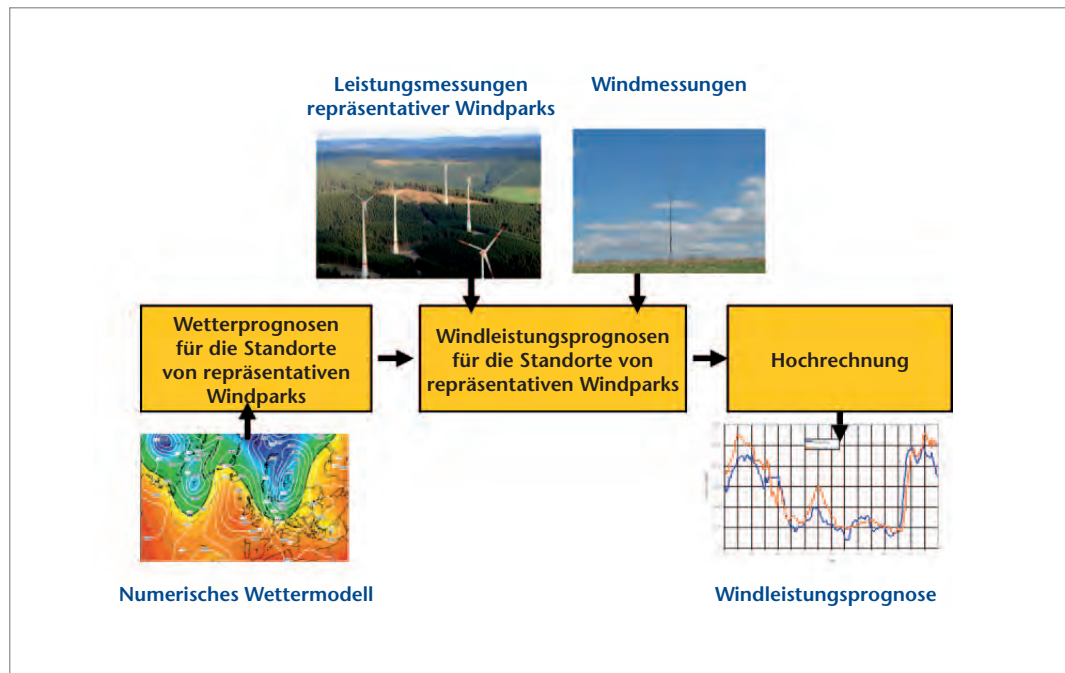
yves-marie.saint-drenan@iwes.fraunhofer.de

**ZSW**

**Martin Felder**

martin.felder@zsw-bw.de

Abbildung 1  
Schematische Darstellung der Modellkette der Windleistungsprognose für die Kurzfristprognose



Gegenüber der Folgetagsprognose nutzen diese Modelle zusätzlich zum Wettermodell auch aktuell gemessene Leistungswerte der Windparks und aktuell gemessene Winddaten, was den Vorteil hat, dass sie häufiger aktualisiert werden können (z. B. viertelstündlich), als die Folgetagsprognosen, deren Aktualisierung an das Wettermodell gekoppelt ist.

Eine weitere Qualitätssteigerung der Prognose kann durch ein für die Kurzzeitprognose entwickeltes Wettermodell wie das COSMO-DE des Deutschen Wetterdienstes (DWD) erzielt werden, welches alle drei Stunden aktualisiert wird, dafür aber nur einen Prognosehorizont von achtzehn Stunden hat.

## PV-Leistungsprognose

Mit der Zunahme der installierten PV-Kapazität in den letzten Jahren ist die Bedeutung der PV-Stromeinspeisung für den Netzbetrieb und den Energiehandel enorm gewachsen. Sowohl die Bestimmung der aktuellen Einspeisung, als auch Vorhersagen für die nächsten Stunden und Tage, sind unverzichtbare Bestandteile der täglichen Betriebsführung und des Energiehandels.

Aktuelle und vorhergesagte Einspeisungen werden für jede Viertelstunde bestimmt. Für den Bilanzausgleich und die EEG-Vermarktung wird die Prognose derzeit für ganz Deutschland und für die vier Regelzonen erstellt.

Da die PV-Einspeisung zum größten Teil in der Niederspannung stattfindet (97% der Anlagen Ende 2010), sind auch alle 850 Verteilnetzbetreiber (VNB) von der PV-Einspeisung betroffen. Daher ist es wichtig, dass das Verfahren zur Bestimmung der aktuellen bzw. zu erwartenden PV-Einspeisung auch für feine räumliche Auflösung eine gute Genauigkeit zeigt. Eine Nachrechnung der 15-minütigen PV-Einspeisung wird am Ende jedes Monats für alle VNB erstellt. Allerdings sind immer mehr Energieversorgungsunternehmen an der Bestimmung des Online-Ist-Wertes und an der PV-Prognose interessiert, um ihre Energieportfolio zu optimieren.

Die PV-Prognose wird auf der Grundlage von Wettervorhersagen erstellt und hat einen Prognosehorizont von einer Stunde bis zu mehreren Tagen. Als Grundlage werden ein oder mehrere Wettermodelle genutzt, deren Prognosen der direkten und diffusen horizontalen Einstrahlung, der Bodenalbbedo (Reflexion des Untergrunds), sowie der 2-Meter-Temperatur und anderen meteorologischen Parametern verwendet werden.

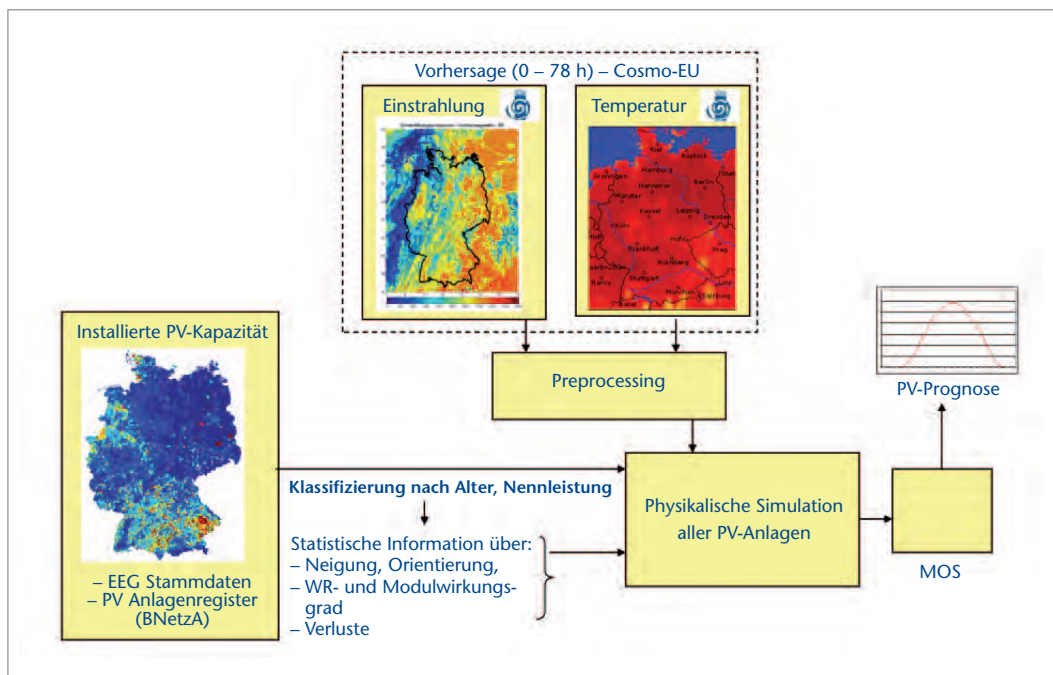


Abbildung 2  
Schematische Darstellung der Modellkette der PV-Prognose

Aufgrund der Anforderung, aktuelle Ist-Werte und Prognosen der PV-Einspeisung auch für kleine Gebiete zu erstellen, wo häufig nur wenig Daten vorhanden sind, wird ein anderer Algorithmus verwendet als für die Windleistungsprognose (siehe [Abbildung 2](#)). Dafür wird das Gebiet von Deutschland in ein feines Raster aufgeteilt (beliebige Auflösung bis zu wenigen Kilometern). Für jede Zelle dieses Rasters werden Einstrahlung, Temperatur und andere meteorologische Parameter bestimmt. Parallel dazu sind die installierte Kapazität sowie die Anlageneigenschaften (Modulorientierung, Art der Montage, Kennlinie ...) auf Basis der Stammdaten und einer statistischen Auswertung bekannt. Damit ist eine physikalische Simulation der PV-Einspeisung möglich.

## Prognosegüte

Das Wetter, und damit auch die wetterabhängige Einspeisung aus Wind und PV, lässt sich nicht berechnen, sondern nur mit einer gewissen Unsicherheit prognostizieren. Diese Unsicherheit nimmt mit dem Prognosehorizont zu, d. h., Prognosen für wenige Stunden im Voraus sind genauer als für mehrere Tage.

Ein weiterer wesentlicher Einflussfaktor bei der Güte der Leistungsprognose ist die Größe der

vorhergesagten Gebietes und die Anzahl und Größe der in der Vorhersage zusammengefassten Windparks oder PV-Anlagen. Je größer ein Gebiet ist und je mehr Anlagen zusammengefasst werden, desto stärker gleichen sich die räumlich und zeitlich variablen Prognosefehler aus und desto kleiner wird entsprechend der Gesamtfehler.

Als Fehlermaß hat sich für die Leistungsprognosen der mittlere quadratische Fehler (engl. Root Mean Squared Error = RMSE) durchgesetzt, der üblicherweise in Prozent der installierten Leistung angegeben wird.

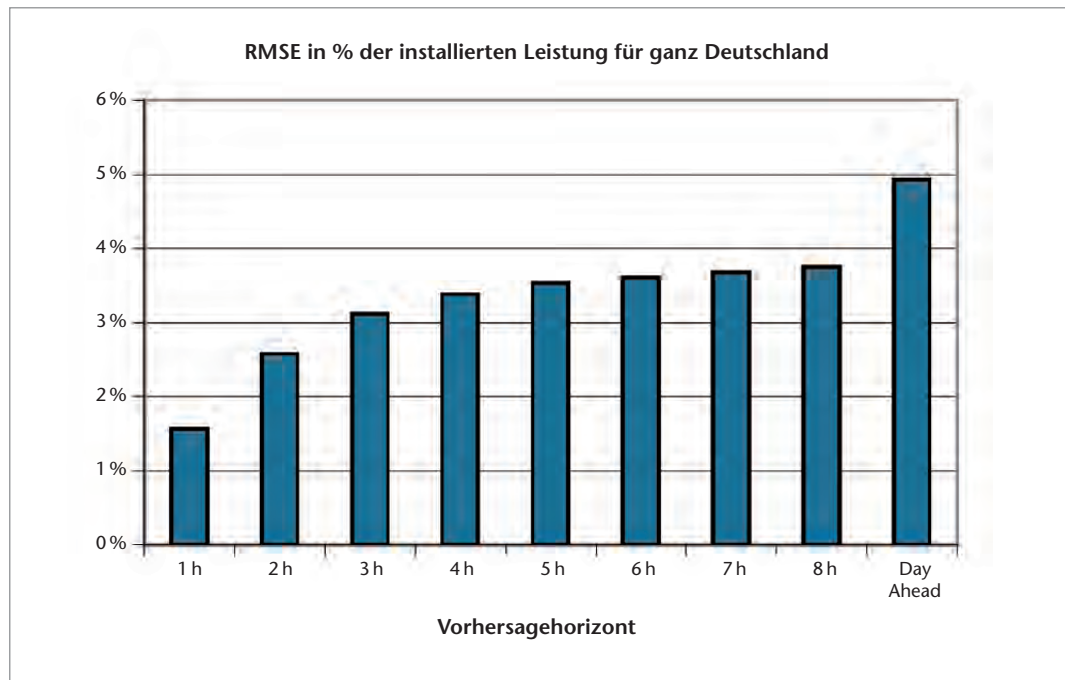
Aus den beschriebenen Abhängigkeiten folgt, dass die Güte eines Prognosesystems immer nur quantifiziert werden kann

- für einen bestimmten Prognosehorizont,
- für ein bestimmtes Gebiet mit der darin installierten Leistung und
- in Bezug auf einem bestimmten Zeitraum.

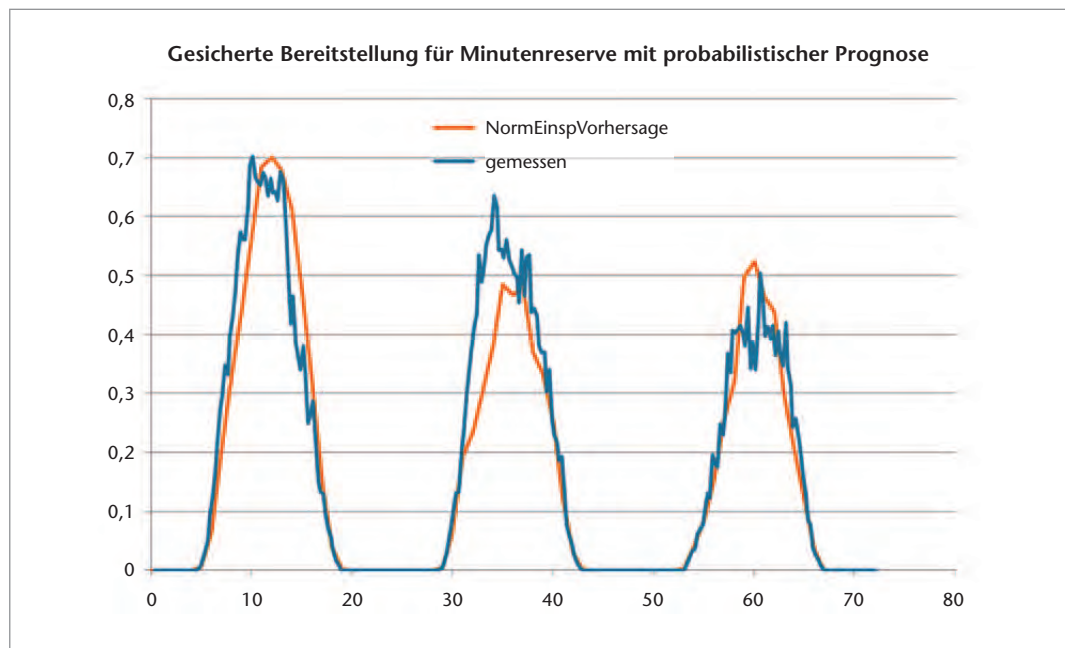
Dies muss insbesondere bei Vergleichen von Systemen berücksichtigt werden. Für die Windleistungsprognose zeigt [Abbildung 3](#) typische Prognosefehler für die in Deutschland eingespeiste Leistung.

Für eine Kurzfristprognose mit einem Vorhersagehorizont von 1 bis 8 Stunden liegt der RMSE bei ca. 1,5 bis 3,5 % der installierten Leistung. Für die

**Abbildung 3**  
Prognosefehler (RMSE) der in Deutschland eingespeisten Windleistung in Prozent der installierten Leistung in Abhängigkeit vom Vorhersagehorizont



**Abbildung 4**  
Normierte Ist-Wert und Prognose der PV-Einspeisung Deutschlands für drei exemplarische Tage



sogenannte Folgetagsprognose, die morgens um ca. 8 Uhr für den gesamten folgenden Tag erstellt wird, liegt der RMSE bei ca. 5 % der installierten Leistung. Da die mittlere eingespeiste Leistung bei der Windenergie in Deutschland nur ca. 20 % der installierten Leistung beträgt, liegt der RMSE bezogen auf die mittlere eingespeiste Leistung daher bei der Folgetagsprognose bei ca. 25%. Außerdem muss beachtet werden, dass die Häufigkeitsverteilung von Prognosefehlern nicht

normalverteilt ist, sondern große Prognosefehler erheblich häufiger vorkommen [4]. Für die Folgetagsprognose der PV-Einspeisung Deutschlands liegt der RMSE bei ca. 6–7 % der installierten Leistung. Dabei werden nur Tageswerte betrachtet, da die Einspeisung in der Nacht gleich null ist und somit ist der Prognosefehler ebenso null. *Abbildung 4* zeigt für drei exemplarische Tage die Ist-Einspeisung und die Prognose der PV-Einspeisung Deutschlands.

Für die PV-Einspeisung ist die Prognose der Einstrahlung von höchster Bedeutung. Die auf dem Boden einfallende Solareinstrahlung ist aber aus mehreren Gründen schwer vorherzusagen. Die räumliche und zeitliche Variabilität ist sehr hoch: von einem 15-Minuten-Zeitschritt zum nächsten oder von einem Standort zum nächsten variiert die PV-Leistung häufig um 90 % ihres Nennwertes. Die Betrachtung größerer Gebiete reduziert diese Variabilität aufgrund des Ausgleicheffekts nicht korrelierter Fluktuationen. Die meteorologischen Prozesse der Entstehung und Auflösung von Wolken sind schwer modellierbar. Die vertikalen Bewegungen der Luft sind ebenso wichtig für die Wolkenvorhersage und schwer vorherzusagen, insbesondere die Konvektion (Kumulus/ Quellwolken).

## Anforderungen an Prognosen für die Transformation

Die Energieversorgung wird in Zukunft wesentlich größere Anteile wetterabhängiger Energiequellen beinhalten. Allein die dadurch absolut ansteigende Leistung wird die Anforderungen an die Genauigkeit der Prognosen erhöhen. Ein höherer Anteil wetterabhängiger Erzeugung bedeutet gleichzeitig, dass im Gegenzug der Anteil steuerbarer Erzeugung, der Prognosefehler einfach ausgleichen kann, sinkt. Dies wird die Anforderungen an die Prognosegenauigkeit weiter erhöhen. Teilweise wird der Ausgleich durch Speicher erfolgen, für deren Einsatzplanung ebenfalls Prognosen benötigt werden.

Schon bei einem relativ geringen Anteil wetterabhängiger Erzeugung an der durchschnittlichen Stromproduktion wird es Zeiten geben, in denen die wetterabhängige Erzeugung den Verbrauch komplett decken kann. Dabei müssen auch die Systemdienstleistungen durch wetterabhängige Erzeugung geleistet werden. Zu den Prognosen der erzeugten Leistung werden dann Prognosen für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen benötigt.

Auch für die Betriebsführung des Stromnetzes werden in Zukunft Prognosen der wetterabhängigen Erzeugung unabdingbar sein. Wenn ein Großteil oder sogar die gesamte Produktion aus

wetterabhängigen Quellen kommt, müssen diese – zusammen mit ihren Unsicherheiten – in die Netzbetriebsführung eingehen, z. B. für Verbrauchsberechnungen.

Diese unterschiedlichen Anwendungen von Prognosen bringen unterschiedliche Anforderungen mit sich. Für die Marktintegration bzw. die Kraftwerkseinsatzplanung der steuerbaren Kraftwerke und Speicher ist vor allem eine hohe Genauigkeit der Prognosen ausschlaggebend. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf der Reduzierung der extremen Fehler, da diese die für Prognosefehler vorzuhaltende Reserveleistung bestimmen. Für die Integration in den Strommarkt und die Einsatzplanung der unterschiedlich schnell steuerbaren konventionellen Kraftwerke werden sowohl eine Folgetagsprognose als auch eine Kurzfristprognose verwendet, wobei der Prognosefehler der Kurzfristprognose für die Reservebereitstellung entscheidend ist. Für die Planung von Energiespeichern werden darüber hinaus mittel- und langfristige Energieprognosen (Tage – Monate) benötigt.

Für die Bestimmung von Regelenergiebedarf und Regelenergiebereitstellung werden Prognosen benötigt, die nicht nur eine Prognose der wahrscheinlichsten Stromproduktion beinhalten, sondern zusätzlich die Wahrscheinlichkeit von Abweichungen quantifiziert. Insbesondere wenn die Reserveleistung und Regelenergie von wetterabhängigen Erzeugern bereitgestellt wird, sind solche Prognosen unabdingbar. Solche probabilistischen Prognosen (Wahrscheinlichkeitsvorhersagen) sind aus Gründen der Netzsicherheit auch für Fragestellungen der Netzbetriebsführung erforderlich, weil das Stromnetz nicht nur im wahrscheinlichsten Fall, sondern auch in sehr unwahrscheinlichen Fällen der wetterabhängigen Produktion stabil bleiben soll. Beim Stromnetz kommt es dabei nicht nur auf den zeitlichen Verlauf der Produktion an, sondern auch auf die räumliche Verteilung, d. h., nicht nur wann, sondern auch wo ins Netz eingespeist wird. Dazu werden Prognosen gebraucht, die für jeden Knoten des betrachteten Stromnetzes die eingespeiste Leistung vorhersagen.

Das Wetter, auf dem die Stromerzeugung der Zukunft zu einem großen Teil beruhen wird, ist ein chaotisches System, bei dem extreme Zustände



vorkommen können. Für solche extremen Wetterereignisse wird ein Warnsystem nötig sein, um rechtzeitig Maßnahmen zur Sicherheit der Stromversorgung treffen zu können.

Als ein Beispiel für die Forschung und Entwicklung von Prognosesystemen für die zukünftigen Anforderungen wird im Folgenden näher auf die probabilistische Prognose eingegangen.

## Probabilistische Prognosen

Im Hinblick auf die Direktvermarktung von EE-Strom und die Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch Wind und PV einerseits, aber auch hinsichtlich neuer Warnsysteme für eine sichere Netzintegration bei wachsenden Anteilen wetterabhängiger Erzeuger, weisen die derzeit verfügbaren (deterministischen) Leistungsprognosen deutliche Informationsdefizite auf.

Aber mit Hilfe probabilistischer Leistungsvorhersagen kann man Informationen über die Eintrittswahrscheinlichkeit von relevanten Ereignissen für die Netzintegration und Netzsicherheit bereitstellen. Die Vorhersage von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ermöglicht erstmals professionelle Anwendungen von Entscheidungsfindungsprozessen wie beispielsweise Risikomanagement für Handelsaktivitäten an den Strombörsen oder optimierte Angebotsstrategien für die Bereitstellung

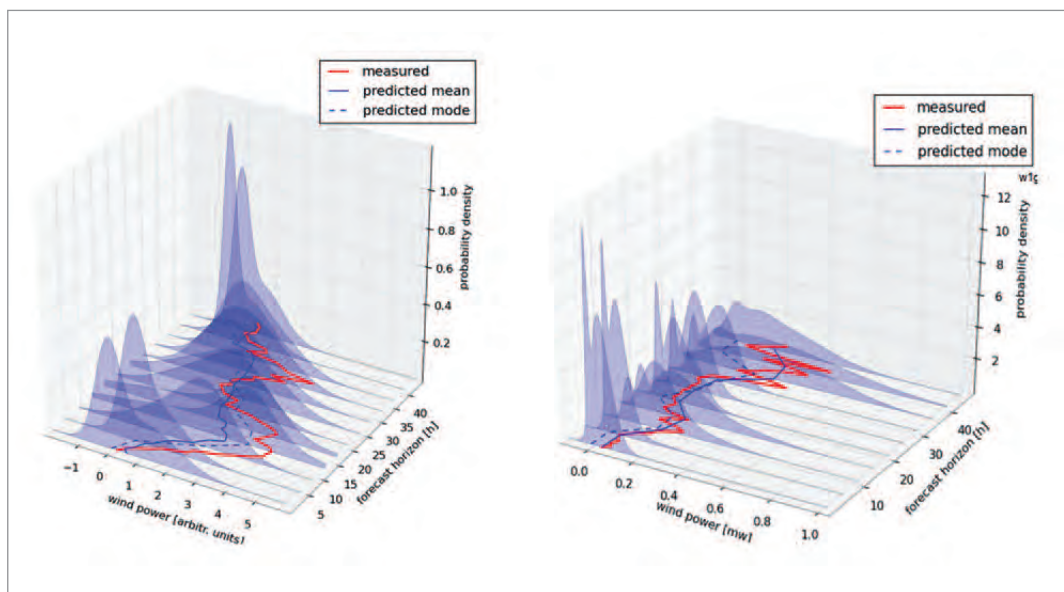
von Reserveleistung im Rahmen der Systemdienstleistungen.

Im Folgenden werden zwei Ansätze zur Erstellung von probabilistischen Prognosen vorgestellt, welche prinzipiell durch die zugrunde liegenden Wetterprognosesysteme bedingt sind. Desweiteren werden Ergebnisse bezüglich der Bereitstellung von Regelleistung als Anwendungsbeispiel gezeigt.

## Anwendung von Data-Mining Methoden auf die Prognosen eines einzelnen Wettermodells

Wenn nur ein Wettermodell zur Verfügung steht, können die Unsicherheiten einer Prognose anhand historischer Daten erlernt werden. Hierzu erhält ein statistisches Prognoseverfahren wie z. B. ein neuronales Netz als Trainings-Zielwert nicht wie üblich die tatsächlich gemessene Leistung. Es sagt stattdessen eine Kombination mehrerer parametrisierter Wahrscheinlichkeitsverteilungen vorher, deren Mischungsverhältnis und Parameter mittels einschlägiger Algorithmen erlernt werden. Diese sogenannten Mischdichtemodelle eröffnen die Möglichkeit, multimodale Wahrscheinlichkeiten zu beschreiben [2], wie sie insbesondere bei speziellen Wetterlagen oder niedrigen Windgeschwindigkeiten auftreten. In *Abbildung 5* sind zwei entsprechende Vorhersageläufe dargestellt. Man erkennt deutlich, wie die Wahrscheinlichkeitsdichte bei sehr niedrigen Werten ein ausgeprägtes, spitzes Maximum bei Null bildet. Das

**Abbildung 5**  
Vorhersageläufe einzelner WEAs mit modellierter Wahrscheinlichkeitsdichte (Z-Achse), hier bestehend aus der Mischung zweier Normalverteilungen. In diesem Zusammenhang ist „mean“ der Erwartungswert der Verteilung, während „mode“ den wahrscheinlichsten Wert (Modalwert) bezeichnet.



neuronale Netz ist sich hier somit nicht sicher, ob die bei allen Anlagen gegebene Anlauf-Windgeschwindigkeit überhaupt erreicht wird. Wenn sie erreicht wird, ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung gemäß der breiteren Glockenkurve. Interessant ist auch, dass in diesen wie auch in anderen Beispielen der Modalwert häufig näher an dem tatsächlich gemessenen Wert liegt als der Mittelwert. Dies deutet darauf hin, dass die häufig vorgestellte Annahme eines normalverteilten Fehlers für die Vorhersage in vielen Fällen nicht zutrifft, was mit der Begrenzung des Wertebereichs der Einspeisung auf das Intervall von Null bis zur Nennleistung zusammenhängt.

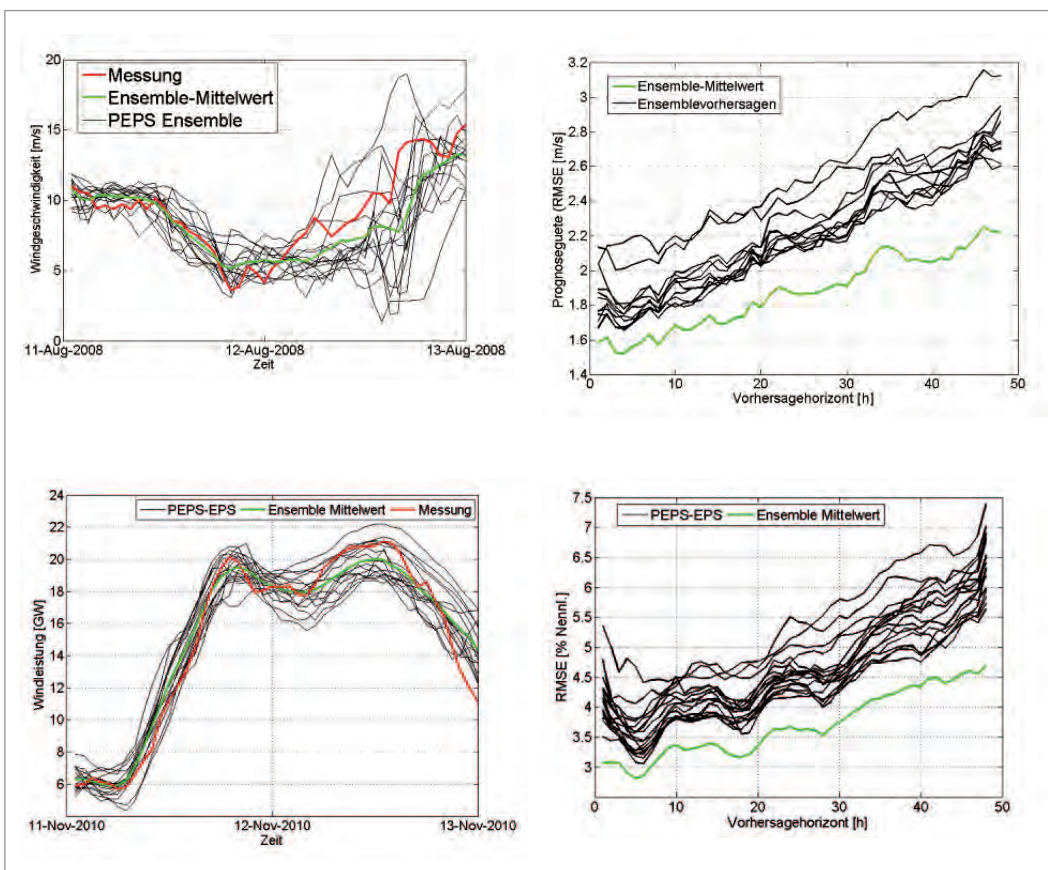
### Anwendung von Ensembleprognosesystemen

Bei Ensembleprognosesystemen (EPS) handelt es sich um ein System aus verschiedenen teilweise nicht unterscheidbaren Wetterprognosen, welches für den betrachteten Zeithorizont mehrere Prognosewerte und somit eine stichprobenhafte Schätzung der Vorhersagestatistik liefert (vgl. *Abbildung 6*, links). EPS basieren einerseits auf meh-

renen Läufen des gleichen Wettermodells, dessen Rand- und Anfangsbedingungen gezielt variiert bzw. gestört werden oder dessen physikalische Beschreibung der atmosphärischen Prozesse modifiziert wird. Andererseits gibt es „Multi-Model-EPS“, die – wie der Name bereits andeutet – aus „Numerischen Wettervorhersagen“ (NWV) mehrerer unterschiedlicher Wettermodelle und Wetterprognoseanbieter bestehen.

Frühere Studien haben bereits gezeigt, dass einfache Kombinationen mehrerer Wetterprognosen, wie beispielsweise der EPS-Mittelwert, zu einer enormen Qualitätssteigerung der Windgeschwindigkeits- und letztendlich auch der Windleistungsprognose führen kann (siehe *Abbildung 6*) [1].

Weiterhin gibt die Streuung von EPS-Prognosen an einem Vorhersagezeitpunkt zusätzlich Auskunft über die Unsicherheit der Prognose bzw. über die Prognostizierbarkeit der vorliegenden Wettersituation, welche erfolgreich zur Erstellung probabilistischer Produkte genutzt werden kann. Wichtig



**Abbildung 6**

Links: Windgeschwindigkeits- und Leistungsprognosen des Multi-Model-EPS PEPS [3] und die resultierende Ensemble-Mittelwert-Vorhersage der Offshore Forschungsplattform FINO 1 (oben) und der gesamtdeutschen Windenergieeinspeisung (unten).

Rechts: RMSE der PEPS-Windgeschwindigkeitsprognosen im Zeitraum 2007 bis 2009 [1] (oben) und der PEPS-basierten Prognosen der gesamtdeutschen Windenergieeinspeisung in 2010 (unten).

ist, die so gewonnenen probabilistischen Prognosen hinsichtlich ihrer Vertraulichkeit bzw. Zuverlässigkeit zu untersuchen. Das heißt, wenn ein Ereignis mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % vorhergesagt wird, dann sollte dieses Ereignis auch im Mittel in neun von zehn Fällen eintreten. Falls dies nicht gewährleistet ist, dann muss eine zusätzliche Kalibrierung der probabilistischen Prognose durchgeführt werden [1].

### Regelleistungsbereitstellung als Anwendungsbeispiel probabilistischer Prognosen

In Deutschland wird derzeit das Regelleistungserzeugnis der Minutenreserve arbeitstäglich für den Folgetag bzw. das ganze Wochenende oder über die Feiertage ausgeschrieben. Dies erlaubt prinzipiell auch eine Bereitstellung durch Windenergie, was jedoch bisher operationell nicht umgesetzt wird. Im Hinblick auf den kontinuierlichen Ausbau der erneuerbaren Energien und den dadurch wachsenden Anteilen von EE-Erzeugern am deutschen Strommix, müssen die EE-Erzeuger und besonders die Windenergie jedoch zukünftig zwangsläufig zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen beitragen. Um mit Windenergie Regelleistung bereitstellen zu können, müssen nicht

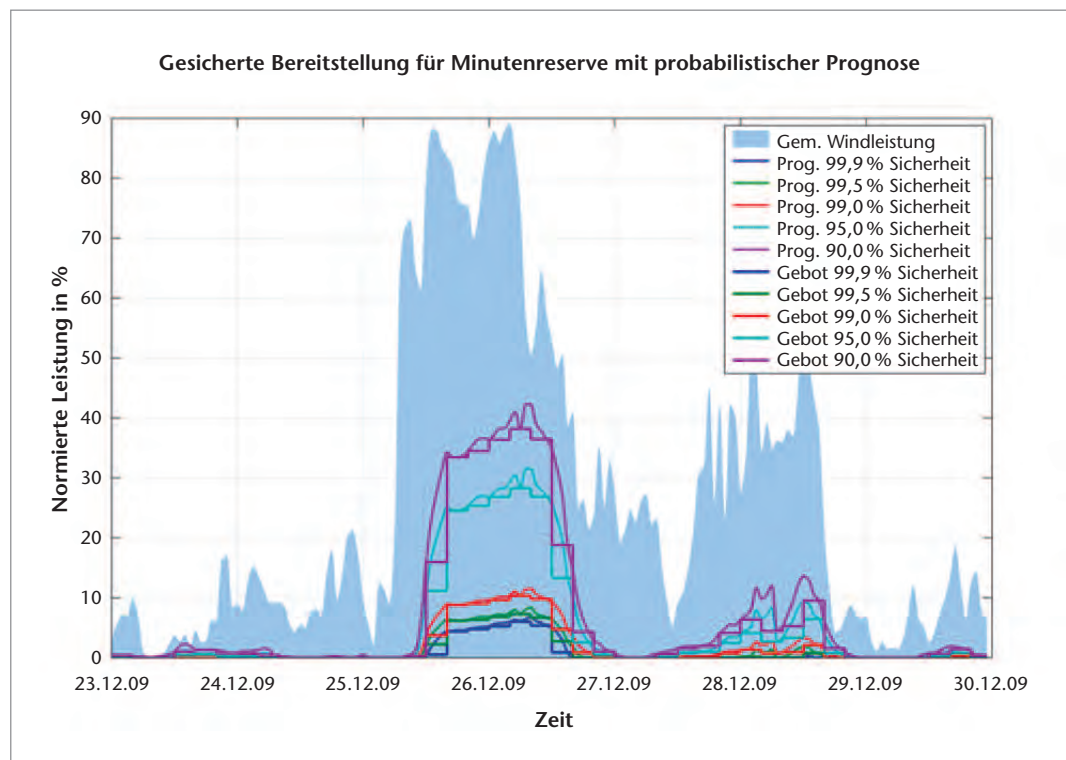
nur zuverlässige Prognosen der zu erwarteten Einspeisung vorliegen, sondern auch Strategien entwickelt werden, welche eine wirtschaftliche Optimierung der Angebotsabgabe ermöglichen.

Um diese Herausforderungen bewältigen zu können, sind probabilistische Prognosen unabdingbar. Wie in *Abbildung 7* gezeigt, erlauben zuverlässige probabilistische Prognosen eine Angebotsabgabe von Reserveleistung, welche zum Abrufzeitpunkt mit einer vorher definierten Sicherheit vorhanden sein wird. Es ist jedoch offensichtlich, dass mit steigender Sicherheit das Angebotsvolumen und folglich die Einnahmen sinken, was somit ein adäquates Risikomanagement voraussetzt.

## Zukünftige Herausforderungen

Bei der Forschung und Entwicklung von Prognosen wetterabhängiger Erzeugung werden sehr große Anstrengungen nötig sein, um die oben beschriebenen Anforderungen erfüllen zu können. Übergreifendes Thema ist die generelle Verbesserung der Prognosegüte von Wind- und PV-Prognosen. Ein wichtiger Ansatzpunkt hierzu ist die

**Abbildung 7**  
Beispiel einer potenziellen Angebotsabgabe für die Bereitstellung von Minutenreserve durch Windenergie basierend auf probabilistischen Prognosen und der Angabe von Sicherheitsniveaus. Das Angebot für das anzubietende 4h-Zeitfenster basiert auf dem Minimalwert der probabilistischen Prognose bei gewünschtem Sicherheitsniveau.



Integration von Wetterprognosen, Leistungsprognosen und Online-Messdaten in einem System, das gemeinsam optimiert werden kann. Momentan erfolgen diese Schritte noch nacheinander und werden jeweils einzeln optimiert.

Prognosen wetterabhängiger Stromerzeugung werden immer mit einer Unsicherheit behaftet sein. Diese Tatsache sollte in Zukunft akzeptiert und in allen Aspekten des Energieversorgungssystems berücksichtigt werden. Probabilistische Prognosen bieten die Möglichkeit, die Unsicherheiten zu quantifizieren und damit in Planung und Betrieb handhabbar zu machen.

Besondere Berücksichtigung sollte extremen Wetterereignissen zuteilwerden, da sie bei einer Stromproduktion, die überwiegend oder nur durch wetterabhängige Erzeuger gedeckt wird, die Versorgungssicherheit gefährden können. Dafür müssen entsprechende Warnsysteme entwickelt werden.

## Zusammenfassung

Der wirtschaftliche und sichere Betrieb eines zukünftigen nachhaltigen Energieversorgungssystems stellt neue Anforderungen an die Prognosen des wetterabhängig eingespeisten Stroms aus Wind und Photovoltaik (PV) im Bereich der jeweils nächsten Stunden und Tage. Wind- und PV-Leistungsprognosen sind bereits heute unverzichtbarer Bestandteil der Integration Erneuerbarer in das Energieversorgungssystem.

In Zukunft wird der wachsende Anteil wetterabhängiger Erzeugung die Bedeutung der Prognosen weiter erhöhen. Gleichzeitig werden zu Zeiten mit hoher Wind- und PV-Leistung weniger steuerbare Kraftwerke am Netz sein, was den Einsatz von Prognosen in allen wichtigen Bereichen der Marktintegration und der Netzbetriebsführung erfordert. Dabei werden Prognosen für verschiedene Aufgaben benötigt, die mit unterschiedlichen Anforderungen einhergehen. Eine der Herausforderungen für die Forschung ist, mit einer deutlichen Leistungssteigerung der Prognose-systeme sicher zu stellen, dass die benötigte Reserveleistung nicht weiter ansteigt.

Neben einer umfassenden Verringerung der Prognoseunsicherheiten müssen weitere Anforderungen, z. B. nach hoher räumlicher Auflösung und der Reduzierung von Maximalfehlern angemeldet werden.

## Literatur

- [1] Dobschinski et al.: "Visualizing and optimizing the reliability of ensemble prediction systems", Proceedings of the European Wind Energy Conference, Brussels, 2011
- [2] Felder, Martin, Anton Kaifel, und Alex Graves. 2010. Wind Power Prediction using Mixture Density Recurrent Neural Networks. Poster Presentation gehalten auf der European Wind Energy Conference 2010 (EWEC 2010), Warsaw, Poland.
- [3] Heizenreder et al.: „SRNWP-PEPS A regional multi-model ensemble in Europe“, The European Forecaster, No.11, p. 29-36, 2006
- [4] Lange, B., Ü. Cali, R. Jursa, R. Mackensen, K. Rohrig, F. Schlögl: Strategies for Balancing Wind Power in Germany. DEWEK 2006, Bremen, November 2006

## ■ Transformationsprozesse und Strukturwandel im Energiesystem

- Smart Grids – Transformation unserer elektrischen Energieversorgung
- Modellregionen für intelligent vernetzte Energiesysteme
- Städte und Quartierskonzepte – Modellstädte



**Fraunhofer ISE**  
 Dr. Günther Ebert  
 guenther.ebert@ise.fraunhofer.de

**Bernhard Wille-Haussmann**  
 bernhard.wille-haussmann@ise.fraunhofer.de

**Dr. Christof Wittwer**  
 christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

**ZSW**  
 Dr. Jann Binder  
 jann.binder@zsw-bw.de

**DLR**  
 Diego Luca de Tena  
 diego.lucadetena@dlr.de

**Fraunhofer IWES**  
 Dr. Martin Braun  
 martin.braun@iwes.fraunhofer.de

**Reinhard Mackensen**  
 reinhard.mackensen@iwes.fraunhofer.de

**IZES**  
 Guillem Tänzer  
 taenzer@izes.de

*Abbildung 1*  
 Anteile verschiedener erneuerbarer Energiearten an der Stromerzeugung in Deutschland (Quelle: BMU)

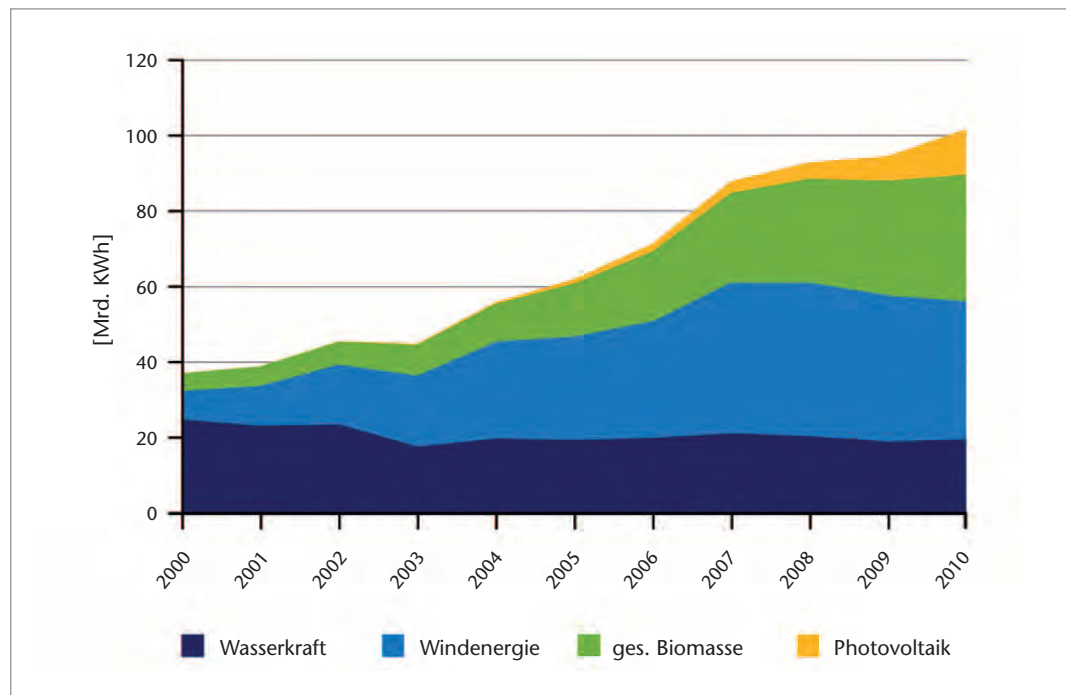
# Smart Grids – Transformation unserer elektrischen Energieversorgung

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien hat laut Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) im ersten Halbjahr 2011 erstmals die 20%-Marke überschritten. Eine gute Nachricht für Politik und Bevölkerung in Deutschland. Beide haben die weitgehende oder sogar vollständige Deckung des Energiebedarfs aus erneuerbaren Energien zum Ziel. Erneuerbare Energien stehen dauerhaft zur Verfügung, machen uns von Energieimporten unabhängig, führen zu stabilen und berechenbaren Energiepreisen, schützen das Klima und tragen zur Wertschöpfung im Inland bei. Dabei haben die erneuerbaren Energien bereits eine beachtliche Entwicklung hinter sich wie aus *Abbildung 1* hervorgeht, in der die Beiträge der einzelnen erneuerbaren Energiearten zur heutigen Stromerzeugung dargestellt sind.

Besonders deutlich wird der Beitrag von Wind und Photovoltaik aus *Abbildung 2*, die die Zusammensetzung der Stromerzeugung in einer Woche

im Mai 2011 zeigt. Vor allem die Photovoltaik sorgt dafür, dass ein Großteil der Mittagsbedarfs-spitze durch erneuerbare Energien gedeckt wird, was einen stark dämpfenden Einfluss auf die Strompreise an der EEX-Börse (European Energy Exchange) hat.

Im Oktober 2010 beschloss die Bundesregierung ein Energiekonzept, das einen Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 35 % im Jahr 2020 vorsieht, der bis zum Jahr 2050 auf 80% steigen soll. Nach der Atomkatastrophe in Fukushima und dem Beschluss aus der Atomenergie gänzlich auszusteigen, soll der Umbau nun beschleunigt werden. Viele Forschungsinstitute halten 100 % Strom aus erneuerbaren Energien bis 2050 für möglich. Hauptpfeiler der Stromversorgung wird bis dahin die Windenergie sein, gefolgt von der Photovoltaik und der Biomasse. Der optimale Energiemix für die Zeit nach 2020 ist derzeit Gegenstand intensiver Untersuchungen. In *Abbildung 3* sind exemplarisch einige der



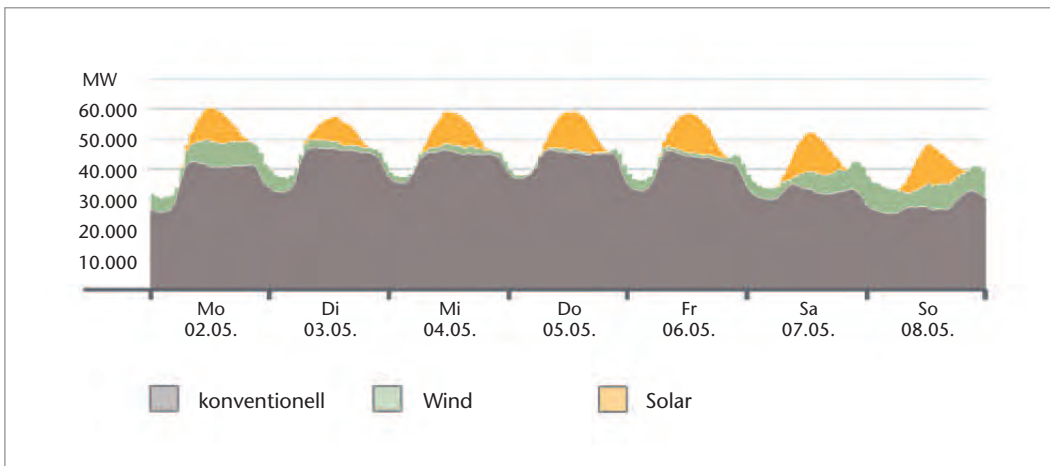


Abbildung 2  
Lastgangkurve in einer Woche im Mai 2011 und deren Deckung durch Stromerzeugung aus Photovoltaik, Windkraft und anderen Energien (Quelle: EEX)

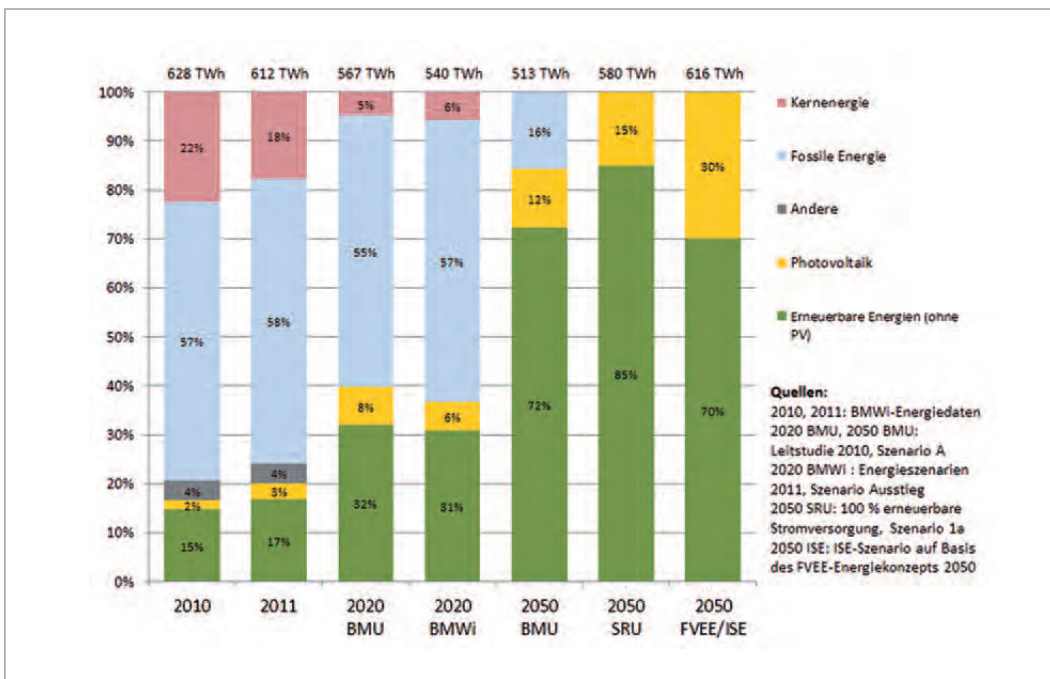


Abbildung 3  
Anteile der Energiequellen an der deutschen Stromproduktion (in %)

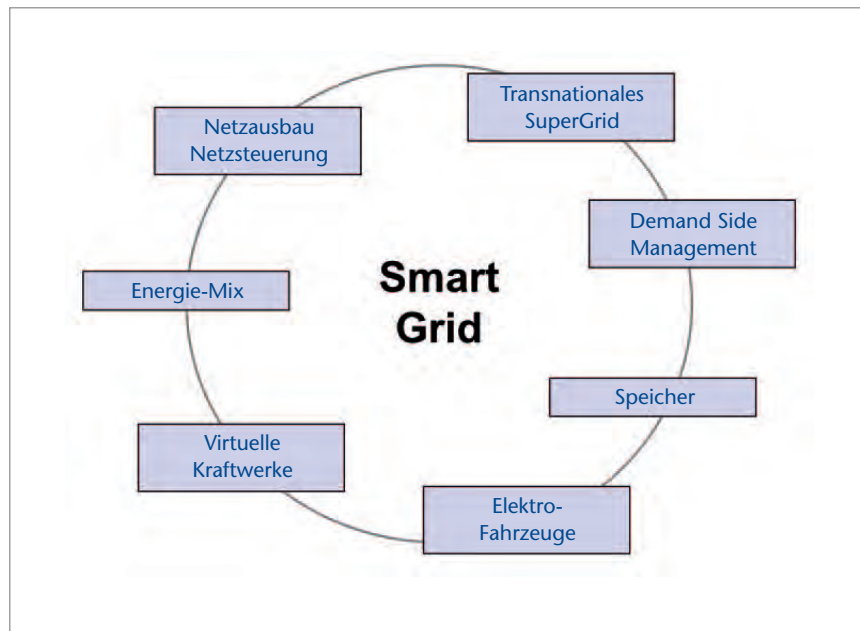
zahlreichen Szenarien aus diversen Studien zur zukünftigen Energieversorgung dem Ist-Stand 2010 gegenübergestellt.

Deutlich erkennbar sind vor allem die Unterschiede in den Anteilen der verschiedenen Arten der erneuerbaren Energien. Vor allem die Photovoltaik wird in den verschiedenen Studien ganz unterschiedlich bewertet. Dies dürfte nicht zuletzt an den Annahmen über die technische Machbarkeit oder die zukünftige Entwicklung der Kosten liegen.

Dennoch weisen alle Szenarien darauf hin, dass im Jahr 2050 fluktuierende Energiearten den weitestgehend größten Anteil an der Stromerzeugung haben

werden. Im Extremfall (FVEE/ISE-Szenario, siehe Abb. 3) stehen dann 200 GW installierter Leistung einem Bedarf von 40 bis 80 GW gegenüber. Aktuelle Erzeugung und aktueller Verbrauch würden ohne Ausgleichsmaßnahmen in einem Missverhältnis stehen. Hinzu kommt, dass die Erzeugung, die bisher von rotierenden Generatoren dominiert wird und zukünftig von vielen kleineren und mittleren, weit verteilten Erzeugern übernommen wird, sich völlig verändert. Netzinstabilitäten könnten die Folge sein. Und der Wandel hat zur Folge, dass die heutigen Stromnetze nicht mehr zur zukünftigen Erzeugerstruktur passen und erheblich um- und ausgebaut werden müssen.

Abbildung 4  
Elemente des Smart  
Grids



Um dennoch auch künftig eine stabile Stromversorgung zu realisieren, sind deshalb zum Ausbau erneuerbarer Energien begleitende Maßnahmen nötig, die der Veränderung in der Struktur der Stromerzeugung Rechnung tragen. Dabei besteht die Lösung aus einer ganzen Reihe von Maßnahmen:

- Netzausbau
- kommunikative Aufrüstung der Netze
- Steuerung stromverbrauchender Geräte
- Installation von elektrischen Speichern

Einige dieser Elemente sind in *Abbildung 4* dargestellt. Zentraler Dreh- und Angelpunkt ist das Stromnetz, das zukünftig nicht länger nur Strom überträgt, sondern auch der intensiven Kommunikation zwischen Erzeugern, Verbrauchern, stationären Speichern, mobilen Speichern wie Elektrofahrzeugen und dem Stromkunden dient. Das Stromnetz wird also intelligent und wird zum „Smart Grid“.

Die wichtigsten Aspekte dieses Umbaus unserer Stromversorgung sollen im Folgenden erörtert werden.

## Der Weg zur Vollversorgung mit Erneuerbaren führt über einen moderaten Netzausbau

Unsere heutigen Stromnetze sind für die Erzeugung mit wenigen großen Kraftwerken ausgelegt. Der Umbau hin zur Vollversorgung mit erneuerbaren Energien hat starke Änderungen in der Erzeugungsstruktur zur Folge. So liegen die Standorte von Windkraftanlagen vorwiegend in Norddeutschland. Hinzu kommt der geplante massive Ausbau der Off-Shore-Windenergie, der diese norddeutsche Konzentration weiter verstärken wird. Dies erfordert einen signifikanten Ausbau der Stromnetze, um die Energie in die Ballungszentren im Westen und Süden des Landes zu transportieren. In der DENA-Netzstudie II<sup>1</sup> wird der nötige Ausbau des Transportnetzes bereits für das Jahr 2020 auf etwa 3.600 km an Hoch- und Höchstspannungsleitungen geschätzt, was im Wesentlichen dem Zubau der Windkraft geschuldet ist. Durch den massiven Ausbau der Photovoltaik, wird aber auch ein zusätzlicher Ausbauswerpunkt im Bereich der Mittel- und Niederspannungsnetze notwendig. Unter Zugrundelegung des BMU-Leitszenarios 2010<sup>2</sup>,

1 [www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Download/Dokumente/Studien\\_\\_\\_Umfragen/Endbericht\\_dena-Netzstudie\\_II.PDF](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Studien___Umfragen/Endbericht_dena-Netzstudie_II.PDF)  
2 [www.fvee.de/publikationen/publikation/download/10-bmu-leitstudie2010/](http://www.fvee.de/publikationen/publikation/download/10-bmu-leitstudie2010/)



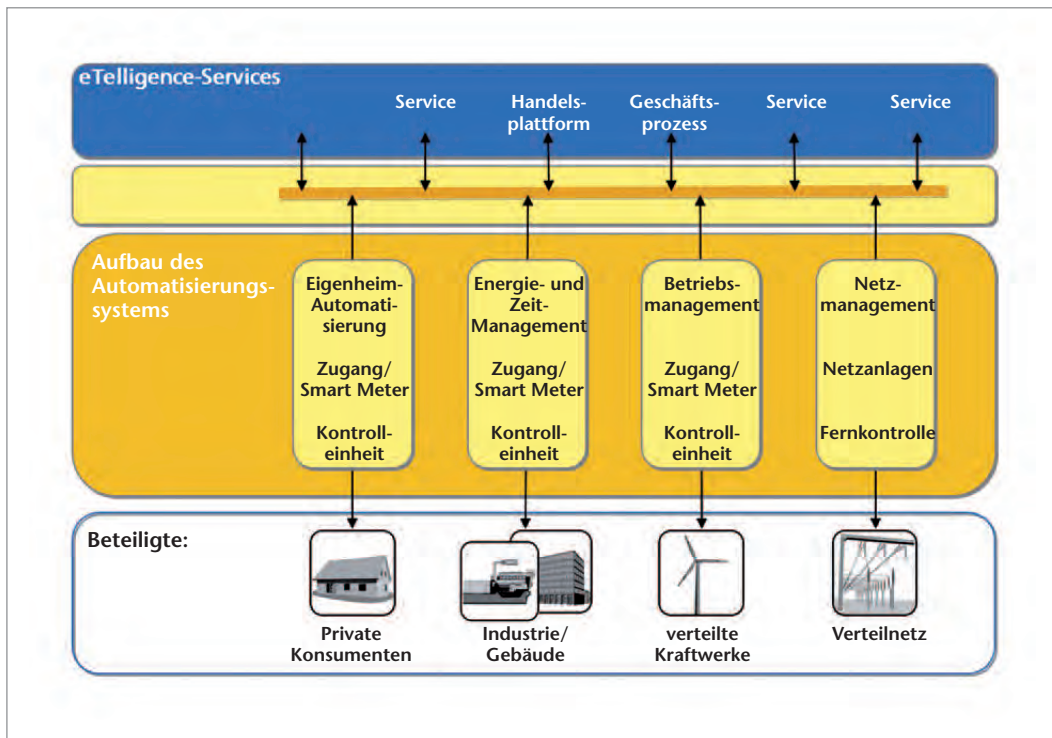


Abbildung 5  
Kommunikations-  
struktur eines Smart  
Grids, das im eEnergy  
Programm des BMWi  
realisiert wird

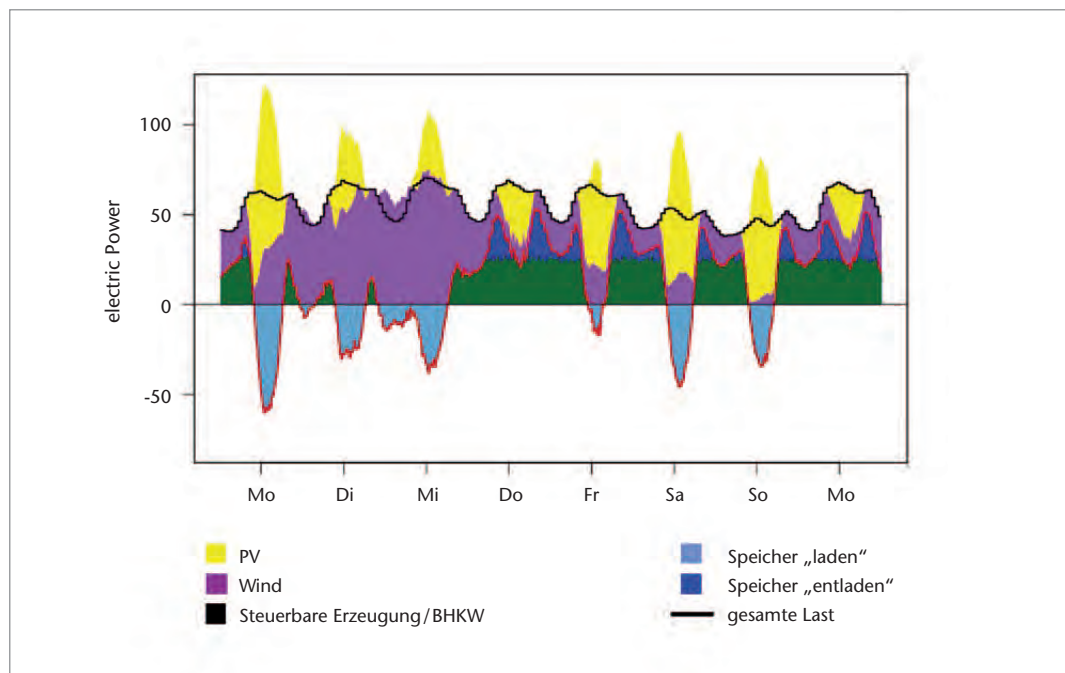
das einen Photovoltaikausbau von knapp 52 GW bis 2020 vorsieht, beziffert ein Gutachten im Auftrag des BDEW den Ausbaubedarf an Mittel- und Niederspannungsleitungen im Verteilnetz auf bis zu 380.000 km. Da hier aber kaum strukturelle und technische Maßnahmen berücksichtigt sind, dürften diese Werte bei weitem zu hoch sein. Denn die vorhandenen Netzkapazitäten lassen sich durch intelligente Maßnahmen wie Energiemanagement, steuerbare Ortsnetzstationen, moderates Einspeisen von Blindleistung oder Kappung der Spitzen von dezentralen Erzeugungsanlagen erheblich steigern. Sinnvoll erscheinen auch strukturelle Maßnahmen wie der räumlich differenzierte Zubau der Photovoltaik. Durch Anreize sollte der zukünftige Zubau verstärkt dort unterstützt werden, wo die Netze besonders aufnahmefähig sind. Man könnte vermehrt mittelgroße und große PV-Anlagen in der Nähe von günstigen Einspeisepunkten errichten, was aber ein Umdenken bei dem Ausweisen von Flächen für Photovoltaikanlagen erforderlich macht.

## Kommunikation zwischen allen Netzteilnehmern als Basis für das „Smart Grid“

Heute erfolgt der Abgleich zwischen aktueller Stromerzeugung und -verbrauch durch Steuerung der Leistung der großen Kraftwerke. Wird die Erzeugung aber zukünftig mehr und mehr von Windkraft- und Photovoltaikanlagen dominiert, deren Erzeugung primär von der aktuell herrschenden Wetter- und Einstrahlungssituation abhängt, ist diese Steuerung der Erzeugung stark eingeschränkt. Zwar wird es auch in ferner Zukunft noch steuerbare Kraftwerke geben, die mit Biomasse betrieben werden, doch auf Grund der limitierten Verfügbarkeit von Biomasse wird deren Kapazität aber begrenzt bleiben. Ziel ist es deshalb, die Verbrauchsseite zu steuern oder zumindest zu beeinflussen (Demand Side Management, siehe Abb. 4). Durch Nutzung moderner Steuerungs- und Kommunikationstechnologien können beispielsweise stromverbrauchende Anlagen in Abhängigkeit des Energieangebots zu- oder abgeschaltet werden. Machbar ist das insbesondere bei elektrischen Verbrauchern, deren Betriebszeiten in Maßen verschoben werden können wie Kühlhäuser, bestimmte

Abbildung 6  
Fiktive Lastgang- und Erzeugungskurve einer Woche im Jahr 2050

Quelle: Fraunhofer ISE



industrielle Prozesse, Kühl- und Gefriergeräte oder Wasch- und Spülmaschinen in privaten Haushalten. Auch die zunehmende Zahl von Wärmepumpen passt ideal in das Konzept der Lastverschiebung. Im eEnergy Programm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie werden hierzu neue Kommunikationstechnologien entwickelt, die eine integrale Vernetzung von Netzbetriebsmitteln und Erzeugern ermöglichen (Abb. 5).

Auch das Laden von Elektrofahrzeugen wird als Lastverschiebung ein wesentlicher Baustein des zukünftigen Smart Grids, das die Steuerung und das Energiemanagement der vielen dezentralen Energieerzeuger und -verbraucher übernehmen soll. Gesteuert werden kann beispielsweise über einen zeitlich variablen Stromtarif, den der Energieversorger für eine bestimmte Angebots-Nachfragesituation vorgibt. Eine Vorstufe dieser dynamischen Tarife sind die heute bereits z. T. angebotenen Zweistufentarife, die aber meist nur geringe preisliche Unterschiede aufweisen und deshalb für den Stromkunden wenig attraktiv sind. Zukünftig müssen diese Tarife dynamisiert und möglichst direkt von den vom Nutzer vorgeprogrammieren Endgeräten verarbeitet werden. Hierzu ist eine weitere Standardisierung der Kommunikationsstruktur sowie der Einbau entsprechender Schnittstellen in alle Endgeräte erforderlich.

## Speicher sind für eine 100%-Versorgung mit Erneuerbaren unverzichtbar

Auch bei optimalem Erzeugungsmix, umfangreicher Nutzung der Lastverschiebung und perfekter Netzsteuerung erfordert eine weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhende Stromversorgung die Installation erheblicher zusätzlicher Speicherkapazitäten. Besonders anschaulich zeigt das *Abbildung 6*, in der eine fiktive Lastgangkurve einer Woche im Jahr 2050 dargestellt ist. Die stark über den Verbrauch hinauschießende Erzeugung durch Photovoltaik muss zwischengespeichert werden. Auch ein- bis zweiwöchige Windflauten müssen berücksichtigt werden. Zudem wird es auch signifikante saisonale Schwankungen in der Erzeugungs- und Verbrauchsbilanz geben, so dass langfristig ein abgestimmter Speichermix erforderlich ist, bestehend aus kurz- und langfristigen bzw. saisonalen Speichertechnologien.

Bereits heute sind in Deutschland Speicherkapazitäten, vor allem Pumpspeicherkraftwerke, mit knapp 40 GWh Kapazität vorhanden. Angesichts eines typischen Tagesverbrauchs von 1,5 bis 2 TWh und einer ungünstigen Wetterlage ist dies aber zukünftig bei weitem nicht ausreichend. Der weitere Ausbau dieser Pumpspeicherkraftwerke, die mit typisch 70–75 % Wirkungsgrad relativ

effizient sind und zu den preiswertesten Speicherarten gehören, wäre zwar wünschenswert, dürfte aber am Mangel guter Standorte und zu erwartendem massiven Protest aus der Bevölkerung scheitern.

Eine Alternative zum Ausbau in Deutschland wäre die Partizipation an Pumpspeicherkraftwerken in Norwegen oder auch in der Schweiz oder Österreich. Speziell Norwegen hat ein riesiges Speicherreservoir von etwa 80 TWh. Allerdings ist davon nur ein kleinerer Teil bidirektional nutzbar. Notwendig wären in jedem Fall zusätzliche Stromleitungen in verlustarmer Technologie (HGÜ-Technik) und natürlich der politische Wille. Für die eher kurzfristige Speicherung im Bereich von Stunden bis Tagen rücken elektrochemische Speicher (Batterien) immer mehr in den Fokus. Neben dem Ausgleich von Erzeugungsschwankungen können Batterien vor allem zur Netzstabilisierung beitragen und die Netzqualität verbessern. Speziell bei Batterien im Bereich kleiner Leistung sind in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte bei Speicherkapazität, Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Kosten erzielt worden („Lithium-Revolution“). Bestimmte Materialkombinationen, die neben hoher Zuverlässigkeit und relativ günstigen Kosten auch sehr lange Lebensdauern von bis zu 20 Jahren erreichen können, eignen sich besonders gut für den Einsatz im häuslichen Umfeld in Verbindung mit dezentralen Energieerzeugern wie Photovoltaik- oder kleinen KWK-Anlagen. Unterstützt wird der Einsatz durch das EEG, das auch in seiner erst kürzlich verabschiedeten und ab 2012 gültigen Fassung, den Eigenverbrauch des selbst erzeugten Stroms bevorzugt. Wenn auch derzeit noch nicht vollständig kostendeckend, erleichtert dieser Bonus von einigen €-Cent die Amortisation der zusätzlichen Investitionskosten für das Batteriesystem.

Für die Implementierung von Speichern im größeren Maßstab und für den Einsatz im Mittelspannungsnetz eignen sich Batteriesysteme auf Basis von NaS-Batterien oder Redox-Flow-Systeme besser. Speziell Redox-Flow-Systeme haben den Vorteil, dass sich durch die Wahl des Stacks und der Vorratsbehälter maximal mögliche Leistung und Speicherinhalt unabhängig voneinander wählen lassen. Dies ermöglicht es bei vertretbaren Kosten, Speicherzeiten von mehreren Tagen zu realisieren.

Windflauten über ein bis zwei Wochen oder saisonale Unterschiede in der Erzeugung vor allem bei der Photovoltaik, lassen sich mit dem gezielten Einsatz von Biomasse etwas abfedern (Regenerative Kombikraftwerke). Langfristig reicht die verfügbare Biomasse dafür aber bei weitem nicht aus. Und Batteriespeicher sind für derartig lange Speicherzeiten absolut unwirtschaftlich. Ernsthaft in Frage kommt hierfür nur der Umweg über die Erzeugung von Wasserstoff und dessen Weiterverwendung. Der Wasserstoff könnte in den Sommermonaten aus den Überschüssen der Stromproduktion aus Photovoltaikanlagen mittels Elektrolyseanlagen gewonnen werden, beispielsweise in geeigneten Salzkavernen zwischengespeichert und in den Wintermonaten vor Ort möglichst in KWK-Anlagen wieder verstromt werden. Auch eine Einleitung des Wasserstoffs in das herkömmliche Erdgasnetz und die Stromerzeugung am Zielort wäre möglich. Die Beimischung des Wasserstoffs ist bis zu einem Anteil von 10 % ohne technische Änderung möglich. Deutlich höhere Anteile wären prinzipiell denkbar, erfordern aber eine Umstellung der erdgasbetriebenen Endgeräte. Verglichen mit den Kosten für die kurzfristige Speicherung elektrischer Energie ist diese Art der Speicherung allerdings relativ teuer. Der Kostendruck wird daher dazu führen, dass der Anteil der saisonalen Speicherung so gering wie möglich ausfallen wird.

Einen Schritt weiter geht die Idee, aus dem aus Windkraft oder Photovoltaik hergestellten Wasserstoff mittels CO<sub>2</sub> synthetisches Methan herzustellen. Das erzeugte Methan könnte dann problemlos in das vorhandene Erdgasnetz eingeleitet, verteilt und in den vorhandenen Erdgas Speichern gespeichert werden. Anschließend kann eine Rückverstromung in hocheffizienten GuD-Kraftwerken erfolgen oder auch eine thermische Weiterverwendung. Allerdings ist der Gesamtprozess auf Grund der nötigen zusätzlichen Konversionen im Vergleich zum reinen Wasserstoffprozess noch weniger effizient.

## Beitrag der Elektrofahrzeuge zur Netzstabilisierung

Fast alle großen Fahrzeughersteller arbeiten derzeit intensiv an der Entwicklung und Markteinführung von Elektrofahrzeugen. Sie gelten als besonders umweltschonend und können erheblich zur Reduzierung des Treibhausgasausstoßes im Verkehr beitragen. Voraussetzung dafür ist allerdings der Betrieb mit Strom aus erneuerbaren Energien. Die Bundesregierung strebt an, dass bereits 2020 etwa eine Million Elektrofahrzeuge auf Deutschlands Straßen fahren werden. Die Energie zur Ladung der Batterien, die Fahrstrecken von etwa 100 bis 200 km erlauben, beziehen die Fahrzeuge aus dem Stromnetz. Geladen werden die Fahrzeuge über Nacht oder immer dort wo sie länger stehen. Also beispielsweise auch beim Einkaufen oder auf dem Parkplatz des Arbeitgebers. In vielen Fällen kommt es nicht darauf an, dass die Ladung zu einem exakt definierten Zeitpunkt stattfindet. Die eigentlichen Ladezeiten können deshalb in gewissen Grenzen verschoben werden, so dass vornehmlich dann geladen wird, wenn das Angebot an Strom eher zu hoch ist. Damit wird ein signifikanter Beitrag zum Ausgleich von Stromerzeugung und -verbrauch geleistet. Elektrofahrzeuge sind somit im Sinne der Stabilisierung unserer Stromnetze ideale Netzteilnehmer.

Ein deutlich höherer Beitrag zur Netzstabilisierung kann erzielt werden wenn zur gezielten Ladezeitverschiebung auch Energie aus den Batterien wieder ins Stromnetz zurückgespeist wird, um Zeiten zu geringer Erzeugung zu überbrücken. Voraussetzung dafür ist, dass die Elektrofahrzeuge möglichst oft ans Netz angeschlossen werden. Angesichts der Tatsache, dass Autos im Mittel über 90 % der Zeit ohnehin stehen, führt das nicht zu Beeinträchtigungen bei der Nutzung. Die maximal aus den Batterien entnommene Energiemenge muss dabei sorgfältig auf die aktuellen Nutzeranforderungen abgestimmt und sämtliche Abläufe müssen automatisiert werden.

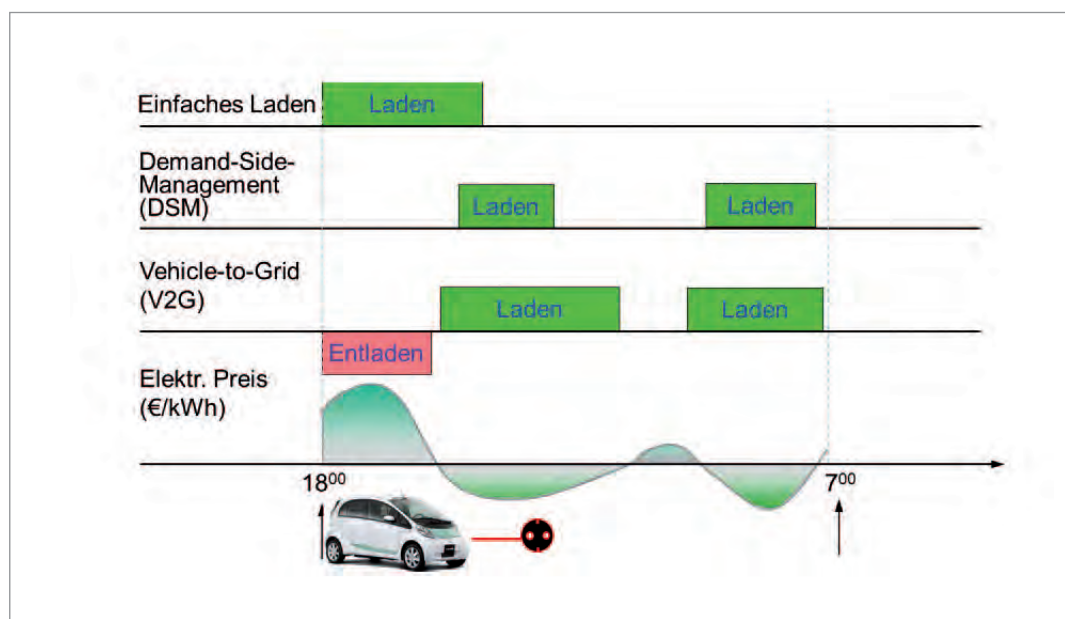
Prinzipiell lassen sich drei verschiedene Ladearten unterscheiden (*Abb. 7*):

1. einfaches Laden
2. gesteuertes Laden („Erzeugungsorientiertes Laden“)
3. Rückspeisen ins Netz, häufig auch mit V2G (vehicle-to-grid) bezeichnet

Auch wenn in den ersten Jahren der Markteinführung von elektrischen Großserienfahrzeugen das einfache Laden vorherrschen dürfte, ist es notwendig dafür zu sorgen, dass langfristig das Laden im Sinne der Netzstabilisierung und des Ausgleichs von Erzeugung und Verbrauch erfolgt. Nötig hierfür ist eine Infrastruktur an halböffentlichen und

Abbildung 7  
Verschiedene Lademodi  
für Elektrofahrzeuge

Quelle: EON



öffentlichen rückspeisefähigen Ladestationen, die die bereits vorhandenen privaten Lademöglichkeiten ergänzen, sowie eine durch variable Tarifierung unterstütztes Anreizsystem für den Stromkunden. Neben dem Management des Energietransfers zwischen Fahrzeug und Netz und zurück müssen weitere Funktionen wie Authentifizierung der Fahrzeuge, Messen und Abrechnen der übertragenen Energie und die Kommunikation zwischen allen Beteiligten wie Energieversorger, Ladestationsbetreiber und Nutzer realisiert werden.

Was darf man nun von den Elektrofahrzeugen im Idealfall an Beitrag zur Netzstabilisierung erwarten? Typische Batteriegrößen von PKW mit reinem Elektroantrieb liegen zwischen 15 und 30 kWh. Die Batterien von Plug-In-Hybridfahrzeugen, die zwar auch am Stromnetz geladen werden, aber für längere Strecken noch einen weiteren Antrieb besitzen, sind etwas kleiner. Setzt man voraus, dass im Mittel nur ein Teil der Batteriekapazität aller vorwiegend elektrisch betriebenen Autos zur Netzstabilisierung herangezogen werden darf, ergibt sich eine nutzbare Speichergroße bei einer Million Fahrzeugen in 2020 von etwa 10 GWh. Den Erfolg elektrisch angetriebener Fahrzeuge vorausgesetzt, wären bis 2050 natürlich höhere Werte zu erwarten. Bei 40 % Marktdurchdringung, was etwa 18 Millionen Fahrzeugen entspricht, könnten etwa 180 GWh genutzt werden. Dies entspricht gut 2 Stunden der gesamten Last Deutschlands. Windflauten von mehreren Tagen ließen sich damit nicht überbrücken aber verglichen mit der Kapazität aller deutschen Pumpspeicherkraftwerke zusammen, die bei 40 GWh liegt, wäre dies ein sehr beachtlicher Speicherzuwachs. Die Nutzung von Elektrofahrzeugen zur Netzstabilisierung sollte deshalb weiter verfolgt werden, zumal bei weiteren Verbesserungen in der Batterietechnologie, insbesondere hinsichtlich der Zyklenfestigkeit, die zusätzlichen Kosten relativ gering sind. Mittelfristig dürften sich auch geeignete Geschäftsmodelle finden lassen, die den Nutzer zur Teilnahme am Energiemarkt motivieren könnten.

## Fazit

Die Transformation unserer Stromversorgung hin zur nachhaltigen Erzeugung auf Basis erneuerbarer Energien nimmt Fahrt auf. Für das Ziel der Vollversorgung sind aber weitere Anpassungsmaßnahmen wie die Aufrüstung unseres Stromnetzes zu einem intelligenten Netz (Smart Grid), ein gezielter Netzausbau und die Installation von Speicherkapazitäten erforderlich. Für die ziel-sichere Konzipierung eines optimierten Erzeugungsszenarios sowie die Definition der nötigen Begleitmaßnahmen sind weitere Forschungsarbeiten dringend erforderlich.

# Modellregionen für intelligent vernetzte Energiesysteme



## Fraunhofer IWES

Dr. Philipp Strauß

philipp.strauss@iwes.fraunhofer.de

Dr. David Nestle

david.nestle@iwes.fraunhofer.de

Dr. Kurt Rohrig

kurt.rohrig@iwes.fraunhofer.de

Florian Schlögl

florian.schloegl@iwes.fraunhofer.de

Sina Pezeshki

sina.pezeshki@iwes.fraunhofer.de

## Fraunhofer ISE

Christof Wittwer

christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

Raphael Hollinger

raphael.hollinger@ise.fraunhofer.de

## Fraunhofer IBP

Dr. Dietrich Schmidt

dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de

## MVV Energie

Andreas Kießling

a.kiessling@mvv.de

## B.A.U.M. Consult

Ludwig Karg

l.karg@baumgroup.de

## 1. Einführung

Die Energiewende in Deutschland stellt hohe Anforderungen an das Gesamtsystem der Energieversorgung. Strom wird zukünftig von einer großen Zahl dezentraler, in vielen Fällen kleiner und auf erneuerbaren Energiequellen basierender Anlagen erzeugt werden. Gleichzeitig werden neue Verbraucher wie Ladestationen für Elektrofahrzeuge mit bisher nicht bekannten Lastprofilen Verbreitung finden. Dies stellt das Stromnetz und das gesamte Versorgungssystem vor Herausforderungen.

Schon jetzt zeichnet sich ein Paradigmenwechsel ab: wurde bisher die Stromerzeugung im Wesentlichen dem Lastprofil angepasst, sollte zukünftig der Verbrauch der fluktuierenden Erzeugung folgen soweit dies möglich ist. Den verbleibenden Ausgleichsbedarf werden zentrale und dezentrale Speicher übernehmen. Benötigt wird dafür ein „Internet der Energie“, in dem die gesamte Wertschöpfungskette – von der Erzeugung über die Speicherung und Verteilung bis zum Verbrauch – intelligent und bidirektional vernetzt ist.

Das „Internet der Energie“ aufzubauen, ist nicht allein eine technische Frage. Im zukünftigen Stromversorgungssystem wird es auch neue Marktrollen geben. Es gilt, kleine Erzeuger zu bündeln sowie die Verbrauchsflexibilitäten zu aggregieren und zu vermarkten. Es werden sich neue Dienstleistungen entwickeln für Steuerung und Fernwartung dezentraler Stromerzeuger und auch für automatisierte Gebäudetechnik. Außerdem wird es Dienstleistungen geben, die die effiziente Nutzung von Energie in Gebäuden und Fahrzeugen mit gleichzeitiger Komfortsteigerung verbinden. Solche Transaktionen werden in Zukunft auf sich entwickelnden elektronischen Marktplätzen stattfinden.

Die intelligente Steuerung und Verknüpfung von Energiesystemen mittels Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) bietet enorme Chancen hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und

Ressourceneffizienz. Um die notwendigen Grundlagen zu entwickeln und in der Anwendung zu testen, hat die Bundesregierung das so genannte Leuchtturmprojekt „E-Energy – IKT-basiertes Energiesystem der Zukunft“ ins Leben gerufen. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie fördert in Partnerschaft mit dem Bundesumweltministerium sechs Modellprojekte, in denen Konsortien aus der Energie- und IKT-Wirtschaft zusammen mit Wissenschaftseinrichtungen Schlüsseltechnologien und Geschäftsmodelle für ein „Smart Grid – Made in Germany“ entwickeln und erproben [1]. Ergänzt werden diese Aktivitäten durch das Programm „IKT für Elektromobilität“, in dem es unter anderem um die informationstechnische Integration von Elektrofahrzeugen in das Energieversorgungssystem geht [2].

## 2. E-Energy-Modellstadt Mannheim

Intelligent gesteuerte Energienetze funktionieren als lokal bzw. regional organisierte Systeme mit Strom-, Gas- und Wärmeerzeugern, Energiespeichern sowie Energienutzern. Im Strombereich berücksichtigen diese gleichzeitig die Vorgänge in weiteren Regionen und den Transport andernorts gewonnener Energie. Für die Steuerung werden zusätzliche Informationen über aktuelle Markt- und Netzzustände benötigt, die heute bei den entsprechenden Geräten und Komponenten noch nicht verfügbar sind. Deshalb ist es ein wichtiges Ziel sowohl intelligente Zählersysteme (Smart Metering) als auch intelligente Energienetze (Smart Grids) weiterzuentwickeln.

Im E-Energy-Projekt „Modellstadt Mannheim“ (kurz: moma) untersucht ein Konsortium von acht Partnern aus Forschung und Industrie, unter der Führung der Mannheimer MVV Energie, seit Oktober 2008 Möglichkeiten, wie eine solche Verbesserung der Netze aussehen könnte [3], um Stromerzeuger und Verbraucher mit Hilfe moderner IKT zu verknüpfen.

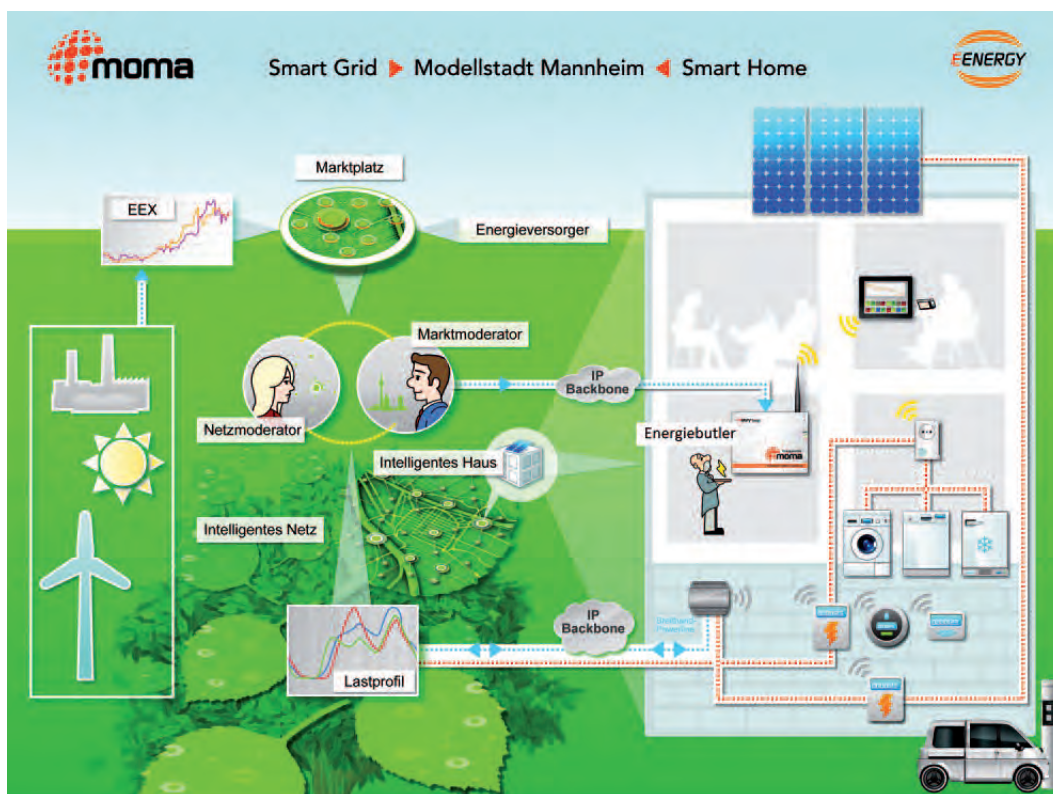


Abbildung 1  
Einbindung von Kunden  
in den moma-Feldtest

Erläuterung:  
IP Backbone = Internet  
Protocol Backbone.  
Das ist die  
netztechnische  
Basisinfrastruktur  
eines Internet Service  
Providers (ISP)

Dabei werden auch neue regionale Marktmechanismen entwickelt, die das Ziel der starken Beteiligung von Kommunen und Bürgern stützen. Diesen Ansatz setzt das Projektkonsortium mit Hilfe eines Energiemarktplatzes und einer intelligenten Nachfrage- und Netzsteuerung um. Dieser Marktplatz wird auf einer serviceorientierten Softwarearchitektur realisiert. Voraussetzung hierfür ist ein echtzeitfähiges Kommunikationsnetz, das auf Grundlage des Mannheimer Breitband-Powerline-Netzes aufgebaut wird.

Die Steuerung der Nachfrage erfolgt indirekt über variable Preise, die abhängig vom Angebot aus erneuerbaren Energien entstehen, dazu wurde ein so genanntes Bidirektionales Energiemanagement Interface (BEMI – auch Energiebutler® genannt) als Energiemanagement Gateway entwickelt (siehe auch Abschnitt 5). Die Teilnehmer des Praxistests bekommen über zeitvariable Preise den Anreiz, ihren Stromverbrauch auf Zeiten zu verlagern, in denen das Angebot groß und die Nachfrage klein ist. Um unmittelbar eine Rückmeldung über den jeweiligen Stromverbrauch geben zu können, werden neue elektronische Messeinrichtungen eingesetzt. So können die

Kunden den Verbrauch viertelstundengenau abfragen. Außerdem erhalten sie monatliche Rechnungen, die zeitnah Überblick über die finanziellen Auswirkungen ihres Verbrauchsverhaltens geben. Die Steuerung der Endgeräte erfolgt über den Energiebutler, der die Preissignale in Steuersignale umsetzt, auf die die Nutzer reagieren können.

Für Ende 2011 ist die dritte Feldtest-Phase für moma vorgesehen, die bis zu 1000 Teilnehmer einbinden soll. Auch in Dresden wird ein auf die lokalen Anforderungen zugeschnittener Versuch starten, um weitere Erfahrungen in anderen Netzen zu sammeln.

### 3. E-Energy-Modellregion RegModHarz

Das Projekt RegModHarz [4] wirft einen Blick in die Zukunft einer sicheren und stabilen Energieversorgung mit einem sehr hohen Anteil erneuerbaren Energien (EE). Dabei liegt der Schwerpunkt auf drei Themen:

1. Aufbau eines virtuellen Kraftwerks zur koordinierten Steuerung von dezentralen Stromerzeugern, Speichern und Lasten.
2. Entwicklung von Geschäftsmodellen zur Vermarktung von Energieprodukten aus erneuerbaren Energien
3. Methodenentwicklung zur Erhaltung der Versorgungssicherheit durch Netzüberwachung mit Messgeräten für komplexe Spannungsanzeiger (PMU – phasor measurement units) und durch Systemdienstleistungen von EE-Stromerzeugern

Es werden verschiedene innovative Vermarktungsmöglichkeiten mit Strom aus erneuerbaren Energien entwickelt und simuliert. Ein zentrales Geschäftsmodell verwendet einen neuen „Regionalen Stromtarif aus Erneuerbaren Energien“. Dabei handelt es sich um einen zeitvariablen Strompreis, der vor allem an Haushaltskunden gerichtet ist. Der regionale variable Strompreis ermöglicht es, in den Haushalten ein automatisches Energiemanagement durchzuführen, das sowohl Stromkosten minimiert als auch das Verbrauchsprofil an das aktuelle Energieangebot anpasst. Die Kundenreaktion und -akzeptanz dieses dynamischen Tarifs soll in einem Feldversuch mit ca. 50 Haushalten überprüft werden. Dabei wird auch in diesem Projekt die in Kapitel 5 beschriebene Energiemanagement-Technologie (BEMI) verwendet.

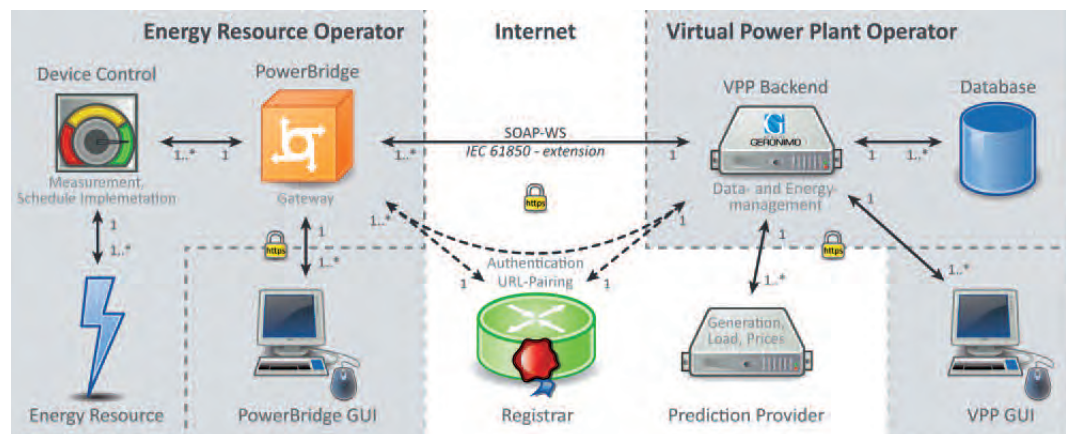
Bei dem Feldtest werden nicht nur technische Gesichtspunkte betrachtet: In dem parallel laufenden sozialwissenschaftlichen Projekt „Energienachhaltige Gemeinschaft“ wird die Akzeptanz und der Umgang der Feldtestteilnehmer mit der Technik untersucht.

Eine wichtige Eigenschaft des neuen Tarifmodells ist, dass der an die Haushalte gelieferte Strom aus EE-Anlagen aus der Region Landkreis Harz stammt und dass das gelieferte Profil jederzeit (in zur Bilanzierung relevanten Viertelstunden) abgedeckt wird. Dadurch grenzt es sich von anderen EE-Tarifen ab, welche die Energie nur langfristig bilanzieren.

Zur Umsetzung dieses Geschäftsmodells, aber auch für andere Vermarktungsmodelle, wird im Projekt ein virtuelles Kraftwerk (VK) erstellt, an das die unterschiedlichen EE-Anlagen angeschlossen werden können. Die Anbindung von Anlagen, externen Diensten (Prognosen) und funktionalen Benutzeroberflächen erfolgt über Webservices. Für den Datenaustausch zwischen der zentralen Leitwarte und den Anlagen (Energiefahrpläne bzw. Anlagendaten) wird der Kommunikationsstandard IEC 61850 verwendet. Mit einem neuen Datenmodell zur Beschreibung flexibler Anlagen als Erweiterung der IEC 61850 soll das Anmelden und Einbinden in das Energiemanagement automatisiert werden (Plug & Play). In der zentralen Leitwarte erfolgt die Berechnung der Fahrpläne für die Anlagen z. B. zur Deckung des Lastprofils der belieferten Haushalte (siehe *Abbildung 2*).

Darüber hinaus wurde in Simulationen untersucht, wie sich die Belastbarkeit von Stromleitungen gegenüber festen Grenzwerten (wie z. B. Temperaturbelastung bei erhöhtem Stromdurchfluss) erhöht, wenn auch Umgebungsfaktoren wie Wind, Umgebungstemperatur etc. in den Energiemanagementsteuerungen berücksichtigt werden.

*Abbildung 2*  
Systemkomponenten der Leitwarte des virtuellen Kraftwerks RegModHarz





## 4. E-Energy-Modellregion eTelligence

In der Modellregion Cuxhaven wird im Rahmen des eTelligence-Projektes [3] unter der Führung der EWE AG ein zukunftsfähiges, regionales Energieversorgungssystem mit einem Energiemarktplatz als zentralem Element umgesetzt. Das integrative Konzept wurde im Zuge des Projektes entwickelt und im Jahr 2011 in einem einjährigen Feldversuch erprobt.

Eine besondere Herausforderung war dabei die Integration des Energiemarktplatzes in das Energiesystem. Für die Dauer des Feldtests waren die teilnehmenden Akteure dabei sowohl dem Vermarktungs- und Preisrisiko als auch dem Prognoserisiko ausgesetzt. Um das Vermarktungsrisiko so gering wie möglich zu halten, wurde über einen sogenannten Marketmaker die Liquidität am Markt in einem definierten Zeitraum jedes Handelstages sichergestellt. Der Marketmaker kauft und verkauft hierzu Strom auf dem eTelligence Markt und reicht die Bilanz aus diesen Geschäften ggf. an den Day-ahead-Markt der EPEX weiter. Das Prognoserisiko jedes Marktteilnehmers geht aus der Pflicht hervor, am Vortag (day-ahead) einen Energiefahrplan anzumelden. Abweichungen vom angemeldeten Fahrplan müssen mit Ausgleichsenergie nachgeregelt werden.

Die Komplexität und die Breite der Akteure am Markt machen eine Anbindung durch die Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien unerlässlich. Um die Transaktions- und Integrationskosten so gering wie möglich zu halten, wird hierbei besonders auf einen hohen Automatisierungsgrad sowie auf Standardisierung Wert gelegt. Die Kommunikation mit dem Markt basiert auf dem CIM-Standard (IEC61968/61970). Für die Kommunikation eines am Markt teilnehmenden virtuellen Kraftwerks mit einzelnen Anlagen wurde auf den Standard IEC61850 zurückgegriffen. Hierzu wurde im Zuge des Projektes eine quelloffene Implementierung des IEC61850-Stacks entwickelt.

Das Fraunhofer ISE setzt die eigens entwickelte openMUC-Software-Plattform ein. Sie basiert auf der Funktionalität eines drahtlosen Energieportals (Gateway). Das eTelligence-Gateway wird eingesetzt, um Blockheizkraftwerke dezentral optimiert

zu betreiben und deren Energie automatisiert gewinnbringend am eTelligence-Markt zu vermarkten. Auf Basis der über Smart Meter erfassten Daten und über das Internet abgerufener Wetterprognosen werden hierzu Lastprognosen erstellt. Für den BHKW-Einsatz berechnet ein Optimierer Fahrpläne auf Basis der erwarteten thermischen Last und der aktuellen Preise am eTelligence Markt. Dabei wird die durch thermische Speicherkapazitäten verfügbare Flexibilität ausgenutzt, um den BHKW-Einsatz in Hochpreiszeiten zu verschieben. Der so errechnete Fahrplan wird day-ahead vermarktet und dann in Steuersignale umgesetzt. Abweichungen, die durch veränderte thermische Lasten auftreten, werden durch einen Controller abgefangen und mit der Inanspruchnahme von Ausgleichsenergie bilanziert.

Neben dem reinen Handel von Wirkleistung wurden auch standardisierte Produkte entwickelt, die Netzbetreibern den Einkauf von dezentral erbrachten Netzserviceleistungen ermöglichen. So kann der Netzbetreiber Wirkleistung und Blindleistung einspeisepunktscharf über den Markt nachfragen. Dem Fraunhofer AST Institut obliegt in diesem Projekt die Marktteilnahme aus Sicht des Netzbetreibers. Hierzu wurde ein umfangreiches Messnetz zur Erfassung der Stromqualität aufgebaut, das über eine Echtzeitdatenerfassung ausgelesen wird.

## 5. Vernetzte Einbindung von Stromkunden in den Projekten Modellstadt Mannheim und RegModHarz

Zur Einbindung von Stromkunden in den Projekten moma und RegModHarz wird das Konzept des Bidirektionalen Energiemanagement Interface (BEMI) eingesetzt (in moma auch Energiebutler® genannt, siehe *Abbildung 1*). Das BEMI ermittelt den wirtschaftlich optimalen Betrieb der Lasten. Die Grundlage dafür bilden dezentrale Informationen über den Zustand der Lasten (z. B. die Temperaturen in Kühlgeräten und die Beladungszustände von Waschmaschinen) sowie zentrale Informationen in Form variabler Tarife für Stromverbrauch und -erzeugung [6].

Hierfür benötigt das BEMI verschiedene Hard- und Softwarekomponenten [7]:

- eine Kommunikationseinrichtung zum Empfang der Preisdaten
- eine automatische Steuerung der angeschlossenen Geräte
- die Einbindung von intelligenten Zählern sowie ein Energiemanagement-System mit interaktivem Display beim Kunden

Diese Komponenten können darüber hinaus auch für andere Anwendungen genutzt werden:

- Steuerung von Netzdienstleistungen
- Analyse von Zähler- und Messdaten (z. B. zur Unterstützung von Investitionsentscheidungen des Kunden in Energiesparmaßnahmen)
- Anbindung an die klassische Gebäudeautomation (z. B. zur Einzelraumregelung der Heizkörper)

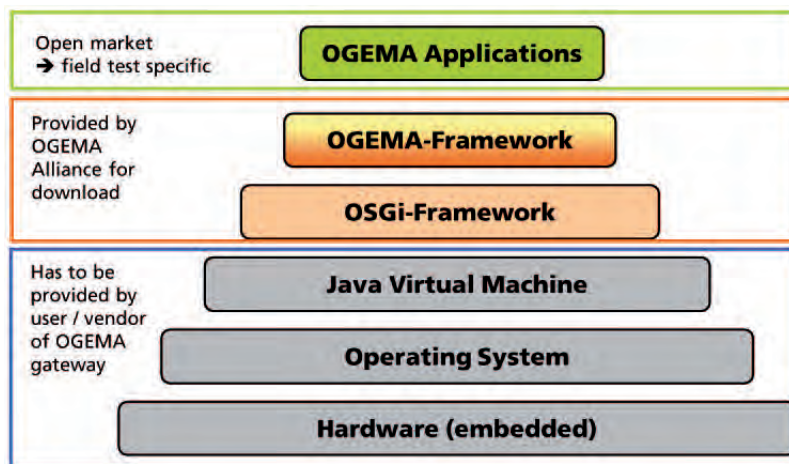
Das Fraunhofer IWES hat ein Software-Framework entwickelt, das es ermöglicht, auf dem BEMI Anwendungen unterschiedlicher Hersteller zu installieren. Das Framework wurde im Rahmen der Open Gateway Energy Management Alliance (OGEMA) [8] als offene Spezifikation und Open Source-Referenzimplementierung veröffentlicht. Die OGEMA-Laufzeitumgebung wurde in der Programmiersprache Java realisiert. Das auf Java aufbauende OSGi-Framework [9] stellt die Funktionalität zur Verfügung, verschiedene Anwendungen („Bundles“) parallel in einer Laufzeitumgebung auszuführen. Die Installation und Deinstallation einer Anwendung ist dabei im laufenden Betrieb und ohne Neustart des Frameworks möglich.

## 6. Elektromobilität im zukünftigen Versorgungssystem

Die Veränderungen im Erzeugungsmix bedürfen Investitionen in das Stromnetz. Erforderlich sind sowohl der Netzausbau als auch ein Umbau der lokalen Verteilungsnetze. Elektrofahrzeuge können in diesem intelligenten System der Stromversorgung und -nutzung zu hilfreichen Stellgliedern werden. Für das Laden der Batterien von Elektrofahrzeugen kann beispielsweise vorwiegend die Energie aus regenerativer Erzeugung genutzt werden. Um dies zu gewährleisten, muss eine Kommunikation zwischen dem intelligenten Stromnetz (Smart Grid), den Ladestationen und den Fahrzeugen aufgebaut werden. Zudem ist sicherzustellen, dass nicht durch gleichzeitiges Laden von zu vielen Fahrzeugen die Verteilnetze überlastet werden. In der Zukunft könnten die Batterien der Elektrofahrzeuge auch gezielt so angesteuert werden, dass sie im Bedarfsfall Strom in das Netz zurückspeisen.

Im Rahmen des zweiten Konjunkturpakets förderte die Bundesregierung die Einführung der Elektromobilität. Entsprechend den unterschiedlichen Forschungsschwerpunkten waren die Forschungs- und Modellvorhaben verschiedenen Ministerien zugeordnet. BMWi und BMU förderten unter anderem 7 Modellprojekte, deren Schwerpunkt bei der Entwicklung und beim Test von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) für die Alltagstauglichkeit der Elektromobilität lag [2]. Diese Modellprojekte arbeiteten eng zusammen.

Abbildung 3  
OGEMA-Architektur



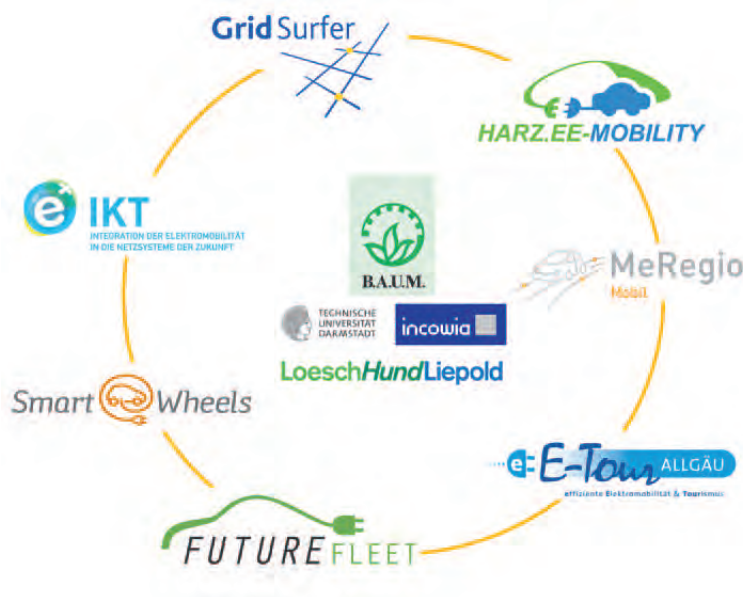


Abbildung 4  
Die sieben Modellprojekte zu IKT für Elektromobilität von BMWi und BMU

Die Koordination oblag einem Begleitforschungsteam bestehend aus B.A.U.M., Incowia, TU Darmstadt, Institut für Zukunftstechnologien (IZT) und der Agentur LoeschHundLiepold.

Die Projektkonsortien bestanden aus Unternehmen der Automobilindustrie sowie aus den Branchen Energie, IKT und Forschung. Sie untersuchten in ganzheitlichen Ansätzen, welcher IKT-Elemente es bedarf, um Elektrofahrzeuge im Alltagsbetrieb zu nutzen. Dabei wurden diese IKT-Elemente nicht nur entwickelt sondern auch im Feld getestet. In drei Fachgruppen arbeiteten die Modellkonsortien und die Begleitforschung zu IKT für Elektromobilität eng zusammen und entwickelten Normen und Standards sowie Leitfäden zum Datenschutz und relevanten Rechtsfragen.

Heute wird daran gearbeitet, die Ladevorgänge für Elektrofahrzeuge netzverträglich zu gestalten, korrekt zuzuordnen und kostengünstig abzurechnen. In Zukunft kann es dann eine Vielzahl neuer Geschäftsmodelle rund um die Elektromobilität geben. Denn im Energiesystem der Zukunft wird es neue Technologien geben, die es erlauben, Stromverbraucher und -erzeuger in Realzeit aufeinander abzustimmen.

Im Zuge dessen werden im Energiemarkt neue Marktrollen entwickelt, zum Beispiel die Rolle des Aggregators, der über elektronische Marktplätze,

wie sie von E-Energy entwickelt werden, kleine Erzeugungsmengen bündelt und zeitgenau auf dem Markt anbieten und ins Netz einspeisen kann. Der Aggregator kann die Stromverbrauchsflexibilität vieler Kunden und die dezentrale Stromerzeugung bündeln und sie dem Regelenergiemarkt zuführen. Es können auch vertragliche Vereinbarungen mit einzelnen Elektrofahrzeugnutzern getroffen und somit das Laden und Entladen jeweils mit Marktpreisen versehen werden. Der Aggregator kann zunehmend Partner von Mobilitätsprovidern werden, die Car-Sharing oder andere ganzheitliche Mobilitätsmodelle anbieten.

Mit den neuen dezentralen energiewirtschaftlichen Diensten können Elektrofahrzeugbetreiber ihre Fahrzeuge günstig laden oder ihre Traktionsbatterien sogar als Netzspeicher zur Verfügung stellen und damit an den neuen Energiemärkten teilnehmen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Transformation des Energiesystems und durch die großflächige Einführung der Elektromobilität entstehen neue Herausforderungen für den Netzbetrieb und für den Energiemarkt. Der Einsatz geeigneter Informations- und Kommuni-

kationstechnik kann helfen, das Verbrauchsverhalten ohne Komforteinbußen der fluktuierenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen anzupassen und die Elektromobilität unterstützend in das Gesamtsystem einzubinden.

In verschiedenen E-Energy Modellregionen sowie in Projekten zur Elektromobilität werden neue Konzepte zur Bewältigung der zukünftigen Herausforderungen entwickelt und im Feld erprobt. Dabei kommt der Einbindung der Stromkunden in Markt- und Netzbetriebsmechanismen eine entscheidende Rolle zu. Die Interaktionen zwischen den verschiedenen Akteuren (Netzbetreiber, Energieversorger, Messstellenbetreiber, Netzkunden, Anlagenbetreiber/-hersteller, Händler) werden immer komplexer, vor allem wenn neue Akteure, wie die Betreiber von virtuellen Kraftwerken hinzukommen. Das macht den umfassenden Einsatz standardisierter Kommunikation und teilweise auch standardisierter Softwareumgebungen notwendig.

Die Modellregionen erzielen wichtige Praxisergebnisse, die zurzeit in die internationale Normung eingebracht werden. Die bis Ende 2012 laufenden E-Energy-Projekte sind ein erster Schritt bei der Umsetzung neuer integrierter Energieversorgungskonzepte. Zukünftige Projekte sollten weitere branchenübergreifende Optimierungspotenziale für das Energiemanagement und insbesondere auch für Energietransport und -speicherung erschließen helfen. Die laufenden E-Energy-Projekte haben gezeigt, dass die hierfür notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit beschleunigt werden kann.

## Literatur

- [1] Webpräsenz E-Energy: [www.e-energy.de](http://www.e-energy.de)
- [2] [www.ikt-em.de](http://www.ikt-em.de)
- [3] Webpräsenz Modellstadt Mannheim: [www.modellstadt-mannheim.de](http://www.modellstadt-mannheim.de)
- [4] Webpräsenz RegModHarz: <http://www.reg-modharz.de>
- [5] Webpräsenz eTelligence: [www.etelligence.de](http://www.etelligence.de)
- [6] J. Ringelstein, D. Nestle: Application of Bidirectional Energy Management Interfaces for Distribution Grid Services, 20th Int. Conf. on Electricity Distribution (CIRED), Juni 2009, Prag
- [7] B. Buchholz, A. Kießling, D. Nestle, "Individual customers influence on the operation of virtual power plants", Proceedings of IEEE PES-GM, Calgary, 2009.
- [8] OGEMA Alliance, <http://ogema-alliance.org>
- [9] OSGi Alliance, [www.osgi.org](http://www.osgi.org)

# Städte und Quartierskonzepte – Modellstädte

## Einführung

Als das „Jahrhundert der Stadt“ bezeichnete der ehemalige UNO-Generalsekretär Kofi Annan das aufziehende Jahrhundert auf der „Urban21“ im Jahr 2000 in Berlin. Inzwischen hat die Beschäftigung mit Städten und ihren energetischen Zusammenhängen und Interdependenzen auf politischer wie auf wissenschaftlicher Ebene Hochkonjunktur.

Städte sind als Ballungszentren die Schwerpunkte von Energieumsatz und den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Im Zusammenhang mit den Zielsetzungen der Bundesregierung im Rahmen ihres Energiekonzepts bis 2050 [1] müssen gerade Städte einen wesentlichen Beitrag zur Realisierung der ehrgeizigen Zielstellung leisten.

Eine der größten Aufgaben stellt sicherlich die umfassende energetische Sanierung des Gebäudebestands dar. Die größten Einzelposten der Energieverbraucher in Gebäuden sind nach wie vor der Wärme-, Kälte- und Strombedarf. Im Jahr 2008 belief sich der Anteil des Endenergiebedarfs für Raumwärme, Warmwasser, Raumkälte und Beleuchtung auf ca. 40 % des Gesamtbedarfs und stellte damit neben dem Verkehr den größten Einzelposten dar [2]. Trotz der absehbaren signifikanten Steigerung der Sanierungsrate sehen sich Planer und Entscheidungsträger weiterhin vor großen Herausforderungen. Hier sind innovative und auf den Nutzerbedarf zugeschnittene Technologien sowie umsetzungsfreundliche Systemlösungen gefragt, die zu einem schnellen Abbau der bestehenden Hemmnisse beitragen. Obwohl derzeitige Sanierungsmaßnahmen in der Regel nicht den langfristig wünschenswerten energetischen Standard erreichen, muss auch die momentane Sanierungsrate noch verdoppelt werden, um die bis 2050 angestrebten Erfolge möglich zu machen.

Ebenso ist die Integration erneuerbarer Energien in unsere bestehende Versorgungsinfrastruktur

eine heute anzugehende Aufgabe für die Zukunft. Fluktuierende Erzeugungsprofile aus Windkraft und Photovoltaik stellen neue Anforderungen an Regel- und Speichertechnologien. Die Verlagerung der bestehenden zentralen Versorgungsstrukturen auf dezentrale und bi-direktionale Konzepte, welche eine klare Unterscheidung in energieverwendende und energiebereitstellende Komponenten vornimmt, ist sowohl in der Planung wie im Betrieb komplex. Planungs- und Überwachungsinstrumente, die zum einen der Komplexität gewachsen sind, zum anderen die verschiedenen Bedarfssektoren Wärme/Kälte, Strom und Mobilität integrieren und aufeinander abstimmen können, sind noch zu entwickelnde und zu erprobende Werkzeuge.

Eine Vielzahl von kommunalen Entscheidungsträgern stellt sich bereits aktiv den Herausforderungen einer „Energiewende“ in ihren Kommunen. Ebenso unterstützen viele Forschungsschwerpunkte und Förderprogramme die Pioniere bei der Umsetzung. Von den Erfahrungen kann eine große Zahl von Kommunen profitieren, denn die strukturellen Gegebenheiten und Problemstellungen weisen in der Mehrheit der deutschen Städte und Kommunen große Ähnlichkeiten auf.

## Lösungsansätze auf der Ebene von Gebäuden

### Gebäude Beispiel 1:

#### Außenliegende Wandheizung

Es ist absehbar, dass nicht alle Gebäude unter wirtschaftlichen Aspekten bis 2050 in den „Effizienzhaus-Standard“ überführt werden können. Aus diesem Grund sind im Sanierungsbereich Konzepte erforderlich, die ein hohes Potenzial zur Verbrauchsreduzierung mit bautechnisch vorteilhaften Sanierungsmethoden kombinieren.

Deshalb wurden Sanierungsmethoden entwickelt, bei denen das Gebäude während der gesamten



### Fraunhofer IBP

Dr. Dietrich Schmidt  
dietrich.schmidt@ibp.fraunhofer.de

Christina Sager  
christina.sager@ibp.fraunhofer.de

Hans Erhorn  
hans.erhorn@ibp.fraunhofer.de

Fraunhofer ISE  
Christof Wittwer  
christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer IWES  
Dr. David Nestle  
david.nestle@iwes.fraunhofer.de

Wolfram Heckmann  
wolfram.heckmann@iwes.fraunhofer.de

ZAE Bayern  
Dr. Hans-Peter Ebert  
ebert@zae.uni-wuerzburg.de

IZES  
Prof. Dr. Horst Altgeld  
altgeld@izes.de

Abbildung 1  
Aufbau einer Wand mit einem außenliegenden Wandheizungssystem (aWH)

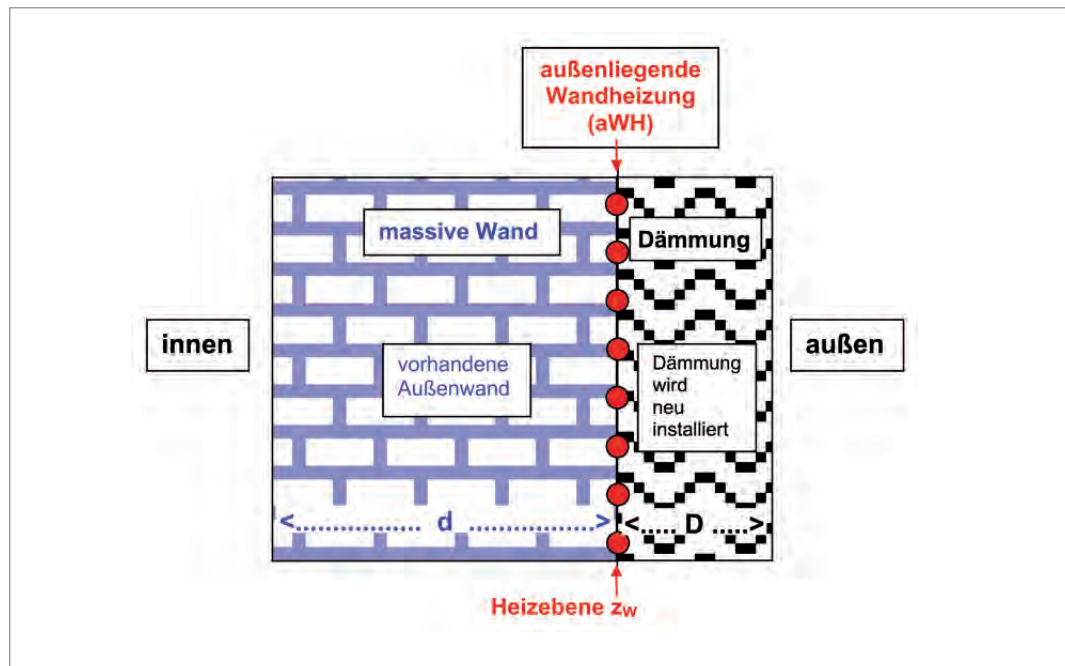
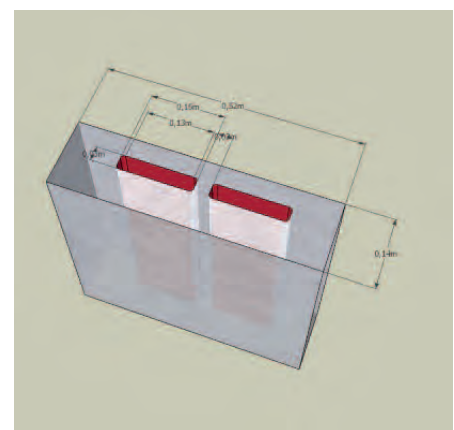
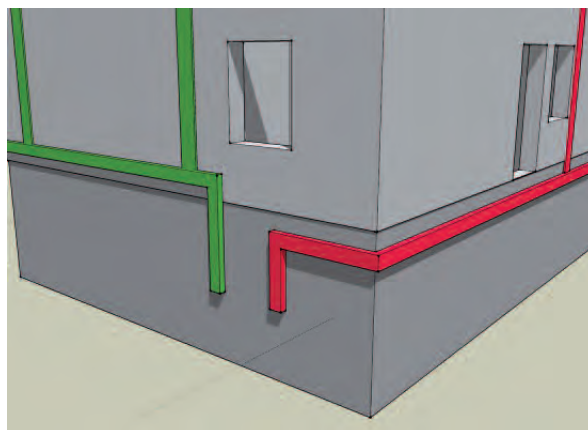


Abbildung 2  
links: Zuluft- (grün) und Abluftkanäle (rot) des Lüftungssystems  
rechts: Kanalführung im Dämmpaneel



Sanierungsmaßnahme bewohnbar bleibt, was für Vermietungsobjekte besonders wichtig ist. Dazu wird außen auf der Bestandswand zuerst ein Flächenheizsystem angebracht, das auch zur Kühlung nutzbar ist. Darüber wird dann eine neue Dämmung aufgebracht [3], [4].

### Gebäude Beispiel 2: Innovative Gebäudesanierung mit fassaden-integrierter Luftführung

Zur energetischen Sanierung von Wohngebäuden werden zumeist Erneuerungen an der Anlagentechnik, wie der Austausch des Wärmeerzeugers, oder Verbesserungen an der Gebäudehülle vorgenommen [5]. Doch durch eine Fassadensanierung werden die Lüftungsverluste nicht reduziert, eine

weitere Verringerung der Wärmeverluste erfordert also eine stärkere Fokussierung auf die Verminderung von Lüftungswärmeverlusten.

Da eine nachträgliche Installation einer mechanischen Lüftungsanlage auf erhebliche Schwierigkeiten stoßen kann, wird hier ein zentrales Lüftungssystem für ein zu sanierendes Gebäude dadurch realisiert, dass die Luftkanalführung direkt in der Fassade liegt. Durch diese Methode können Kosten deutlich eingespart werden, falls beispielsweise die Lüftungskanäle direkt in Hartschaumplatten integriert werden. Bei dem neuartigen System, welches in Kooperation mit einem Industriepartner weiterentwickelt wird, bilden Aussparungen im Polystyrol-Dämmstoff horizon-

tale und vertikale Lüftungskanäle (*Abbildung 2*), wodurch ausgehend von einem zentralen Lüftungsgerät mit einer effizienten Wärmerückgewinnung eine Verteilung in die einzelnen Stockwerke realisiert wird. Somit sind Außenwanddurchbrüche nur für die Durchlasselemente Zu- und Abluft notwendig, Innenwanddurchbrüche entfallen komplett.

Für das vorgestellte System konnte durch die Umsetzung an einem Bestandsgebäude das hohe Potenzial einer innovativen Fassadendämmung mit integrierten Luftkanälen demonstriert werden. Es zeigte sich, dass das System ein hohes Potenzial bietet, durchzuführende Sanierungsmaßnahmen umzusetzen und mit der Integration einer zentralen Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung zu ergänzen (siehe auch [7], [8]).

## Lösungsansätze auf Quartiersebene

### Quartier Beispiel 1: Energiekonzept Konversionsgelände Sheridan-Kaserne in Augsburg

Für das 95 ha große Konversionsgelände der ehemaligen Sheridan-Kaserne in Augsburg wurde im Rahmen eines städtebaulichen Ideenwettbewerbs vom 1. Preisträger eine Mischbebauung mit 335 Gebäuden (von insgesamt 340.000 m<sup>2</sup> Brutto-Geschoss-Fläche) konzipiert, bei der flächensparende Nutzung, Baumbestand, Windrichtung und Umweltentlastungen Berücksichtigung fanden. Auf dieser Basis erfolgten Untersuchungen zu nachhaltigen Gesamtkonzepten mit Szenarien zur Energieeffizienz der Gebäude und zu regenerativen Wärmeversorgungszenarien. Dabei wurden auch innovative Lösungen zu zentralen und dezentralen Versorgungskonzepten betrachtet. Neben den Energiebilanzen wurden auch die CO<sub>2</sub>-Äquivalent-Emission und die ökonomische Bewertung sowie deren Sensitivitäten evaluiert. In der Gesamtbetrachtung stellten für diesen Standort die gemeinsame Grundwassernutzung durch ein Kaltwassernetz mit dezentralen Kompressionswärmepumpen und ein Niedertemperatur-Nahwärmenetz mit hydrothormaler Wärme oder Grundwassernutzung in Verbindung mit Absorptionwärmepumpen interessante Optionen dar. Hierbei werden nur geringe lokale Emissionen

frei. Eine ökologisch interessante Lösung ist Fernwärme aus einem Hackschnitzel-ORC-Heizkraftwerk, bei der durch die gleichzeitige Erzeugung von Wärme und Strom in einer sogenannten Wärmekraftkopplung (KWK)-Anlage eine sehr günstige CO<sub>2</sub>-Bilanz entsteht. Diese Anlage sollte jedoch aus technischen und ökonomischen Gründen weitere Stadtteile mitversorgen.

### Quartier Beispiel 2: CO<sub>2</sub>-neutrale Quartiersentwicklung in Oberzwehren

Gegenstand des Projekts ist die Entwicklung eines Energiekonzepts zur Vorbereitung eines ökologischen Baugebiets mit hoher städtebaulicher und architektonischer Qualität, indem auch innovative energetische Lösungen umgesetzt werden. Inhalt des Forschungsvorhabens ist die Erstellung einer Potenzialanalyse für das Bebauungsgebiet Oberzwehren zur möglichst energieeffizienten und niedrigexergetischen<sup>1</sup> Wärmeversorgung der geplanten Gebäude. Die Wärmebereitstellung soll mit geringen Systemtemperaturen erfolgen. Die niedrigexergetische Wärmeversorgung von Siedlungsgebieten durch die Nutzung und Erweiterung vorhandener Infrastruktur wurde exemplarisch untersucht. Zudem wurde untersucht, wie sich die wünschenswerten Vorschriften rechtlich festschreiben und durch Anreize unterstützen lassen.

Bei Betrachtung des exergetischen Verhaltens der Fernwärmeversorgung ist zu erkennen, dass niedrige Vorlauftemperaturen und niedrige Rücklauftemperaturen die exergetische Effizienz der Fernwärmeversorgung erhöhen. Darüber hinaus kann sich eine weitere nutzungsbedingte Abkühlung des Fernwärmerücklaufs auf das Fernwärmegesamtsystem positiv auswirken. Für die Untersuchung zur Gewährleistung der Komfortbedingungen wurden die kältesten Temperaturen des Jahres mit dem schlechtesten, in dieser Studie betrachteten, Gebäudestandard (EnEV 2009-Dämmstandard) angenommen. Selbst mit einer Versorgungstemperatur von 50 °C werden komfortable Raumtemperaturen erzielt.

1 **Exergie** bezeichnet den Teil der Gesamtenergie eines Systems oder Stoffstroms, der Arbeit verrichten kann, wenn es in das thermodynamische (thermische, mechanische und chemische) Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird. Exergie basiert auf einem Potenzial zwischen mindestens zwei Zuständen, wobei einer davon meist der Umgebungszustand ist.

### Quartier Beispiel 3: München Ackermannbogen

Auf dem Konversionsgelände der Waldmann-Stetten-Kaserne in München liegt das neue Wohngebiet „Am Ackermannbogen“. Für den nordwestlichen Bereich, ein Gebiet mit großen Geschosswohnungsbauten und mehreren Stadthäusern wurde eine solare Nahwärmeversorgung errichtet.

In diesem Quartier werden über 30.000 m<sup>2</sup> Wohnfläche mit Solarwärme zum Heizen und für Brauchwasser versorgt. Knapp 3000 m<sup>2</sup> Kollektorfläche liefern etwa 1000 MWh Wärme in einen 6000 m<sup>3</sup> großen und gut wärmegeprägten Heißwasserspeicher, der in einen Hügel in der Parkanlage neben dem Wohngebiet eingebaut ist. Über ein Nahwärmenetz werden die einzelnen Gebäude versorgt. Neben der Konstruktion des saisonalen Wärmespeichers wurde als weitere Innovation eine direkte hydraulische Kopplung von Nahwärmenetz und Heizsystem in den Gebäuden eingesetzt. Durch serielle Verschaltung von Radiatoren, Fußbodenheizung und Frischwasserstationen in jeder Wohnung konnte eine hohe Temperaturspreizung im Nahwärmenetz erreicht werden. Bei einem Vorlauf von 60 °C konnte die Rücklauftemperatur so auf nur 30 °C abgesenkt werden. Die zusätzliche Wärmeversorgung über den solaren Anteil hinaus erfolgt durch eine mit der städtischen Fernwärme angetriebene Absorptionswärmepumpe, die den Speicher als Niedertemperaturreservoir nutzt und bis auf etwa 15 °C auskühlen kann.

Grundsätzlich bietet das Konzept der solaren Nahwärme mit saisonalem Wärmespeicher die Chance, Solarenergie zu einem Deckungsanteil von über 50 % zur Gebäudeheizung und Brauchwarmwasserbereitung zu niedrigen solaren Wärmekosten bereit zu stellen. Geht man von dem in den Leitstudien des Bundesumweltministeriums angesetzten Wachstum für solarthermische Anlagen aus, muss diese Technik zukünftig nicht nur im Neubau, sondern auch im Gebäudebestand eingesetzt werden. Hierfür besteht allerdings noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

### Quartier Beispiel 4: Energiemanagement

Energiemanagement im Quartier wird zunehmend wichtiger: Neue Smart Metering Systeme liefern die Daten der Energieströme in Echtzeit und können sowohl zur Systemdiagnose, wie auch zur Betriebsoptimierung genutzt werden. Im Rahmen des vom Bundeswirtschaftsministerium geförderten Projekts DEMAX wurde ein offenes „OpenMuc“<sup>2</sup>-System entwickelt, das die Integration von Zählersystemen und BHKW-Systemen gestattet. Für die Betriebsführung kam ein lokaler Einsatzoptimierer zum Einsatz, der auf Basis flexibler Tarifierungen die Speicherbewirtschaftung managt. Dabei wurde auch der lokale Netzzustand berücksichtigt, indem eine lokale Preiskomponente genutzt wurde. Die Visualisierung der Prozesse und das Feedback System geschah mittels Standard-Internettechnik mit einem Webserver.

## Lösungsansätze auf Stadtebene

### Stadt Beispiel 1: Regionale Energieversorgung für die Stadt Felsberg

In Felsberg konnte über die Erschließung verschiedener Datenquellen eine Aussage über den Energieträgereinsatz in der Gemeinde getroffen werden. Es wurden Erdgas und Heizöl als die zwei Hauptenergieträger ermittelt. Aus den sich hieraus ergebenden Anlagentechniken in Verbindung mit der erstellten Gebäudekategorisierung konnte der Endenergiebedarf für Gebäudeheizung und Warmwasserbereitung ermittelt werden. Die so ermittelten Daten decken sich mit dem auf Basis der Gebäudetypologie [6] berechneten Endenergiebedarf.

Aufbauend auf den Potenzialanalysen wurden detaillierte Maßnahmenzenarien für die Stadt Felsberg entwickelt. Diese Szenarien beziehen sich auf bautechnische Sanierungsmaßnahmen (z. B. Dämmung der Außenwand), den Austausch von anlagentechnischen Komponenten (z. B. Austausch von Heizkesseln) sowie den Einsatz von erneuerbaren Energien.

2 siehe Erläuterung auf S. 115, 1. Spalte, 4. Absatz



Auf Grundlage dieser Szenarien wurden mögliche Gesamtenergiebedarfsentwicklungen für die Gemeinde Felsberg ermittelt, um die Kommune für zukünftige Entscheidungen zu beraten.

Bei der Stromerzeugung wurde besonders der zeitliche Zusammenhang zwischen Erzeugung und Verbrauch beachtet und ein Ortsnetzbereich detailliert nachgebildet. Beim verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien kann Energiemanagement mit Bedarfssteuerung die Effizienz des Netzbetriebs erhöhen, indem vor Ort erzeugte Energie zeitgleich genutzt wird [7].

Die praktische Umsetzbarkeit der ermittelten Potenziale soll nun ebenfalls erprobt werden. Dabei werden mehrere Stromkunden sowie Erzeugungsanlagen mit geeigneter Technik zur messtechnischen Überwachung sowie zum Energiemanagement ausgerüstet.

#### Stadt Beispiel 2: Energieeffiziente Stadt Wolfhagen

Wolfhagen stellt sich derzeit der Aufgabe einer zukunftsfähigen Energieversorgung in den besonders relevanten Handlungsfeldern Altbausanierung, verstärkter Ausbau erneuerbarer Energienutzungen und langfristig kostengünstige Mobilität, um die stabile Entwicklung der vergangenen Jahre in Bezug auf die wirtschaftliche Entwicklung langfristig und nachhaltig in die Zukunft fortzusetzen.

Hauptziel ist die Entwicklung und Umsetzung eines städtischen Transformationsprozesses zur „Energieeffizienten Stadt“. Folgende Handlungsschwerpunkte sollen umgesetzt werden:

**Reduktion des Energiebedarfs** im Bilanzraum „Kommunales Gemarkungsgebiet“ über Effizienzmaßnahmen

- energetische Gebäudesanierung
- energieeffiziente Mobilität
- nutzerorientierte Dienstleistungen und Information

**Optimierung der Energieversorgung** im Bilanzraum über alternative Versorgungssysteme

- Ausbau von dezentralen Energietechnologien
- KWK
- Smart Grid
- Abgleich Bedarfs- und Versorgungsstrukturen

**Abbau von Hemmnissen** bei der Planung und Umsetzung von innovativen Maßnahmen

- Raumordnung
- Finanzierung
- Know-How-Transfer
- Qualifikation

Das Projektkonsortium, das gemeinsam an der Umsetzung dieser Ziele arbeitet, verbindet die Kompetenzen und Fachdisziplinen aus Forschung, kommunalen Vertretern und Kommunikationsfachleuten, so dass ein umfassender Dialog- und Transformationsprozess in Wolfhagen angestoßen wird.

#### Stadt Beispiel 3: Stadt mit Energieeffizienz Stuttgart

Ein Ziel für die Entwicklung einer zukunftsfähigen Gesellschaft ist neben ökonomischem Wohlstand und sozialer Wohlfahrt der Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung. Mit dem Projekt „Stadt mit Energieeffizienz“ (SEE Stuttgart) sollen diese Ansätze vorangetrieben werden und in einer Strategie für die ganze Stadt münden.

Das Projekt SEE verfolgt dazu folgende Ziele:

1. Entwicklung eines makroskopischen Bilanzmodells
2. Entwicklung eines mikroskopischen Strategiemodells
3. Identifizierung von Optimierungspotenzialen
4. Erstellung einer Road Map Energie bis zum Jahr 2050
5. Umsetzung identifizierter Maßnahmen
6. Evaluierung der Maßnahmen und Erfolgskontrolle

Das Projekt SEE unterstützt so eine systematische Herleitung kommunaler Strategien zur Ressourceneinsparung, die Auswahl geeigneter Maßnahmen und das Monitoring ihrer Wirksamkeit. SEE sieht im Sinne einer Langzeitentwicklung und einer Lebenszyklusbetrachtung eine Betrachtung der energetischen Prozessketten im gesamten Stadtgebiet vor.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die Realisierung des Energiekonzeptes auf Stadt- und Quartiersebene erfordert ein starkes Engagement im Bereich der Sanierung von Bestandsgebäuden. Dazu ist eine aktive Einbindung der Bürgerinnen und Bürger vor Ort in Beteiligungsprozessen unabdingbar für den Erfolg von allen Maßnahmen. Es stellt sich heraus, dass sich die vereinbarten Ziele zur Energieeinsparung nur über den Weg der Sanierung erreichen lassen – die Energieeffizienz ist hier die größte „Energiequelle“. Allerdings stellt die Integration erneuerbarer Energien in unsere bestehende Versorgungsinfrastruktur noch große Herausforderungen dar.

Die in diesem Beitrag beispielhaft vorgestellten und umgesetzten Maßnahmen zur Energieeinsparung zeigen durch neue und innovative Lösungen, vor allem im Sanierungssektor, noch viel Steigerungspotenzial auf. Für eine maximale Effizienz ist es in Zukunft wesentlich, Synergien zu erzeugen und vorhandene Teilsysteme integral zu betrachten und zu verbinden. Nur auf diesem Wege wird es möglich sein, die bis 2050 vorgegebenen Ziele auch wirklich zu erreichen.

- [4] Luther, G, Altgeld, H: Integrierte außenliegende Wandheizung – ein Verfahren zur Nutzung der massiven Außenwand als ein in ein Gebäudeheiz- und Kühlsystem integrierter thermischer Speicher und als Murokauten-Wärmeübertrager, 2008, G. Luther: Patentanmeldung DE 10 2008 009 553.2
- [5] Gintars, D.: Gebäude sanieren – hochdämmende Großelemente, BINE Projektinfo 04, 2008, FIZ Karlsruhe, ISSN 0937-8367
- [6] Deutsche Gebäudetypologie – Systematik und Datensätze, Institut Wohnen und Umwelt, 2. Auflage, Dez. 2003/ ISBN-Nr.: 3-932074-64-5/IWU-Bestell-Nr. 05/03
- [7] Heckmann, W., Berg, A., Degner, T.: Intelligent Local Grids for High PV Penetration, ISES Solar World Congress, Kassel, 28.08.–02.09.2011
- [8] Paul, E.: Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung in Einfamilienhäusern, 4. OTTI Fachforum Innovative Wohnungslüftung
- [9] Maas, A., Oppermann, J., Kaiser, J.: SynergieHaus Energetische Analyse und Bewertung von SynergieHäusern, Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung, Kassel, 2000

## Literatur

- [1] Bundesregierung: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, Sept. 2010, Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, Berlin
- [2] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Endenergieverbrauch nach Anwendungsbereichen I, 2011, Energiedaten Tabelle 7, BMWi, Berlin, <http://bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/Energiedaten/energiegewinnung-und-energieverbrauch5-eev-nach-anwendungsbereichen,property=blog,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.xls>
- [3] Luther, G, Altgeld, H: Die außen liegende Wandheizung, Gesundheitsingenieur 123, 2002, S. 8–15

## ■ Ökonomische Konversionsprozesse

- Transformation des bundesdeutschen Strommarkts zur dezentralen Regenerativwirtschaft
- Änderung von Rahmenbedingungen für neue Anreizmodelle, Wärmegesetze, Gebäudesanierung

# Transformation des bundesdeutschen Stromsystems zur dezentralen Regenerativwirtschaft



**IZES**

Prof. Dr. Uwe Leprich  
leprich@izes.de

**Fraunhofer IWES**

Norman Gerhardt  
norman.gerhardt@iwes.fraunhofer.de

**ZSW**

Prof. Dr. Frithjof Staïß  
frithjof.staiss@zsw-bw.de

**Fraunhofer ISE**

Gerhard Stryi-Hipp  
gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de

## „Marktintegration“ der Erneuerbaren?

In den letzten Jahren war häufig davon die Rede, dass die erneuerbaren Energien „erwachsen“ würden und sich in „den Markt“ integrieren müssten. Der Schutzzaun um sie herum müsse fallen, und sie müssten die Herausforderung annehmen, im Wettbewerb zu bestehen.

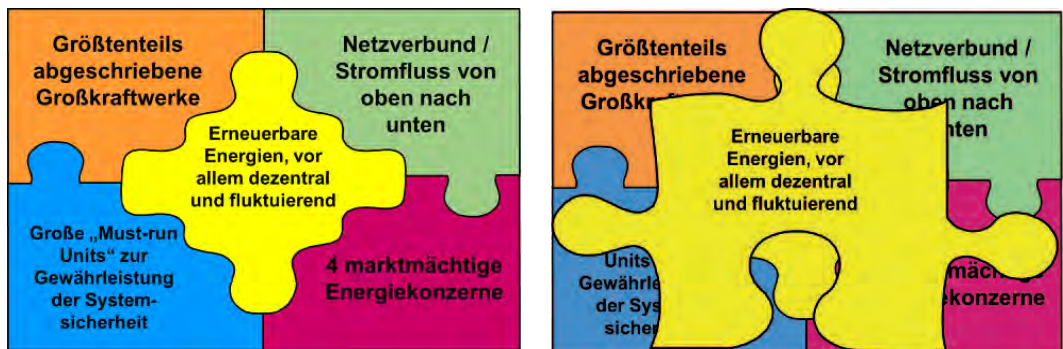
Jeder, der sich mit der Elektrizitätswirtschaft näher beschäftigt, weiß, dass es keinen „Strommarkt“ gibt, der nach den gleichen Kriterien funktionieren würde wie beispielsweise der Biermarkt. Vielmehr handelt es sich um einen hochkomplexen Sektor mit vielen Teilmärkten und einzelnen Segmenten, die ausdrücklich vom Wettbewerb ausgenommen sind. Insofern war die Forderung nach einer „Marktintegration“ der Erneuerbaren eher der Grundstimmung geschuldet, sich hier nicht zu weit von der dominanten Logik der Mainstream-Ökonomie zu entfernen, als dem überzeugenden Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit und Vorteilhaftigkeit einer solchen „Integration“.

Seit dem Ausbruch der globalen Finanzkrise 2008 haben immer mehr Ökonomen die naive Sicht auf funktionierende, effiziente Lehrbuchmärkte

hinter sich gelassen und die Sinnhaftigkeit staatlicher Interventionen wieder entdeckt. Aber völlig unabhängig vom Ende einer gewissen globalen Marktreligiosität gab es immer schon gute Gründe, den Status Quo des bundesdeutschen Elektrizitätssektors nicht mit der Elle eines Lehrbuchmarktes zu messen:

- Die Mehrzahl der bestehenden Großkraftwerke, die das aktuelle Stromangebot dominieren, sind gerade nicht unter Wettbewerbsbedingungen entstanden, sondern wurden vor der Liberalisierung quasi risikolos errichtet und über die Strompreise refinanziert.
- Viele dieser Kraftwerke hatten mit Einführung der Strombörse im Jahr 2000 ihre Kapitalkosten bereits vollständig erwirtschaftet und fahren seither im „goldenen Ende“.
- Die Systemsicherheit wird in erster Linie durch Großkraftwerke garantiert, die angedrosselt gefahren werden und als „Must-run“-Anlagen derzeit nicht ersetzbar sind.
- Die bestehenden Stromnetze ermöglichen im Großverbund den reibungslosen Stromfluss von oben nach unten. Ein bidirektionaler Stromfluss, der für die gleichberechtigte Marktteilhabe der Erneuerbaren notwendig ist, war bislang nicht vorgesehen.
- Die Dominanz und Marktmacht der vier großen Energiekonzerne ist erst im Januar dieses

Abbildung 1  
„Marktintegration“ erneuerbarer Energien zwischen Wunschenken und Realität



Jahres erneut vom Bundeskartellamt bestätigt worden; Grundlage dafür ist der Besitz der Großkraftwerke sowie zahlreiche Beteiligungen an Stadtwerken als Verteilernetzbetreiber und Vertriebsunternehmen (vgl. Bundeskartellamt 2011).

Es wäre angesichts dieser Sektorspezifika schon arger Zufall, wenn sich der massive Zubau erneuerbarer Energien – und hier vor allem der der fluktuierenden Erneuerbaren – wie ein fehlendes Puzzleteil in das bestehende Stromsystem einfügen ließe (Abb. 1).

Immer deutlicher zeigen sich auch Widersprüche zwischen dem bestehenden System und dem Zuwachs insbesondere der fluktuierenden erneuerbaren Energien (FEE) wie Wind und Solar:

- Börsenpreise und FEE-Einspeisung sind negativ korreliert („Merit Order Effekt“), d. h., die Preise am Spotmarkt sinken, wenn der Wind weht und die Sonne scheint.
- Konventionelle Großkraftwerke (Atom, Kohle) sind nicht flexibel genug, um die FEE zu flankieren. Zeitweise zahlen die FEE bereits dafür, dass ihr Strom abgenommen wird („negative Börsenpreise“).
- FEE müssen trotz Vorrangregelung abgeregelt werden, wenn die Systemsicherheit, die durch große „Must-run“-Kraftwerke gewährleistet wird, gefährdet ist („Engpassmanagement“).

Vor diesem Hintergrund würde „Marktintegration“ der erneuerbaren Energien bedeuten, sich den Funktionsmechanismen des bestehenden Stromsystems unterzuordnen, die die Rationalität eines Großverbands auf der Basis von fossilen und nuklearen Großkraftwerken widerspiegeln. Dem politisch gewünschten Ausbau der erneuerbaren Energien würden dadurch sehr enge Grenzen gesteckt.

## Zur Rationalität einer grundlegenden Systemtransformation

In einem vollständig erneuerbaren Stromsystem geht es letztlich um einen optimierten Mix zwischen regelbaren und fluktuierenden, zentralen und dezentralen sowie heimischen und importierten erneuerbaren Energien in Kombination mit einer deutlichen Erhöhung der Systemeffizienz. Flankiert wird das System durch „Ausgleichsoptionen“ wie konventionelle Kraftwerke, Speicher oder die Einbeziehung der Verbraucher mittels Lastmanagement-Maßnahmen (Abb. 2).

Es zeichnet sich heute ab, dass dieses System zumindest in Deutschland sehr stark von dezentralen FEE-Anlagen geprägt werden wird. Das bedeutet letztlich, dass sich alle anderen System-

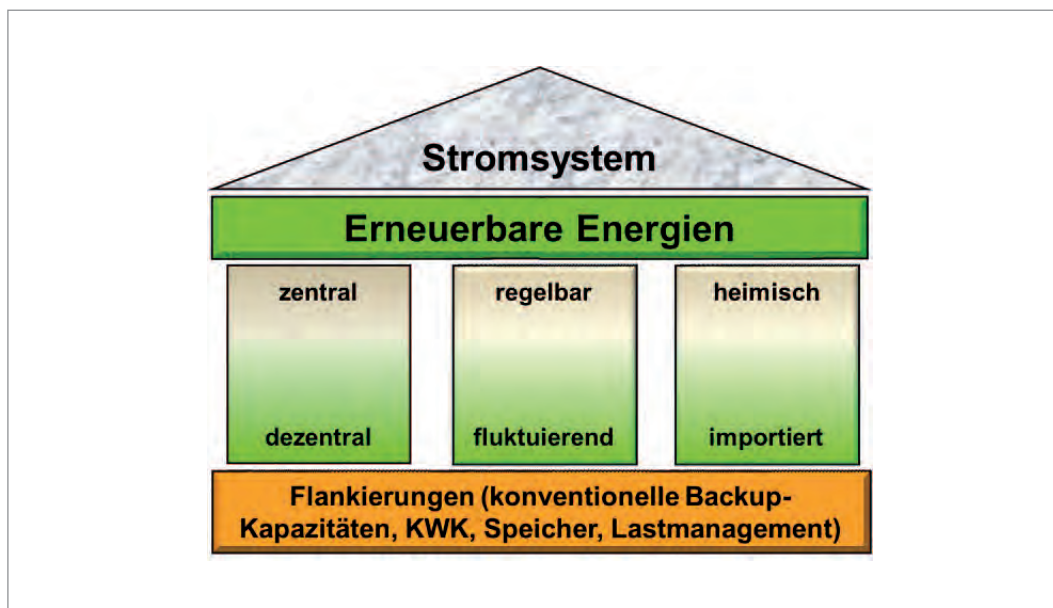


Abbildung 2  
Das künftige Stromsystem auf der Basis erneuerbarer Energien

optionen dem Dargebot von Wind und Solar anpassen und insofern ein Höchstmaß an Flexibilität aufweisen müssen. Daher geht es künftig weniger um eine „Integration“ der Erneuerbaren in das bestehende, relativ inflexible System, als vielmehr um eine grundlegende Veränderung des Systems um die Erneuerbaren herum, also um eine Systemtransformation.

Wesentliche Eckpfeiler einer solchen Systemtransformation sind:

- Maximale Flexibilisierung der bestehenden konventionellen Kraftwerke; rasche Stilllegung inflexibler Anlagen
- Neubau nur von solchen fossilen Kraftwerken, die die notwendigen Flexibilitätsanforderungen erfüllen
- Reduzierung und in der Perspektive Ablösung der Großkraftwerke als notwendige „Must-run“-Anlagen; Entwicklung eines dezentralen Systemausgleichs
- Optimaler Ausbau der FEE-Anlagen im Hinblick auf die Nachfragelast und ihre gemeinsamen Ausgleichseffekte
- Aufbau von „Smart Grids“ in Verbindung mit Lastmanagement
- Ausreichender Ausbau der Stromnetze.

Darüber hinaus gilt es, die Marktmacht der Energiekonzerne weiter abzubauen und einen breiten energiewirtschaftlichen Mittelstand zu etablieren, der die Dezentralität des künftigen Systems auf Dauer absichert.

## Robuste Schritte für die anstehende Systemtransformation

Ausgehend von den oben identifizierten Eckpfeilern der Systemtransformation lassen sich für die Bereiche Stromerzeugung, Stromnetze und Systemstabilität/Systemdienstleistungen einige robuste Schritte benennen, die in der aktuellen Situation in jedem Fall sinnvoll sind und den Aufbau einer dezentralen Regenerativwirtschaft unterstützen:

### a) Erzeugung

- Weitere Absicherung des Ausbaus erneuerbarer Energien durch ausreichende Investitionssicherheit für die Investoren
- Absicherung des Ausbaus der Kraft-Wärme-Kopplung als effiziente Option zur Flankierung der fluktuierenden Erzeugung
- Unterstützung des Neubaus von flexiblen Gaskraftwerken durch z. B. rasche Genehmigungsverfahren und Vorbereitung der Infrastruktur an bevorzugten Standorten.

### b) Netze

- Ausbau und Verstärkung des Übertragungsnetzes, Ergänzung durch ein HGÜ-Overlay-Netz für zusätzlichen Nord-Süd-Ausgleich
- Verstärkung der Verteilernetze in Gebieten mit hoher Wind- und/oder PV-Nutzung
- engere Kooperation bei der Bewirtschaftung von Verteilernetzen; Implementierung von Netzintelligenz zur Verbesserung der Steuerungsfähigkeit dezentraler Optionen

### c) Systemstabilität/Systemdienstleistungen

- Öffnung der Regelenergiemärkte für regelbare erneuerbare Energien und Lastmanagementbeiträge
- Dezentralisierung der Kontrollstrukturen in den Netzen, teilweise Verlagerung von Systemverantwortung auch auf die Verteilernetzebene
- weiterer Ausbau von Grenzkuppelstellen zur Stärkung des europäischen Verbunds.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass das Paradigma der Regenerativwirtschaft das künftige Stromsystem prägen wird. Insofern löst es das Paradigma der Liberalisierung ab, das seit Mitte der 90er-Jahre die bundesdeutsche Elektrizitätswirtschaft bereits stark verändert hat. Gleichwohl sollten die Grundpfeiler der Liberalisierung nicht leichtfertig aufgegeben werden, sondern es ist genau zu prüfen, welche Pfeiler sich auch in der Regenerativwirtschaft als tragfähig erweisen und welche möglicherweise an das neue Paradigma angepasst werden müssen.

Folgende Pfeiler erscheinen künftig als unstrittig:

- strikte Entflechtung der Übertragungsnetze von den Großkraftwerken
- Erhalt der Strombörse als Dispatch-Instrument
- Netzregulierung als Wettbewerbersatz im natürlichen Monopol
- Organisation administrierter Teilmärkte wie z. B. die Regenerativenergiemärkte

Als robuste Schritte zur weiteren Umsetzung des Liberalisierungs-Paradigmas können gelten:

- Verbesserung des Großhandelsmarktes
  - Verringerung des außerbörslichen Stromhandels
  - Verbesserung der Transparenz
- eigentumsrechtliche Entflechtung des gesamten Übertragungsnetzes
  - RWE und EnBW sollten E.ON und Vattenfall folgen und ihre Netze verkaufen
  - Gründung einer bundeseinheitlichen Netz AG
- Erweiterung der Anreizregulierung um eine
  - Qualitätsregulierung mit Dezentralität als eigener Qualität
  - Innovationsregulierung

Neu zu überdenken ist die häufig geforderte rigide Entflechtung auch der Verteilernetze von (dezentraler) Erzeugung und Vertrieb, die Angemessenheit der Zubausignale durch die Strombörse, die Netzregulierung im Zeichen von Innovationen sowie eine mögliche wettbewerbliche Organisation von saisonalen Ausgleichsoptionen.

Die Harmonisierung der beiden bislang parallel verlaufenen Paradigmenwechsel wirft eine Reihe weiterer Fragen auf, für die es bislang keine ausreichenden Antworten gibt:

#### a) Zur Liberalisierung

- Erzeugung: Lässt sich der Zubau von Kapazitäten in einem grenzkostenorientierten Preisregime grundsätzlich sicherstellen?
- Netze: Wie sieht eine Qualitäts- und Innovationsregulierung aus, die den langfristigen Netzerfordernissen Rechnung trägt?
- Systemdienstleistungen: Wie dezentral ist eine ökonomisch sinnvolle dezentralisierte Kontrollstruktur im Netz zur Erfüllung der Ansprüche an die Versorgungssicherheit?

#### b) Zur Regenerativwirtschaft

- Erzeugung: Welches sind kurz-, mittel- und langfristig die ökonomisch und ökologisch sinnvollsten Optionen zur Flankierung der fluktuierenden erneuerbaren Energien? Erstellung einer entsprechenden Roadmap.
- Netze: Wie sieht eine ökonomisch optimierte Netzstruktur für die 100%-erneuerbare-Energien-Welt aus?
- Systemdienstleistungen: Was bedeutet Systemsicherheit in der 100%-erneuerbare-Energien-Welt? Ist es die gleiche einheitliche Art von Systemsicherheit wie die heutige?

Insgesamt lässt sich konstatieren, dass der überlappende Paradigmenwechsel zumindest während der Transformationsphase einer Reihe von Herausforderungen begegnet, die sich nicht allein durch Vertrauen auf die bisherigen Teilmärkte des Stromsektors bewältigen lassen. Es ist offensichtlich, dass dem Staat hierbei wieder eine größere Rolle zukommt

- bei der Weiterentwicklung der bisherigen institutionellen Arrangements,
- bei der Gewährleistung von Versorgungssicherheit
- der zügigen Ausräumung von Inflexibilitäten im bestehenden System.

## Fazit

- Die fluktuierenden erneuerbaren Energien (FEE) werden das künftige Stromsystem prägen.
- Alle anderen Systemelemente müssen sich dieser Rationalität unterordnen; d. h., es geht nicht um eine „Marktintegration“ der Erneuerbaren in ein an sich schon gut funktionierendes System, sondern um eine grundlegende Systemtransformation.
- Das Paradigma der Liberalisierung muss sich dem neuen Paradigma der Regenerativwirtschaft anpassen und ggf. einzelne Elemente revidieren.
- Zur Harmonisierung der beiden bislang parallel verlaufenen Paradigmenwechsel sind noch eine Reihe grundlegender Fragen zu beantworten.

Letztlich wird man nicht umhin kommen, das EEG und das Energiewirtschaftsgesetz in ein konsistentes Energiesektorgesetz zu integrieren.

## Literatur

Bundeskartellamt: Sektoruntersuchung Stromerzeugung – Stromgroßhandel, Bericht gemäß § 32e Abs. 3 GWB, Bonn, Januar 2011

IZES: Systemintegration von Erneuerbaren Energien durch Nutzung von Marktmechanismen im Stromsektor, Studie im Auftrag des BMU, Saarbrücken, Oktober 2011 (noch unveröffentlicht)

Leprich, Uwe: Systemtransformation statt Systemintegration: auf dem Weg zu einem zukunftsfähigen Stromsystem, in: Dietmar Schütz und Björn Klusmann (Herausgeber): Die Zukunft des Strommarktes, Anregungen für den Weg zu 100 Prozent Erneuerbare Energien, Ponte Press Bochum 2011, S. 91–114



# Änderung von Rahmenbedingungen für neue Anreizmodelle, Wärmegesetze, Gebäudesanierung

## Einleitung

„Auf den Gebäudebereich entfallen rund 40 % des deutschen Endenergieverbrauchs und etwa ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Gleichzeitig sind die Potenziale zur Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung gewaltig.“ konstatiert die Bundesregierung in ihrem Energiekonzept vom September 2010 [1]. Zu Recht wird daher gerade dem Einsatz von Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich ein sehr großes Potenzial beigemessen. Das spiegelt sich auch in den ehrgeizigen Zielsetzungen des Energiekonzepts wider: Bis 2020 soll der Wärmebedarf von Gebäuden um 20 % reduziert werden. Das Langfristziel für 2050 ist ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand<sup>1</sup>, was durch die Reduktion des Primärenergieeinsatzes in Gebäuden um 80 % erreicht werden soll. Zentrales Element ist dabei die Anhebung der energetischen Sanierungsrate auf 2 % des Gebäudebestands pro Jahr. Hand in Hand mit dieser deutlichen Reduktion des Endenergiebedarfs für Wärme muss der Ausbau erneuerbarer Energien erfolgen.

## Gegenwärtige Zielsetzungen und deren Auswirkung

Einen gangbaren Weg zur Umsetzung ambitionierter Ziele zeigt das Basisszenario 2010 A aus der Leitstudie 2010 für das Bundesumweltministerium (siehe *Abbildung 1*) [2]. Es beschreibt eine in sich konsistente und kostenoptimierte Entwicklung, welche bis zum Jahr 2050 zu einer Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % gegenüber dem Referenzjahr 1990 führt. Bis 2050 werden demgemäß 360 TWh Wärme aus erneuerbaren

<sup>1</sup> Klimaneutral heißt, dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt wird [1].

Energien bereitgestellt, was einem Anteil von 53 % am gesamten zukünftigen Wärmemarkt entspricht.

Zur Umsetzung dieser Ziele reicht jedoch die bereits erfolgte Implementierung insbesondere von ordnungsrechtlichen Instrumenten, wie der Energieeinsparverordnung (EnEV) nicht aus. Die EnEV setzt nur Mindesteffizienzstandards für den Neubau und bei größeren Sanierungsmaßnahmen im Bestand. Das konzeptionell auf den Neubau ausgerichtete Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) gibt nur eine anteilige Nutzungspflicht für erneuerbare Energien vor. Beide Instrumente zeigen zwar vorrangig Wirkung im Neubaubereich, dieser macht aber nur etwa 0,6 % des Gebäudebestands aus. Somit wird der allergrößte Teil des Gebäudesektors von diesen Instrumenten nicht bzw. kaum erfasst.

Die Wirksamkeit der EnEV im Neubau wird aber dadurch verstärkt, dass die Möglichkeit der Nutzung zinsvergünstigter Darlehen der Kreditanstalt für Wiederaufbau vom erreichten Energieverbrauchswert abhängig ist und somit eine Motivation zur Übererfüllung der EnEV im Neubausektor gegeben ist. Zusätzlich ergibt sich hier noch eine komplementäre Wirkung des EEWärmeG, das als Option zur „ersatzweisen Erfüllung“ die Übererfüllung der EnEV-Standards um 15 % vorsieht. Etwa die Hälfte der Neubauten nimmt aktuell diese Möglichkeit in Anspruch [3].

Für den Einsatz erneuerbarer Energien besteht flankierend zu den ordnungsrechtlichen Vorgaben ein komplementärer Fördermechanismus über das Marktanreizprogramm (MAP), das einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien im Wärmemarkt auf 9,5 % bzw. 136,1 TWh in 2010 geleistet hat (*Abbildung 2*). Hier sei darauf hin gewiesen, dass ein Großteil der in *Abbildung 2* zwischen 2008 und 2010 dargestellten Steigerung vor allem auf eine veränderte statistische Erfassung der biogenen Anteile des Abfalls zurückzuführen ist und



### ZSW

Maïke Schmidt  
maïke.schmidt@zsw-bw.de

### DLR

Michael Nast  
michael.nast@dlr.de

Nils Roloff  
nils.roloff@dlr.de

Kristina Nienhaus  
kristina.nienhaus@dlr.de

### IZES

Juri Horst  
horst@izes.de

### Fraunhofer IBP

Prof. Dr. Gerd Hauser  
gerd.hauser@ibp.fraunhofer.de

### Fraunhofer ISE

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

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

### Uni Würzburg

Thorsten Müller  
thorsten.mueller@jura.uni-wuerzburg

Abbildung 1  
Entwicklungspfad im  
Wärmesektor gemäß  
Leitstudie 2010

Quelle: Leitstudie 2010  
[2]

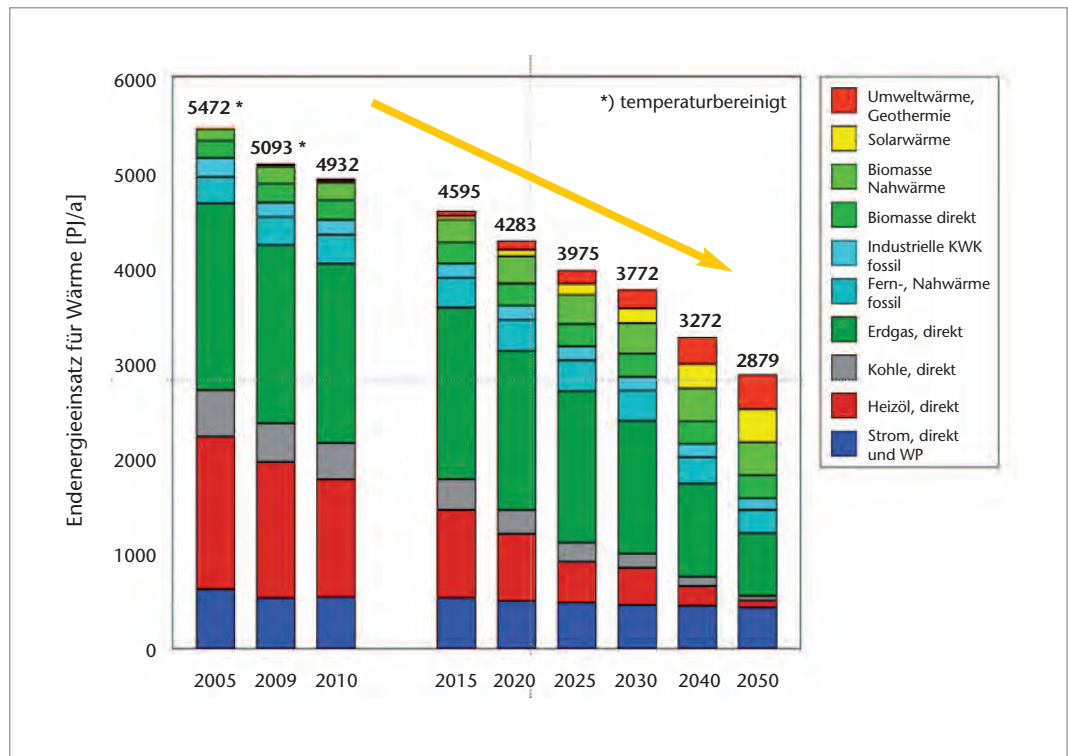
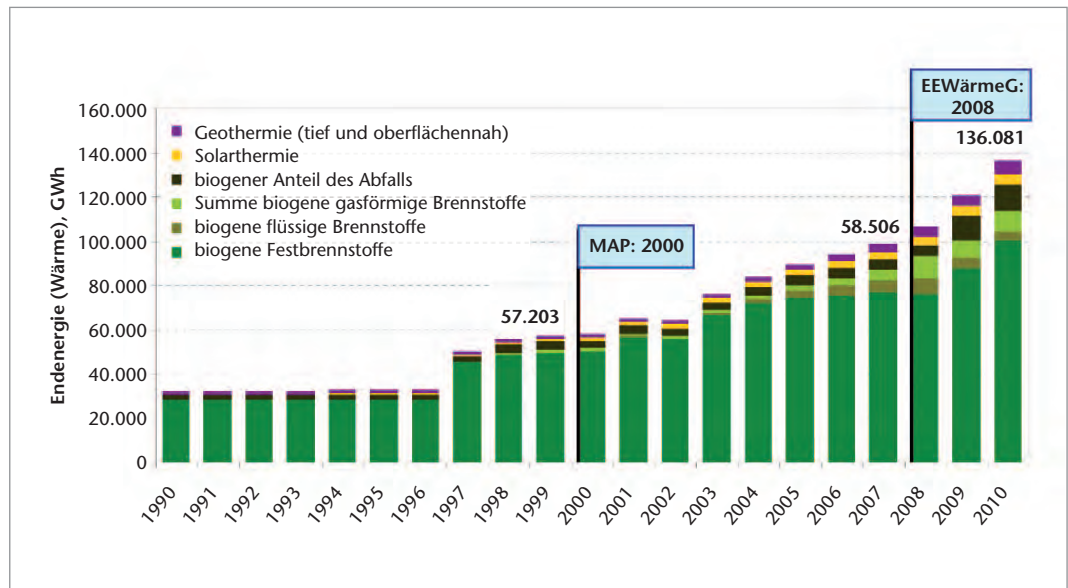


Abbildung 2  
Entwicklung  
erneuerbarer Energien  
im Wärmemarkt von  
1990 bis 2010 [4]



weniger auf eine durch das EEWärmeG ausgelöste Dynamik, wie *Abbildung 2* auf den ersten Blick eventuell zu suggerieren vermag.

Zum Erreichen der im Energiekonzept 2050 formulierten und in den Eckpunkten zur Energiewende im Sommer 2011 [5] bestätigten Zielsetzungen für den Wärmesektor hinsichtlich der Effizienz und des Einsatzes erneuerbarer Energien

genügt ein alleiniges Fortführen dieser Entwicklungen jedoch nicht.

Die Einleitung der notwendigen Transformation des Energiesystems im Wärmesektor verlangt sowohl neue technologische Konzepte, als auch die Auswahl geeigneter Instrumente um die erforderliche Entwicklungsdynamik auf nationaler Ebene anzustoßen.

## Technologische Konzepte

Im Neubaubereich gibt die Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden klar die Richtung vor: Ab dem 31. Dezember 2020 müssen alle Neubauten Niedrigstenergiehäuser sein. Für öffentliche Gebäude gilt dies bereits drei Jahre früher.

Um diesen Standard zu erreichen, sind zum einen neue Dämmstoffe für die Gebäudehülle zu entwickeln bzw. die bereits heute zum Erreichen des Passivhausstandards eingesetzten Materialien weiterzuentwickeln. Für den verbleibenden Energiebedarf der Gebäude bieten sich häufig Verknüpfungen mehrerer erneuerbarer Energiequellen als intelligente Lösung an. Über den Einsatz von Photovoltaik beispielsweise in Kombination mit einer Wärmepumpe und oberflächennaher Erdwärme oder auch in Kombination mit Solarthermie können Niedrigstenergiehäuser zu Plus-Energie-Häusern werden, die dann mehr Energie bereitstellen, als sie für ihre eigene Versorgung benötigen.

Auch im Gebäudebestand kann durch entsprechende Sanierungsmaßnahmen in einigen Fällen ein ähnliches Niveau erreicht werden, flächendeckend ist dies jedoch nicht umsetzbar. Um sich hier dem Ziel des klimaneutralen Gebäudebestands bis 2050 sukzessive anzunähern, ist die Entwicklung so genannter intelligenter Sanierungskonzepte unabdingbar. Diese orientieren sich weniger an einzelnen Objekten als an größeren Einheiten wie Quartieren oder Stadtvierteln. Ein räumlich weiter gefasster Ansatz eröffnet neue Perspektiven für Nahwärmenetze, die aus mehreren Wärmequellen gespeist werden können. Im Bereich der erneuerbaren Energien können dies solarthermische Großanlagen (auch mit Langzeitwärmespeichern), Biomasse-Blockheizkraftwerke (feste Biomasse oder Biogas), tiefergeothermische Wärme oder Kombinationen aus den genannten Quellen sein. Ebenso können bereits vorhandene industrielle Abwärmequellen genutzt werden. Eine weitere Option kann auch die Verlegung eines „kalten“ Nahwärmenetzes<sup>2</sup> sein, dass auf Basis von oberflächennaher Geothermie ggf. in Kombination mit Solarthermie ein Wärme-medium für die in den angeschlossenen Häusern vorhandenen Wärmepumpen bereitstellt.

Technologie- und Konzeptentwicklung ist insbesondere für die Wirtschaftlichkeit der aus Sicht des Klimaschutzes zwingend erforderlichen Transformation von entscheidender Bedeutung. Für die tatsächliche Umsetzung jedoch gegebenenfalls noch wesentlich entscheidender ist die Setzung der richtigen Rahmenbedingungen auf nationaler Ebene. Hier ist die Politik gefragt, zukünftig aktiv ihren Gestaltungsspielraum zu nutzen und nicht mehr nur die Umsetzung der Beschlüsse der EU-Kommission in nationales Recht zu vollziehen.

## Politische Instrumente und Rahmenbedingungen

Zukünftig ist ein deutlich umfassenderer Ansatz bei der Auswahl von Förderinstrumenten zu wählen, da energetische Gebäudesanierung und der Ausbau erneuerbarer Energien zur Wärmebereitstellung Hand in Hand gehen müssen. Demzufolge sind die bestehenden Förderinstrumente weiterzuentwickeln und besser auf einander abzustimmen.

Denn trotz sichtbarer Erfolge – beispielsweise eine durchschnittliche Zubaurate erneuerbarer Energien von etwa 7 TWh/a (siehe *Abbildung 2*), die bei konsequenter Fortführung zumindest bis 2020 ausreichen würde, um die Ziele des Nationalen Aktionsplans Erneuerbare Energien [6] zu erfüllen – weisen schon die bestehenden Förderinstrumente deutliche Defizite auf, so dass eine zukunftsorientierte Weiterentwicklung unbedingt notwendig ist.

*Abbildung 3* gibt einen Überblick über die heute genutzten Instrumente in Bezug auf eine Förderung der Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmesektor ebenso wie mit Blick auf die energetische Sanierung von Gebäuden:

- Einerseits gibt es die budgetabhängigen Instrumente Marktanzreizprogramm und
- 2 Ein „kaltes“ Nahwärmenetz ist ein Nahwärmenetz in dem der Wärmetransport auf sehr niedrigem Temperaturniveau (z. B. Vorlauf/Rücklauf 20 °C/15 °C und weniger) betrieben wird. Wärmeverteilungsverluste sowie Verlegekosten (durch geringere Dämmstärken bzw. weitgehenden Verzicht auf Leitungsdämmung) können so erheblich reduziert werden. Zum Anheben der niedrigen Vorlauftemperaturen auf ein nutzbares Niveau werden Wärmepumpen eingesetzt.

CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm, in denen der Staat als Geldgeber auftritt und die Gegenfinanzierung über Steuermittel oder zukünftig über den Energie- und Klimafonds erfolgt.

- Andererseits gibt es die bereits genannten Instrumente des Ordnungsrechts EnEV und EEWärmeG, wo allein der Bauherr die Erfüllung der Vorgaben sicherzustellen hat und für die entstehenden (ggf. zusätzlichen) Kosten aufkommen muss. Der Spielraum, die auferlegten gesetzlichen Pflichten an anderer Stelle auf kostengünstigere Weise zu erfüllen, ist gering. Dies kann insbesondere bei einem Instrument wie dem EEWärmeG aus volkswirtschaftlicher Sicht zu Fehlallokationen von Ressourcen führen [7].

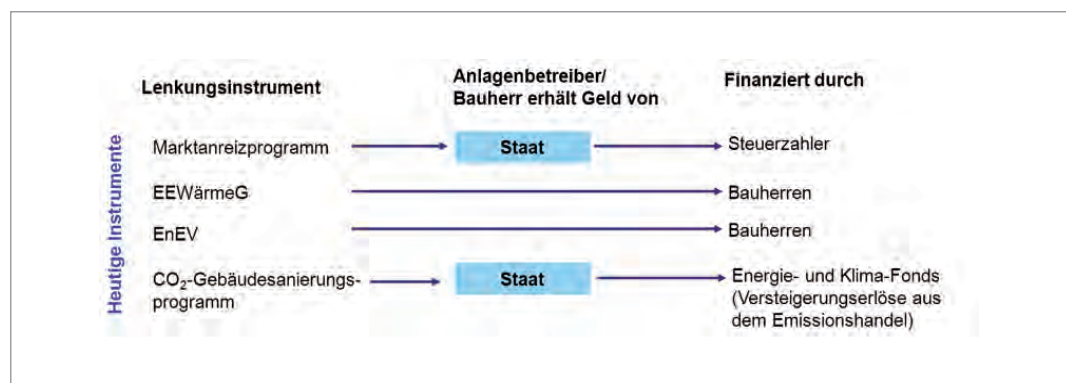
Die meisten in der Diskussion befindlichen Förderinstrumente sind bezüglich der optimalen Allokation von Ressourcen besser zu bewerten als das EEWärmeG – unabhängig davon, ob sein Anwendungsbereich auf den Altbaubestand ausgedehnt wird oder nicht. Viel Spielraum für eine Anpassung besteht jedoch nicht, da aus der Richtlinie 2009/28/EG des europäischen Parlaments und des Rates [8] grundsätzlich die Notwendigkeit folgt, die bestehende anteilige Nutzungspflicht auf einen (kleinen) Teil des Gebäudebestands auszudehnen – nämlich auf Gebäude, an denen größere Renovierungsarbeiten vorgenommen werden. Um Konflikte mit dieser Richtlinie zu vermeiden, sollte bei Realisierung eines anderen/weiteren Instruments sichergestellt werden, dass die Nutzungspflicht für neue sowie für bestehende Gebäude mit größeren Renovierungsarbeiten unangetastet

bleibt. Dies ist entweder über eine klare Abgrenzung der Anwendungsbereiche oder im Wege einer Überlappung möglich, solange die Geltung der Nutzungspflicht nicht beschränkt wird. Eine Ausweitung des Nutzungspflichtmodells auf den gesamten Gebäudebestand ist vergleichsweise konfliktträchtig und dürfte daher auf mangelnde Akzeptanz stoßen. Dieses Problem könnte zwar durch eine wahlweise zu zahlende Ersatzabgabe oder die Ermöglichung eines Gutschriftenhandels abgemildert, aber nicht vollständig beseitigt werden.

Das Marktanreizprogramm fördert technologie-spezifisch in Form von Investitionszuschüssen oder zinsverbilligten Darlehen für Investitionen in Heizsysteme auf Basis erneuerbarer Energien. Das Programm verfügt über ein festes jährliches Budget, so dass sobald die enthaltenen Mittel ausgeschöpft sind, zwangsläufig ein Förderstopp erfolgt. Hieraus ergibt sich eine für die betroffenen Branchen sehr ungünstige „Stop-and-Go-Entwicklung“ bei Verkauf und Installation der Anlagen. Neben diesen budgetabhängigen periodischen Schwankungen ist auch die Höhe des im MAP zur Verfügung stehende Budget starkem politischen Einfluss ausgesetzt. In den Anfangsjahren wurde es aus dem Teil der Öko-Steuer gespeist, der auf die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erhoben wurde. Derzeit ist eine Zuweisung von Einnahmen aus der Vergütung von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten zugunsten des MAP-Budgets angekündigt. Das Gesamtbudget ist gemäß dem EEWärmeG auf 500 Mio. €/a begrenzt.

Für den angestrebten Ausbau der erneuerbaren Energien im Wärmemarkt wäre Analysen des

Abbildung 3  
Überblick über die bestehenden Förderinstrumente im Bereich der Wärmebereitstellung, den jeweiligen Förderer bzw. die Mittelbereitstellung



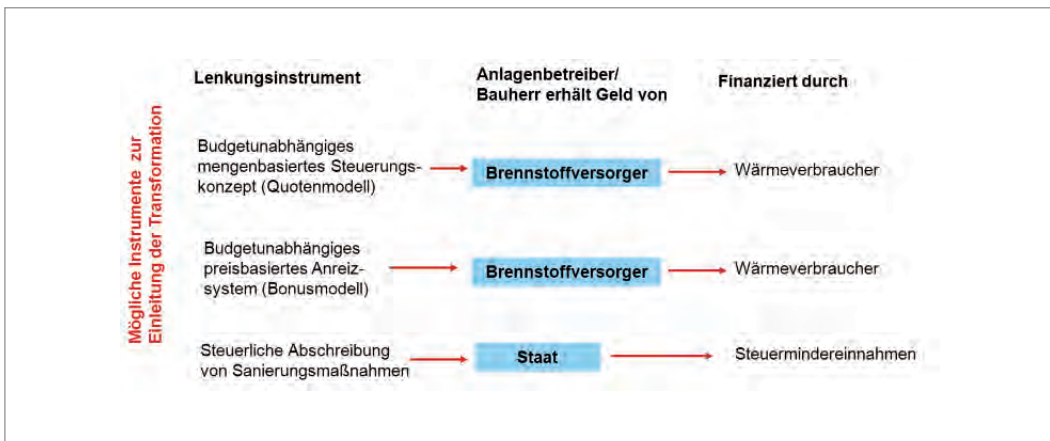


Abbildung 4  
Mögliche neue Förderinstrumente im Bereich der Wärmebereitstellung und Nennung des jeweiligen Förderers bzw. Art der Mittelbereitstellung

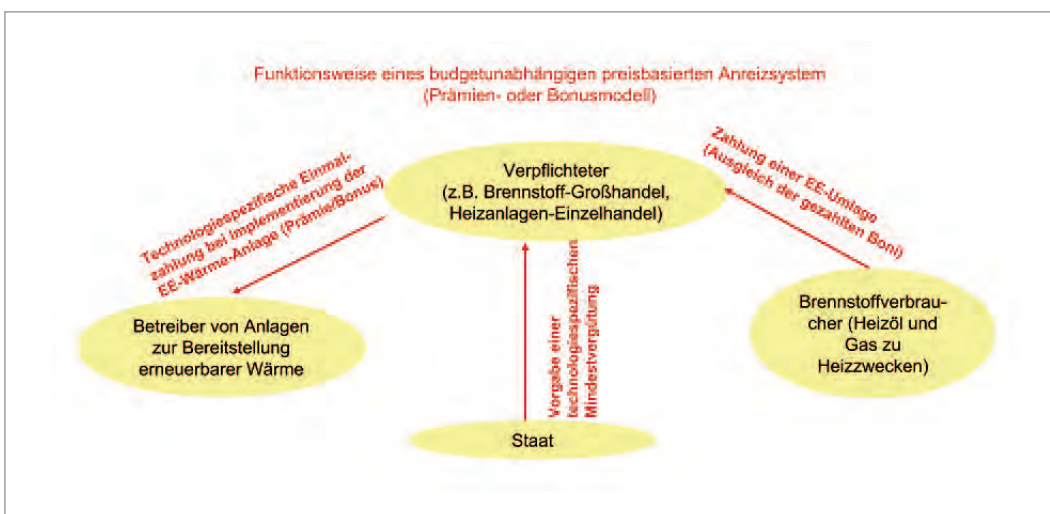


Abbildung 5  
Funktionsweise eines budgetunabhängigen preisbasierten Anreizsystems im Wärmemarkt

Fraunhofer ISI und der TU Wien [1] zufolge mittelfristig ein Förderbudget von jährlich über 800 Mio. € erforderlich. Neue Wege der Finanzierung sind deshalb zu finden.

Die Erfahrungen aus dem Strommarkt zeigen, dass sich mittels eines Umlagesystem sehr hohe Beträge bereitstellen lassen, was nahe legt, auch für die Förderung von erneuerbaren Energien im Wärmemarkt ein geeignetes Umlageverfahren unter Beteiligung der Energieversorger zu entwickeln.

Mögliche neue Instrumente sind in [Abbildung 4](#) dargestellt, wobei diese den Vorteil aufweisen, dass sie insbesondere auch im Gebäudebestand Anwendung finden können.

Die haushaltsunabhängigen Anreizinstrumente des Prämien- oder Quotenmodells (siehe [Abbil-](#)

[dung 5](#)) sind von ihrer Wirkungsweise her positiv zu beurteilen, aber regelungs- und vollzugstechnisch vergleichsweise aufwändig.

Das **Prämienmodell** hat den Vorteil, dass durch die in ihm angelegte technologisch differenzierte Mindestvergütung von vornherein eine stabile wirtschaftliche Planungsgrundlage geschaffen würde.

Im **Quotenmodell** müsste durch geeignete flankierungen sichergestellt werden, dass keine Verzerrungen in der Anreizwirkung zu Gunsten bzw. zu Lasten bestimmter Technologien entstünden (technologiebezogene Gewichtungsfaktoren, Mindestpreisregelung). Sofern ein Quotenmodell (physische oder bilanzielle Quote) bevorzugt werden sollte, kann statt der Großhandelsebene auch daran gedacht werden, den Einzelhandel mit Heizanlagen zu adressieren. Dann würde die

Anreizregelung genau an der Stelle ansetzen, an der die Endnutzer die Entscheidung über die Wahl des Energieträgers treffen: bei dem Erwerb neuer Heizanlagen. Insbesondere für das Quotenmodell mit seinen verschiedenen denkbaren Varianten (physische Quote oder Portfoliomodell (bilanzielle Quote)) stellt sich eine Vielzahl von Ausgestaltungsfragen, die noch zu klären wären, bevor eine endgültige Bewertung ausgesprochen werden kann.

Ein weiterer Vorschlag ist die Schaffung der Möglichkeit, **energetische Sanierungsmaßnahmen steuerlich absetzen** zu können. Es handelt sich um einen Vorschlag zur Sanierung von Bestandsgebäuden aus dem Gesetzespaket zur Energiewende, der bislang jedoch aufgrund von Streitigkeiten zwischen Bund und Ländern noch nicht in ein Gesetz überführt werden konnte. Doch bei entsprechender Ausgestaltung – beispielsweise müssen auch Einzelmaßnahmen anrechenbar sein, nicht nur vollständige Sanierungsvorhaben – könnte von diesem Instrument eine große Wirkung ausgehen. Diese könnte in der Anfangsphase noch verstärkt werden, indem mehrere Förderinstrumente kumuliert eingesetzt würden. So wäre eine Verknüpfung der steuerlichen Abschreibung für eine energetische Sanierung der Fassade mit einer gleichzeitigen Inanspruchnahme von Fördermitteln aus dem Marktanzreizprogramm oder einem Bonusmodell bei Umstieg auf ein regenerativ betriebenes Heizungssystem schon heute denkbar. Als Anfangsimpuls wäre auch die Kumulierbarkeit mit der Inanspruchnahme von Mitteln aus dem CO<sub>2</sub>-Gebäudesanierungsprogramm denkbar. In diesem Fall würde für die Sanierungsmaßnahme ein doppelter Anreiz geboten, der zwar zunächst eine Überförderung darstellt, jedoch ggf. notwendig wäre, um die Dynamik auszulösen, die erforderlich ist, um die Sanierungsrate von heute unter 1 % auf 2 % anzuheben.

## Literatur

- [1] Die Bundesregierung, Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung vom 28. September 2010, gemeinsam erstellt von Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin. 2010.
- [2] Nitsch, J. et al: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – „Leitstudie 2010“, im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Stuttgart/Kassel/Berlin, Dezember 2010.
- [3] Freier, K. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Wärmege-  
setz: aktuelle Lage und Herausforderungen; Vortrag anlässlich der Jahreskonferenz Erneuerbare Energien, Berlin, Oktober 2011.
- [4] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Erneuerbare Energien in Zahlen, Berlin, Juli 2011. abrufbar unter: <http://www.erneuerbare-energien.de/inhalt/2720/>
- [5] Eckpunktepapier der Bundesregierung zur Energiewende: „Der Weg zur Energie der Zukunft – sicher, bezahlbar und umweltfreundlich“ vom 6. Juni 2011. abrufbar unter: [www.bmu.de/energiewende/beschluesse\\_und\\_massnahmen/doc/47465.php](http://www.bmu.de/energiewende/beschluesse_und_massnahmen/doc/47465.php)
- [6] „Nationaler Aktionsplan für erneuerbare Energie gemäß der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen“, Deutsche Bundesregierung, veröffentlicht durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin, August 2010.
- [7] Eckpunkte für die Entwicklung und Einführung budgetunabhängiger Instrumente zur Marktdurchdringung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt. Ausarbeitung für das BMU, DLR, FhG-ISI, IZES, Öko-Institut, 2006
- [8] Richtlinie 2009/28/EG des Europäischen Parlaments und des Rates zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Art. 13 Abs. 4; Brüssel, April 2009.
- [9] Folgevorhaben zu „Ergänzende Untersuchungen und vertiefende Analysen zu möglichen Ausgestaltungsvarianten eines Wärmegesetzes“. Bericht für das BMU, DLR, FhG-ISI, Bremer Energie Institut und Öko-Institut, Dezember 2010.

## ■ Akzeptanz- und Transformationsforschung

- Akzeptanz- und Partizipationsforschung zu Energienachhaltigkeit
- Der Wert interaktiver Energiepotenzialanalysen für Bürger am Beispiel des Projekts ERNEUERBAR KOMM!

## ■ Abendvortrag

- Welt im Wandel – die „Große Transformation“

# Akzeptanz- und Partizipationsforschung zu Energienachhaltigkeit



Prof. Dr. Petra Schweizer-Ries  
petra.schweizer-ries@fg-upsy.com

Irina Rau  
irina.rau@fg-upsy.com

Jan Hildebrand<sup>1</sup>  
jan.zoellner@fg-upsy.com

## 1. Sozialwissenschaftliche Forschung für die Energiewende

Die ambitionierten Ziele der Bundesregierung bezogen auf die Umorientierung unserer Gesellschaft in Richtung Energienachhaltigkeit und CO<sub>2</sub>-Reduzierung erfordern das Umdenken und Umlenken auf unterschiedlichsten Ebenen. Neben technischen Neuerungen geht es vor allem darum, Bürgerinnen und Bürger in ihren vielfältigen Rollen dafür zu gewinnen, sich an der Gestaltung dieses Umbauprozesses zu beteiligen. Damit beschäftigen sich die Umweltpsychologie und auch die sozialwissenschaftlich orientierte Nachhaltigkeitswissenschaft schon seit einigen Jahren: Es geht dabei um gesellschaftliche und soziale Transformationsprozesse hin zu einer energienachhaltigeren Gesellschaft; genutzt werden natur-, sozial- und humanwissenschaftliche Methoden zur Erzeugung von praxisnahen Erkenntnissen darüber, wie derartige Veränderungsprozesse verlaufen, wie sie gezielt angestoßen werden und gelingen können.

Im Bereich der Energienachhaltigkeit werden drei Strategien genannt, die miteinander weiterverfolgt werden sollten [1, 2]:

(1) Die **Konsistenzstrategie**, bei der es um eine möglichst rückstandsfreie Energieerzeugung mit modernsten und akzeptierbaren Technologien geht. Diese sollte so gestaltet sein, dass sie nicht auf massiven Widerstand stößt, im Idealfall wird die Bevölkerung dafür gewonnen und unterstützt sie. Bei einer aktiven Beteiligung sollte dies auch positive Auswirkungen auf die beiden anderen Strategien haben.

- (2) Die **Effizienzstrategie** verfolgt die Erzeugung von Energiedienstleistungen mit möglichst geringem Energiekonsum. Dabei gilt es aus sozialwissenschaftlicher Sicht, die Nutzung energieeffizienter Geräte zu fördern, ohne den sogenannten Rebound Effekt zu erzeugen, d. h. mit immer energieeffizienteren Geräten immer mehr Energie zu benötigen.
- (3) Die **Suffizienzstrategie** verfolgt die Anpassung des Energiekonsums an die Erzeugung, sei dies quantitativ oder zunehmend auch zeitlich. Hier geht es um die Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch.

Eines der zentralen Themen bezieht sich vorrangig auf die Konsistenzstrategie, es ist die Akzeptanz des Aufbaus und der Nutzung von Technologien, die erneuerbare Energien umwandeln, z. B. in Strom. Die folgenden Abschnitte konzentrieren sich auf dieses Thema. Die beiden anderen Strategien sind aber ebenfalls wichtig und werden daher an dafür geeigneten Stellen mit behandelt.

## 2. Akzeptanz der Nutzung Erneuerbarer Energien<sup>2</sup>

Repräsentative Meinungsumfragen berichten regelmäßig von einer sehr starken Zustimmung zur Nutzung erneuerbarer Energien in der Bevölkerung (z. B. TNS Infratest, 2011; *Abb. 1*).

<sup>2</sup> Einige der folgenden Textteile beziehen sich auf eine unserer Veröffentlichungen, die sich mit diesem Thema der Akzeptanz von Energietechnologien, die erneuerbare Energie nutzen, wie Windkraft, Solarstrom und Biomasse zur Stromerzeugung, noch detaillierter auseinandersetzt: Zoellner, J., Schweizer-Ries, P. & Rau, I. (in Druck). Akzeptanz Erneuerbarer Energien. In T. Müller & M. Schütt (Hrsg.). Fachpublikation zum Recht der Erneuerbaren Energien im Strombereich. Baden-Baden: Nomos-Verlag [7].

<sup>1</sup> Jan Hildebrand, geb. Jan Zoellner



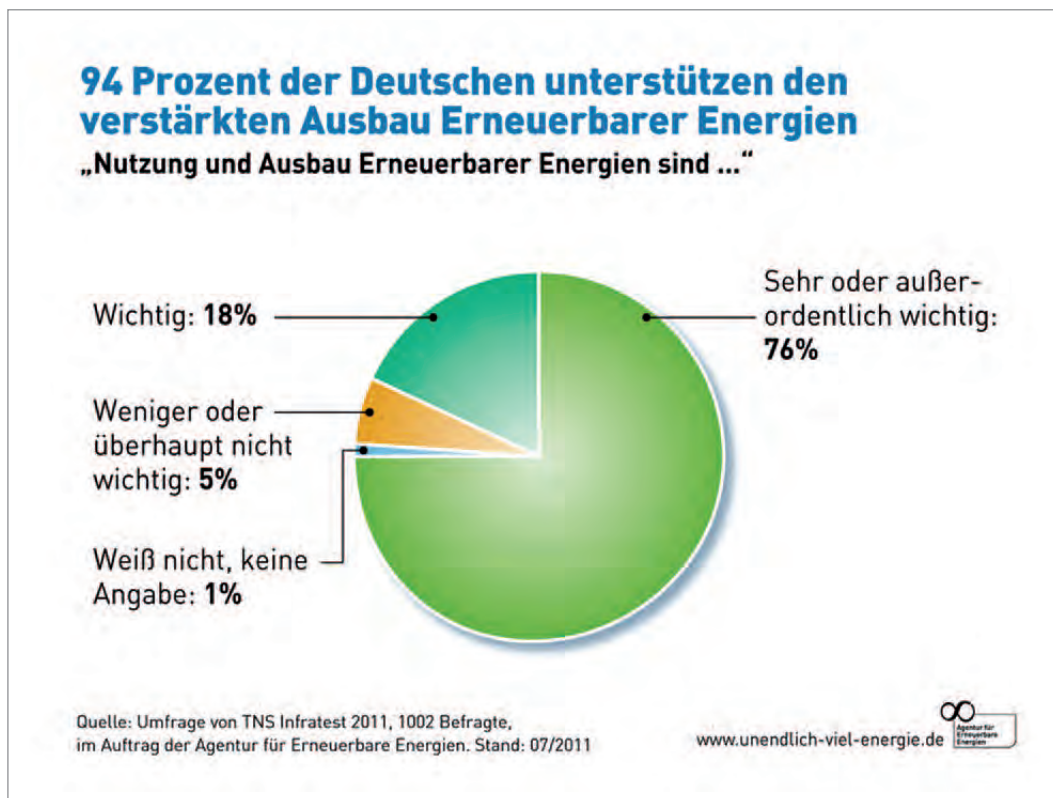


Abbildung 1  
 Umfrage zur Akzeptanz  
 erneuerbarer Energien,  
 TNS Infratest

Eine aktuelle Befragung zeigt die hohen Zustimmungswerte zum Ausbau erneuerbarer Energietechnologien: 94 % (Summe der Antworten „sehr oder außerordentlich wichtig“ und „wichtig“) der befragten Personen sehen den Ausbau und die Nutzung erneuerbarer Energien als sehr wichtig an.

Diese Werte könnten vermuten lassen, dass die Transformation des Energiesystems und die Umstellung der Energieerzeugung auf erneuerbare Energien ganz unproblematisch verlaufen könnte. Doch auch wenn die Nutzung erneuerbarer Energien prinzipiell eine sehr hohe Zustimmung erfährt, kommt es auf lokaler Ebene bei der Umsetzung konkreter Projekte nicht selten zu Widerstand und Protesten der Anwohnenden [3, 4, 5].

Durch die vorwiegende Dezentralität der erneuerbaren Energietechnologien, ihr zunehmendes Vorkommen und ihre daraus resultierende verstärkte Sichtbarkeit werden sie mehr und mehr wahrgenommen und öffentlich bewertet. Die Dezentralität bietet aber neben häufig ungewünschten Veränderungen auch

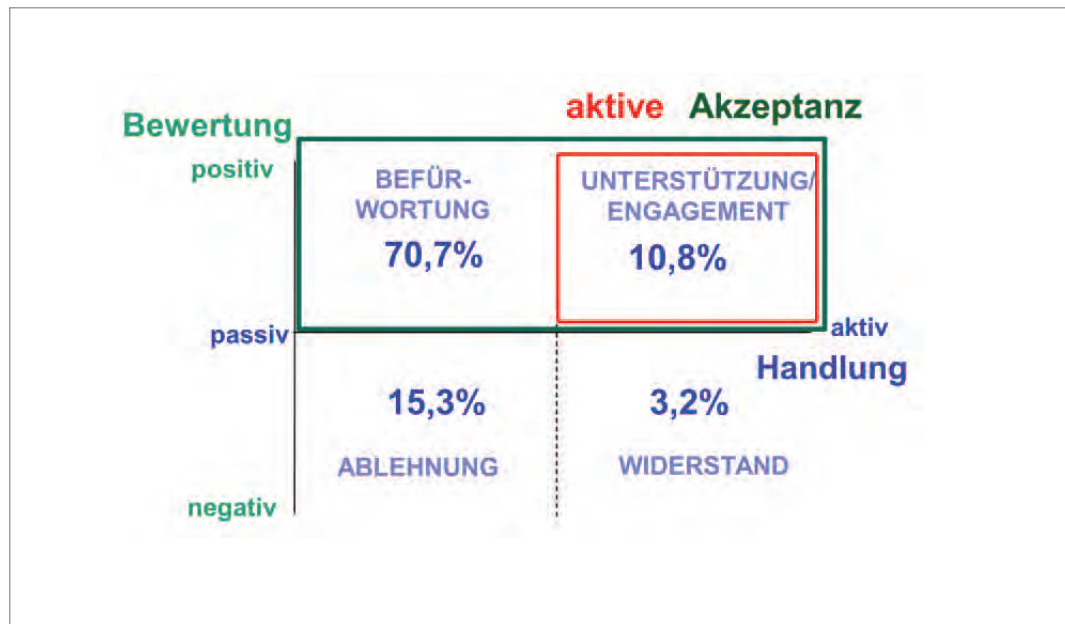
enorme Potenziale zur Demokratisierung und zur Aktivierung der Bevölkerung, sich konstruktiv an der Veränderung der Energieversorgung zu beteiligen. Energieerzeugung wird auf diese Weise direkt erfah- und erlebbar und wesentlich stärker Teil der menschlichen Lebenswirklichkeit, als dies bisher der Fall war.

Neben dieser räumlichen Veränderung wird zudem durch die mediale Berichterstattung eine starke thematische Präsenz der erneuerbaren Energien geschaffen, z. B. in Artikeln über die Berechtigung oder den Sinn von Förderinstrumenten wie des EEG oder aktuell über die Folgen der Katastrophe in Fukushima. Als Konsequenz finden ständige individuelle und soziale Bewertungsprozesse statt, die immer eindeutiger in Richtung der Nutzung von erneuerbaren Energien gehen.

Auch die zentrale Erzeugung von erneuerbarem Strom (z. B. an der Ostseeküste oder in der Sahara) ist zunehmend ein Thema, das dann gerade im Zusammenhang mit dem Ausbau der Stromnetze nicht immer auf Gegenliebe stößt. Hier bedarf es eines gesellschaftlichen Dialogs der auch Gerech-

Abbildung 2  
Dimensionen des Akzeptanzbegriffs

Quelle: [8]; angelehnt an [9]



tigkeitsaspekte berücksichtigen sollte, denn die Leitungen werden auch durch so genannte Transitregionen gebaut, die selbst von diesem besonders akzeptierten Strom zuerst einmal nicht profitieren (siehe auch [6]).

### 3. Akzeptanz als aktive Akzeptanz

Bei der Betrachtung von Akzeptanzfragen ist zunächst ein differenziertes Akzeptanzverständnis notwendig (siehe z. B. [7]). In Forschung und Praxis existieren verschiedene Begrifflichkeiten bzw. insgesamt sehr heterogene Perspektiven. Prinzipiell kann Akzeptanz nach Zoellner, Rau & Schweizer-Ries (2009 [8]) definiert werden als das positive, zeitlich relativ konstante Ergebnis eines an bestimmte Rahmenbedingungen (Kontextfaktoren) geknüpften Bewertungsprozesses gegenüber eines Akzeptanzobjektes (z. B. erneuerbare Energien-Anlage) durch ein Akzeptanzsubjekt (z. B. Person, Organisation) (= Bewertungsebene). Diese positive Bewertung kann zudem mit einer Handlungsabsicht bis hin zu konkreten unterstützenden Handlungen einhergehen (= Handlungsebene).

Ein zentraler Unterscheidungsaspekt hinsichtlich der Verwendung des Akzeptanzbegriffs betrifft

die Einbeziehung der Handlungsebene (siehe Abb. 2). Wenn sowohl die Bewertung der Nutzung erneuerbarer Energien als auch die aktive Beteiligung und positive Umsetzung betrieben wird, dann sprechen wir von aktiver Akzeptanz (siehe auch [8]). Hierzu zählen sowohl das Wahrnehmen niedrigschwelliger Verhaltensangebote wie z. B. der Wechsel zum Ökostromanbieter oder die Teilnahme an Unterschriftenaktionen, als auch aufwendigere Handlungen, wie die Beteiligung an Planungsverfahren oder Formen der finanziellen Beteiligung. In unseren Untersuchungen zeigen ca. 10% der Befragten dieses Muster (positive Bewertung und Handlung für erneuerbare Energien); d. h., nur wenige setzen sich aktiv für die Nutzung von erneuerbaren Energien ein [8]. Dies ist für den Umbau der Gesellschaft auf eine nachhaltige Energieversorgung eindeutig zu wenig, denn diese erfordert nicht nur die passive, konsumierende Unterstützung sondern die zusätzliche Bereitschaft, im Energieeffizienzbereich aktiv zu werden ebenso wie das Überdenken des energieverbrauchenden Lebensstils hin zu einer Energienachhaltigkeitskultur.

Besonderes Augenmerk bezüglich aktiver Akzeptanz verdienen Regionen und Kommunen, die sich aktiv im Klimaschutz und/oder mit dem Ausbau erneuerbarer Energien engagieren, wie z. B. Klimaschutz-Kommunen, 100%-Erneuerbare-Energien-Regionen oder auch Bioenergie-

regionen bzw. Bioenergiedörfer. Zwar haben diese das Ziel der Energienachhaltigkeit häufig noch nicht erreicht, befinden sich jedoch in den meisten Fällen auf einem guten Weg dorthin. Dort wo Erneuerbare Energietechnologien den Bedarf zu einem größeren Prozentsatz erfüllen sollen, spielt zunehmend der optimierte Verbrauch eine Rolle.

#### 4. Akzeptanz auf unterschiedlichen Akteursebenen

Die Akteursebene bietet einen weiteren wichtigen Unterscheidungsaspekt für die Akzeptanz des Ausbaus der Nutzung von erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz. Traditionell bezieht sich der Großteil der Akzeptanzforschung auf die Bürgerinnen und Bürger und befasst sich mit den wahrgenommenen Auswirkungen der Erneuerbare-Energien-Anlagen auf die anwohnenden Menschen und deren Reaktionen, z. B. Bürgerinitiativen und Proteste sowie Erfolgsbeispiele. Weitere wichtige Akteursgruppen bilden Naturschutzverbände, kommunale EntscheidungsträgerInnen und regionale Planungsbehörden, da diese Gruppen substantiell die Planungs- und Genehmigungsverfahren tragen und auf

diese Weise das Ausmaß des Ausbaus der Erneuerbare-Energien-Nutzung de facto mit beeinflussen. Weiterhin sind die Anlagenprojektierenden von Interesse, sie können durch eine transparente und konstruktive Informationspolitik die Wahrnehmung und Bewertung der Erneuerbare-Energien-Anlagen vor Ort positiv mitgestalten.

Zwischen den verschiedenen Ebenen kommt es in der Planungspraxis nicht selten zu Konflikten, welche durch unterschiedliche Interessen und Ziele, aber auch durch divergierende Werte und Weltanschauungen bedingt sind (vgl. zu Energiekonflikten auch [10]). Für den Fall auftretender Konflikte sollten diese im Sinne der präventiven Energiemediation (siehe z. B. [8]) möglichst dialogisch und konstruktiv angegangen werden. Auftretende Kritik sollte dabei als Chance angesehen werden, Projekte optimaler durchführen zu können und den kommunalen Meinungs-austausch voranzutreiben, d. h. auch zu einer gesellschaftlichen Weiterentwicklung beitragen zu können. Eine z. T. noch recht häufig anzutreffende Strategie in der Praxis, Kritik- und Konfliktvermeidung durch Nicht-Information während des Planungsverfahrens zu betreiben, stellt sich nachträglich – insbesondere hinsichtlich der Akzeptanz der Planungsergebnisse – meist als eher ungünstig heraus.

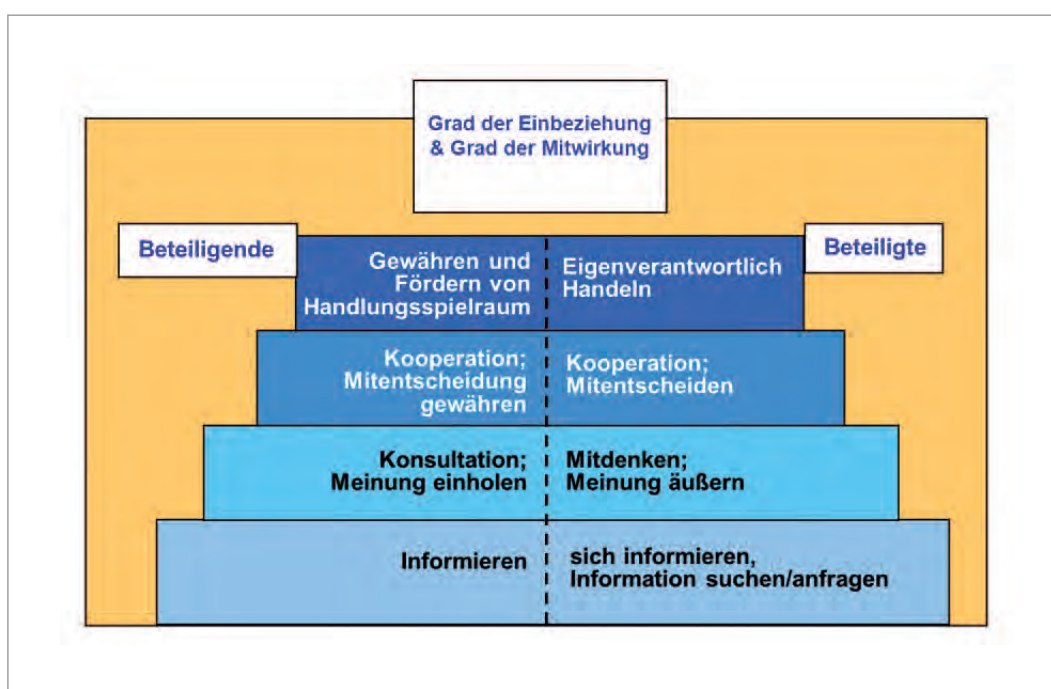
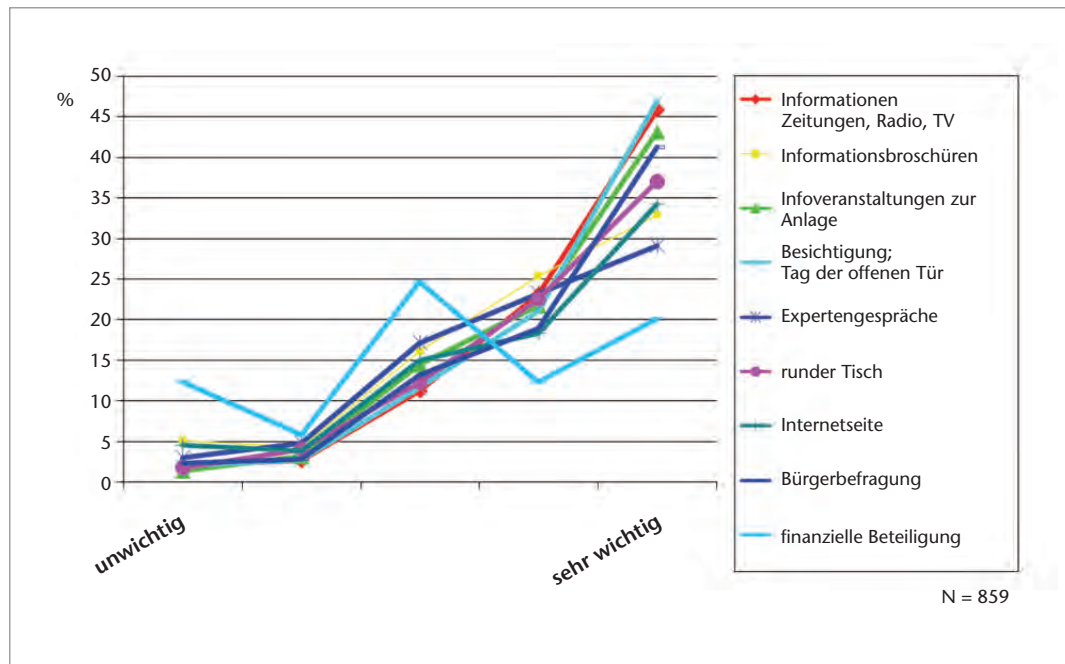


Abbildung 3  
Partizipationspyramide,  
übersetzt aus Rau,  
Schweizer-Ries &  
Zoellner (in Druck).

Abbildung 4  
Partizipation:  
Wichtigkeit von  
Beteiligungsmethoden  
[14]



## 5. Kommunikationsprozesse und Partizipation

Die aktive Akzeptanz als Idealfall der Beteiligung an der Energiewende kann durch das Fordern und Zulassen von Partizipation unterstützt werden. Nur wenn die Betroffenen einbezogen werden, können Veränderungen erfolgreich etabliert werden. Die Einbeziehung erfordert aber nicht nur den Beteiligungswillen, sondern auch geeignete Angebote und das Zulassen von Beteiligung. Hier kommt vor allem den Beteiligten eine wichtige Rolle zu (siehe Abb. 3). Sie benötigen entsprechende Kompetenzen, um wirkliche Beteiligung professionell zu gestalten.

Abbildung 3 zeigt die Partizipations-Pyramide. Sie bezieht sich auf die Arbeiten von Arnstein [12] und Lüttringhaus [13]. Auf den unteren Partizipationsstufen wird Information gegeben und Betroffene werden bei Entscheidungen konsultiert. Die eigentliche Partizipation, bei der die Beteiligten tatsächliche Einflussmöglichkeiten haben, findet aber erst mit den beiden oberen Stufen, der Kooperation und der Übergabe der Verantwortung und der Entscheidungen an die Betroffenen oder deren VertreterInnen statt.

In Befragungen [11] zeigt sich ein sehr deutlicher Wunsch der Bürgerinnen und Bürger nach Beteiligung bei der Einführung von Erneuerbare-Energien-Anlagen, dies vor allem im Bereich der Information und Konsultation (vgl. Abb. 4). Die präferierten Beteiligungsformen sind Informationsangebote, welche für BürgerInnen die Grundlage darstellen, sich ggf. verstärkter zu engagieren. Zeitlich intensivere Formen wie runde Tische und Expertengespräche sind dementsprechend nicht ganz so grundlegend, können dennoch je nach inhaltlichem Gegenstand ebenfalls eine wichtige Funktion einnehmen. Auf den Stufen Kooperation und eigenverantwortliches Handeln, die mit stärkerem Engagement und Aufwand für die Beteiligten einhergeht, aber zentral für die aktive Akzeptanz sind, ist der Wunsch etwas geringer ausgeprägt. Hier bedarf es, wie oben bereits angemerkt, einer besonders gewinnenden Aktivierung. Die Beteiligungsangebote bleiben in der Wahrnehmung der BürgerInnen durchweg stark hinter deren Wünschen und dem genannten Bedarf zurück. Schon auf der Ebene der Information wurden bedenkliche Mängel angemerkt. Dies ist besonders beachtenswert, da davon ausgegangen werden kann, dass sich eine nicht wahrgenommene Möglichkeit der Beteiligung, deutlich negativ bezüglich der bewerteten Gerechtigkeit des Verfahrens auswirkt und mit Akzeptanzdefiziten einhergeht.

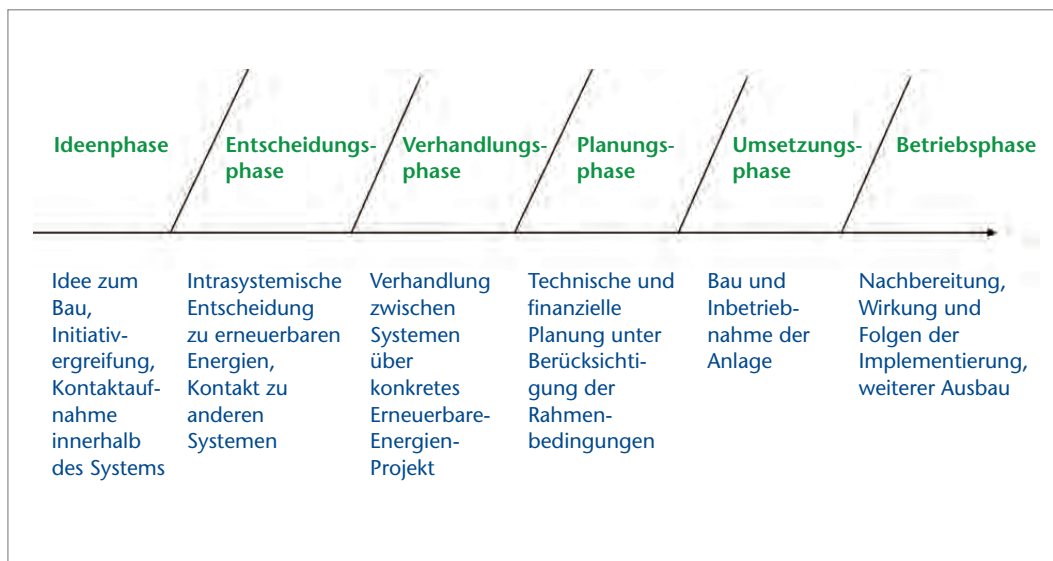


Abbildung 5  
Phasen des Planungs- und Entscheidungsprozesses [14]

Eine gut ausgearbeitete und umfänglich umgesetzte Kommunikationsstrategie stellt daher die zentrale Grundlage für einen gelungenen Planungsprozesses dar. Diese sollte als Ziel die aktive Akzeptanz der Bürgerinnen und Bürger auf allen gesellschaftlichen Ebenen und mit allen relevanten Rollen berücksichtigen. Dies erfordert die Entwicklung gemeinsamer Visionen und Aktionspläne, deren Realisierung realitätsnah geplant und umgesetzt werden sollte. Partizipationsprozesse einzuleiten und professionell durchzuführen ist noch keine Garantie für den Erfolg, aber ohne Partizipationsprozesse werden Veränderungen nur schwer akzeptiert und aktiv mitgetragen. Kommunikations- und Beteiligungsmaßnahmen können prinzipiell in allen Phasen des Planungs- und Entscheidungsprozesses von Erneuerbare-Energien-Anlagen stattfinden (Abb. 5). Idealerweise sollte die Einbeziehung schon in den frühen Phasen einsetzen, damit entsprechend noch Gestaltungsspielräume vorhanden und individuelle lokale Lösungen möglich sind.

## 6. Fazit

Die Umsetzung der Klimaschutz-Ziele und die Sicherung einer zukunftsfähigen Energieversorgung stellt eine große gesellschaftliche Herausforderung dar. Der Strukturwandel des Energiesystems wird und muss auf allen gesell-

schaftlichen Ebenen stattfinden, Formen der Energiebereitstellung müssen sowohl zentral als auch dezentral entstehen und auch der Energieverbrauch muss neu gedacht werden.

Die Bevölkerung bewertet zwar alle untersuchten Energietechnologien (Solarenergie, Windkraft, Biomasse; siehe auch [7]) prinzipiell positiv bis sehr positiv. Die Bereitschaft, sich aktiv für deren Ausbau einzusetzen, ist jedoch noch sehr gering; im Gegenteil finden sich immer wieder aktive Widerstände gegen den Ausbau der erneuerbare Energien-Nutzung. Um die Menschen für mehr Unterstützung zu aktivieren und zusätzliche Potenziale z. B. im Bereich der optimierten Energienutzung freizusetzen, hilft es, sie rechtzeitig einzubinden, am besten auf allen Stufen der Partizipation. Klar definierte Ziele helfen, Menschen in die Lage zu versetzen, sich am Energieumbau zu beteiligen. Dazu ist ein angemessener Handlungsrahmen bereitzustellen und die Beteiligungskompetenzen aller sicherzustellen.

Die Energiewende im breiten und nachhaltigen Stile wird nur mit vereinten Kräften erreicht werden; dazu benötigt es mündige und aktive Bürgerinnen und Bürger in allen gesellschaftlichen Positionen und Rollen. Die Erzeugung von gemeinsamen Visionen wird helfen, eine Vorreiterrolle auf dem Weg zur Energienachhaltigkeit einzunehmen. Hierbei kann die sozialwissenschaftliche Transformationsforschung einen

wesentlichen Beitrag leisten, diesen vollständigen Umbau des gegenwärtigen Energiesystems anzugehen und eine Energiewende mit Verstand, Herz und Hand zu schaffen. Die Aufgaben der Transformationsforschung liegen dabei sowohl in der strategischen Orientierung, als treibende Kraft und als kritische Begleiterin dieses für die Menschheit so wichtigen Veränderungsprozesses.

## Literatur

- [1] Kleinhüchelkotten, S. (2005). Suffizienz und Lebensstile. Ansätze für eine milieuorientierte Nachhaltigkeitskommunikation. Berlin: BWV.
- [2] Schweizer-Ries, P. (2011). Socio-Environmental Research on Energy Sustainable Communities: Participation Experiences of Two Decades. In P. Devine-Wright (Ed.). *Public Engagement with Renewable Energy: From Nimby to Participation* (p. 187–202). London: Earthscan.
- [3] Walker, G. (1995). Renewable Energy and the Public. *Land Use Policy*, 12 (1), 49–59.
- [4] Bell, D., Gray, T. & Haggett, C. (2005). The 'Social Gap' in Wind Farm Siting Decisions: Explanations and Policy Responses. *Environmental Politics*, 2005, 14, 460–477.
- [5] Zoellner, J., Schweizer-Ries, P. & Wemheuer, C. (2008). Public acceptance of renewable energies: Results from case studies in Germany. *Journal of Energy Policy*, 36 (11), 4136–4141.
- [6] Schweizer-Ries, P., Zoellner, J. & Rau, I. (2010). Akzeptanz neuer Netze: Die Psychologie der Energiewende. In N. Boenigk, M. Franken & K. Simons (Hrsg.) *Kraftwerke für Jedermann: Chancen und Herausforderungen einer dezentralen erneuerbaren Energieversorgung*. Sammelband Dezentralität (S. 60–63). Reinheim: LokayDruck.
- [7] Zoellner, J., Schweizer-Ries, P. & Rau, I. (in Druck). Akzeptanz Erneuerbarer Energien. In T. Müller & M. Schütt (Hrsg.). *Fachpublikation zum Recht der Erneuerbaren Energien im Strombereich*. Baden-Baden: Nomos-Verlag.
- [8] Zoellner, J., Rau, I. & Schweizer-Ries, P. (2009). *Akzeptanz Erneuerbarer Energien und sozialwissenschaftliche Fragen*. Universität Magdeburg: Projektendbericht.
- [9] Dethloff, C. (2004). *Akzeptanz und Nicht-Akzeptanz von technischen Produktinnovationen*. Lengerich: Pabst Science Publishers.
- [10] Zoll, R. (Hrsg.) (2001). *Energiekonflikte. Problemübersicht und empirische Analysen zur Akzeptanz von Windkraftanlagen*. Politische Verhaltensforschung, Bd. 4.; Münster.
- [11] Rau, I., Schweizer-Ries, P. & Zoellner, J. (in press). Participation strategies – the silver bullet for public acceptance? In Kabish et al. (Eds). *Vulnerability, Risks and Complexity of Human Habitats*. Leipzig: Hogrefe.
- [12] Arnstein, S. R. (1969). A ladder of participation. *Journal of the American Planning Association*, Vol. 35, No. 4, July 1969, pp. 216–224.
- [13] Lüttringhaus, M. (2003). Voraussetzungen für Aktivierung und Partizipation. In M. Lüttringhaus & H. Richers (Hrsg.). *Handbuch Aktivierende Befragung. Konzepte, Erfahrungen, Tipps für die Praxis* (S. 66–72). Bonn: Verlag Stiftung Mitarbeit.
- [14] Rau, I. (2010). Partizipationsprozesse und Akzeptanz Erneuerbarer Energien auf kommunaler Ebene. Vortrag auf der Abschlussfachtagung „Aktivität und Teilhabe – Akzeptanz Erneuerbarer Energien durch Beteiligung steigern“ am 08.06.2010, Berlin.

# Der Wert interaktiver Energiepotenzialanalysen für Bürger am Beispiel des Projekts ERNEUERBAR KOMM!



ERNEUERBAR KOMM! ist die erste ganzheitliche Potenzialanalyse für Erneuerbare Energien auf der Basis bereits vorhandener Geodaten. Schnell, effizient und exakt wird das Potenzial zur Stromerzeugung aus Sonne, Wind, Wasser und Biomasse auf Gemeindeebene berechnet.

Durch den Online-Rechner ERNEUERBAR KOMM! kann sich jeder Bürger objektiv über die Erneuerbare-Energien-Potenziale seiner Gemeinde informieren und Berechnungen und Szenarien selbst durchführen. Bürgermeister und Gemeinderatsmitglieder können dieses Instrument für ihre energiepolitischen Entscheidungen nutzen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes ERNEUERBAR KOMM! an der Fachhochschule Frankfurt am Main wurde der Online-Rechner im März 2011 für die 75 Gemeinden der Pilotregion Frankfurt/Rhein-Main freigeschaltet. Mittlerweile gibt es auch einen Online-Rechner für die Stadt Worms. Zahlreiche weitere Gebietskörperschaften in Hessen, Baden-Württemberg und Bayern sind derzeit in Bearbeitung (Stand August 2011).

## Das Forschungsprojekt ERNEUERBAR KOMM!

Ziel des Forschungsprojektes ERNEUERBAR KOMM! ([www.erneuerbarkomm.de](http://www.erneuerbarkomm.de)) war die Entwicklung einer Methode, mittels derer das Potenzial für Erneuerbare Energien auf Gemeindeebene berechnet werden kann, ohne dafür neue Datenerhebungen durchführen zu müssen. Das Projekt mit einer Laufzeit von anderthalb Jahren war an der Fachhochschule Frankfurt am Main im Studiengang Geoinformation und Kommunaltechnik verankert und wurde durch das Hessische Ministerium für Wissenschaft und Kunst gefördert.

### SUN-AREA

Vorangegangen war das 2008 abgeschlossene Forschungsprojekt SUN-AREA ([www.sun-area.net](http://www.sun-area.net)), welches eine automatisierte Berechnung des solaren Energiepotenzials bestehender Dachflächen ermöglichte. Im Rahmen von SUN-AREA werden hochaufgelöste Laserscan-Daten ausgewertet, die mittels einer Befliegung gewonnen werden. Durch eine Verschneidung mit Katasterdaten und eine Simulation der Sonneneinstrahlung über den Tag und das Jahr hinweg kann für jede einzelne Dachfläche der bei einer Photovoltaik-Nutzung zu erwartende Stromertrag exakt berechnet werden.

Auf Basis von SUN-AREA gibt es mittlerweile für zahlreiche Städte und Gemeinden sogenannte Solardachkataster, die den Bürgern verlässliche Informationen über die Eignung ihres Daches und die Wirtschaftlichkeit einer solaren Nutzung bieten.

Mit ERNEUERBAR KOMM! haben Prof. Dr. Martina Klärle und ihr Team nun eine ganzheitliche Potenzialanalyse für **alle** Formen der Erneuerbaren Energien entwickelt. Die flächenbezogene Berechnung erfolgt für jede einzelne Gemeinde oder jeden Landkreis auf der Grundlage bereits vorhandener Geobasisdaten. Das Ergebnis gibt Auskunft über folgende Fragen:

- Wie viel Fläche innerhalb einer Gemeinde eignet sich für die Erzeugung von Strom aus Solar- und Windenergie, Biomasse und Wasserkraft?
- Wie viel Strom kann aus dieser Fläche erzeugt werden?
- Wie viel Prozent des Strombedarfs der Gemeinde kann dadurch gedeckt werden?



### Fachhochschule Frankfurt am Main

Prof. Dr. Martina Klärle

[martina.klaerle@fb1.fh-frankfurt.de](mailto:martina.klaerle@fb1.fh-frankfurt.de)

### Dipl.-Ing. Ute Langendörfer

[ute.langendoerfer@fb1.fh-frankfurt.de](mailto:ute.langendoerfer@fb1.fh-frankfurt.de)

Fachhochschule Frankfurt am Main  
 Nibelungenplatz 1  
 60318 Frankfurt am Main  
[www.erneuerbarkomm.de](http://www.erneuerbarkomm.de)

Abbildung  
SUN-AREA



Neben einem umsetzungsorientierten 16-seitigen Leitfaden<sup>1</sup> bestand der Kern des Forschungsprojektes in einem eigens entwickelten Online-Rechner. Auf einer Internet-Oberfläche kann das Erneuerbare Energiepotenzial der beteiligten Gemeinden in Echtzeit berechnet werden. Der Leitfaden bietet allgemeine Informationen zu den einzelnen Formen der erneuerbaren Energien und fasst die Ergebnisse für die jeweilige Gebietskörperschaft zusammen. Um die Nutzung dieses Instruments durch die Kommunen und die Bürger sicherzustellen, wurde der Online-Rechner nach dem Prinzip des ‚game based learning‘ entwickelt. Der Online-Rechner kann unabhängig vom Leitfaden bedient werden.

## Die Methode ERNEUERBAR KOMM!

Kommunen verfügen über einen Schatz an Geodaten. Alle notwendigen Daten sind vorhanden, um die Potenziale für Erneuerbare Energien berechnen zu können. Die Herausforderung besteht darin, die Zugriffs- und Nutzungsrechte zu klären und amtliche Geobasisdaten sowohl quantitativ als auch qualitativ zu beurteilen.

Neben klassischen Geobasisdaten der Katasterverwaltung (ALKIS) und Informationen aus dem Digitalen Landschaftsmodell (DLM) werden weitere raumbezogene Daten – beispielsweise zu Windgeschwindigkeiten, solaren Einstrahlungswerten, Schutzgebieten – ausgewertet und überlagert. Die notwendigen amtlichen Basisdaten liegen im Allgemeinen flächendeckend vor. Auch die amtlichen Geodaten zur Flächennutzung kommen von den entsprechenden Landesämtern (z. B. für Hessen: HLBG Hessisches Landesamt für Geoinformation und Bodenmanagement). Sie liegen für alle Bundesländer flächendeckend vor.



Windgeschwindigkeiten und Globalstrahlungswerte kommen vom Deutschen Wetterdienst. Es müssen keine neuen Eingangsdaten erhoben werden.

Bei der Verwertung und Veredelung der Daten werden bestehende planungsrechtliche Vorgaben einbezogen. Beispielsweise werden die jeweils relevanten Schutzgebiete von den ermittelten Eignungsflächen abgezogen und Abstandsregeln (z. B. für Windkraftanlagen) gemäß der vor Ort geltenden Regularien berücksichtigt.

Die Auswertung der Flächendaten wird in eine Datenbank überführt, aus der dann quasi vollautomatisch das Potenzial für jede einzelne Gemeinde berechnet wird. Das Ergebnis zeigt exakt, wie viel Fläche innerhalb einer Gemeinde sich für die Erzeugung von Strom aus Solar- und Windenergie, Biomasse und Wasserkraft eignet und wie viel Strom daraus erzeugt werden kann.

Da die Datenbank auch eine Verknüpfung zur Einwohnerzahl der Gemeinde und zum Stromverbrauch pro Einwohner herstellt, wird zugleich angezeigt, wie viele Einwohner aus dem Ertrag der jeweiligen Fläche mit Strom versorgt werden können.

Das Ergebnis von ERNEUERBAR KOMM! zeigt nicht nur das theoretisch vorhandene technische Potenzial. Am Online-Rechner kann sich jeder Bürger, Gemeinderat oder Bürgermeister anhand des Mobilisierungsfaktors seinen gewünschten Energie-Mix selbst zusammenstellen und auswählen, welchen Anteil des Potenzials aus Wind, Sonne, Biomasse und Wasser er jeweils nutzen will.

## Der Online-Rechner ERNEUERBAR KOMM! ([www.erneuerbarkomm.de/rechner](http://www.erneuerbarkomm.de/rechner))

Der Aufbau der Internet-Plattform ist interaktiv. Wie an einem Mischpult kann der Nutzer verschiedene Schieberegler für jede Energiequelle betätigen und z. B. einstellen: Ich nutze 30 % der

geeigneten Dachflächen und 5 % der geeigneten Freiflächen meiner Gemeinde für Solarenergie, 20 % der geeigneten Ackerflächen für Biomasseanbau und installiere 5 Windkraftanlagen. Das System errechnet on-demand – also nutzerabhängig, welcher Anteil des kommunalen Strombedarfs damit gedeckt werden kann und zeigt das Ergebnis in einem Balkendiagramm an.

Vergleichende Betrachtungen des Ertrages der einzelnen Energieformen sind einfach durchzuführen: Wählt der Nutzer z. B. 40 % der für Solarenergie geeigneten Dachflächen, sieht er, dass damit 50 % des Strombedarfs gedeckt werden kann. Oder er sieht, dass er die Biomasse aus einer Fläche von 200 ha Grünland verwenden müsste, um 4.000 Bürger mit Strom zu versorgen – das Gleiche aber auch durch eine einzige Windkraftanlage an einem geeigneten Standort erreichen könnte.

Die Einstellung erfolgt für jede Energieform über ein separates Fenster (siehe *Abbildungen*). Hier sieht man, wie viel technisch geeignete Fläche zur Verfügung steht, im Falle von Windkraft die mögliche Anzahl der Anlagen. Der Nutzer des Online-Rechners kann nun eingeben, welchen Anteil davon er jeweils mobilisieren will.

### Beispiel

Für die Screenshots einer Gemeinde aus dem Pilotgebiet Frankfurt/Rhein-Main wurden folgende Einstellungen gewählt: siehe folgende Seite.

Der Balken ganz rechts zeigt das Gesamtergebnis in MWh/a (Ergebnis absolut) und prozentual zum kommunalen Strombedarf (Ergebnis relativ). Im vorliegenden Fall – das heißt mit den ausgewählten Mobilisierungsfaktoren – können also 38.019 MWh Strom pro Jahr erzeugt werden, womit der Strombedarf der privaten Haushalte der Gemeinde zu 100 % gedeckt ist.

Das Potenzial dieser Gemeinde ist damit bei Weitem nicht ausgeschöpft. Es wurden beispielsweise nur 6 der möglichen 30 Windkraftanlagen ausgewählt und nur 0,6 % der möglichen Flächen für Freiflächen-PV-Anlagen. Die Gemeinde wäre in der Lage, ihren gesamten Strombedarf alleine aus Wind oder Solarenergie zu decken. Das Potenzial aus Biomasse ist dagegen gering.

1 Die bis jetzt existierenden Leitfäden (Region Frankfurt/Rhein-Main und Stadt Worms) können Sie auf [www.erneuerbarkomm.de](http://www.erneuerbarkomm.de) ansehen und herunterladen.

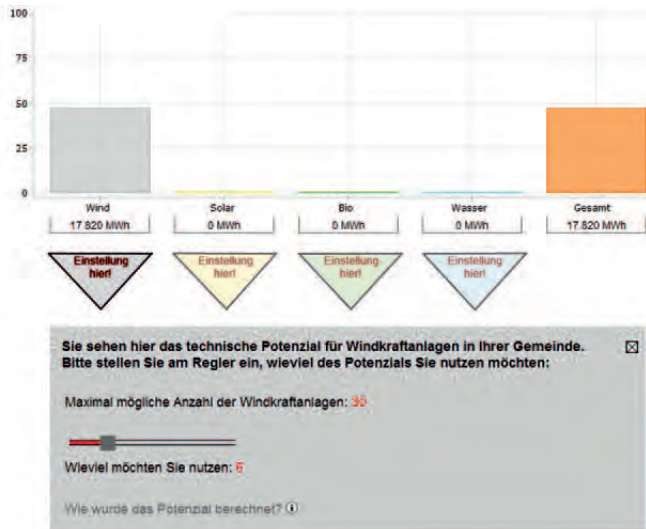


Abbildung 1

**Wind** (grauer Balken ganz links):  
 Maximal mögliche Anzahl an Windkraftanlagen:  
 30  
**Mobilisierung: 6 Stück**  
 daraus erzeugter Stromertrag: 17.820 MWh/Jahr  
 Deckung des Strombedarfs der Gemeinde: 47%

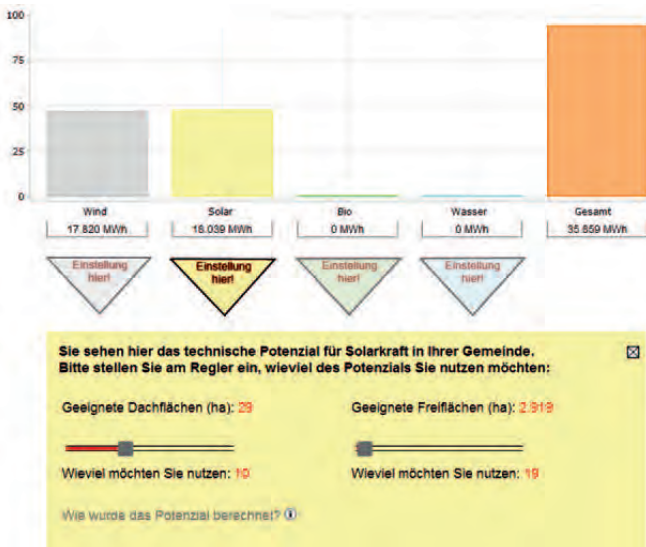


Abbildung 2

**Solar** (gelber Balken, zweiter von links):  
 Geeignete Dachflächen: 29 ha  
**Mobilisierung: 10 ha**  
 Geeignete Freiflächen: 2.919 ha  
**Mobilisierung: 19 ha**  
 daraus erzeugter Stromertrag insgesamt: 18.039 MWh/Jahr  
 Deckung des Strombedarfs der Gemeinde: 48%

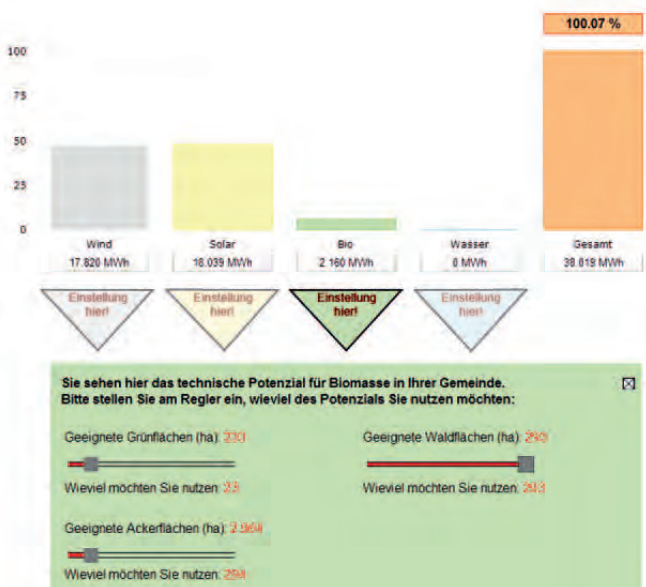


Abbildung 3

**Biomasse** (grüner Balken, Mitte):  
 Geeignetes Grünland: 233 ha  
**Mobilisierung: 23 ha**  
 Geeignete Ackerfläche: 2.964 ha  
**Mobilisierung: 294 ha**  
 Geeignete Waldfläche  
 (nur Restholznutzung): 293 ha  
**Mobilisierung: 293 ha**  
 daraus erzeugter Stromertrag insgesamt:  
 2.160 MWh/Jahr  
 Deckung des Strombedarfs der Gemeinde: 5%

### **Erfahrungen mit dem Online-Rechner**

Mit ERNEUERBAR KOMM! wurde ein Online-Tool für die Ermittlung des Potenzials Erneuerbarer Energien auf kommunaler Ebene entwickelt, welches zeigt, dass es möglich ist, eine vollständige und komplexe Potenzialanalyse in diesem Format effektiv abzubilden.

Am 30. März 2011 präsentierte Frau Prof. Klärle die Projektergebnisse vor über 100 Vertretern von Kommunen, Landkreisen, Ministerien, Verbänden, Vereinen und Unternehmen. Der Online-Rechner für die Pilotregion Frankfurt/Rhein-Main wurde freigeschaltet und von teilnehmenden Bürgermeistern erfolgreich getestet.

Seit der Freischaltung wurden über 7.000 Einzelanalysen und Szenarien-Berechnungen durchgeführt. Eine Auswertung der Zugriffszeiten zeigt, dass die meisten Zugriffe zwischen 8 und 16 Uhr erfolgen. Das Instrument wird offensichtlich nicht nur von den Bürgern, sondern auch von den öffentlichen Verwaltungen aktiv und rege genutzt.

Viele Rückmeldungen von interessierten Bürgern und politisch Verantwortlichen zeigen das große Interesse am Thema Erneuerbare Energien. Häufig geht es dabei um Standortfragen. Daraus resultierende kontroverse und zum Teil sehr emotional geführte Diskussionen können durch die Ergebnisse von ERNEUERBAR KOMM! versachlicht werden.

ERNEUERBAR KOMM! ist keine Standortanalyse, sondern zeigt das tatsächlich vorhandene Potenzial zur Erzeugung Erneuerbarer Energien, welches in der Fläche einer Gemeinde steckt – unabhängig von den derzeit geltenden politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen.

Der Online-Rechner ERNEUERBAR KOMM! zeigt für jede Gemeinde objektiv, was möglich ist in Sachen Erneuerbare Energien, bevor man gegebenenfalls in Standortdebatten einsteigt. Er ist in diesem Sinne eine wichtige Grundlage für energiepolitische Entscheidungen und versteht sich als partizipatorisches Werkzeug, welches die öffentliche Diskussion unterstützen und objektivieren kann.

## ■ Abendvortrag

### Welt im Wandel – die „Große Transformation“



Prof. Dr. Dr. h.c. Hans Joachim Schellhuber  
CBE  
Potsdam-Institut für  
Klimafolgenforschung  
director@pik-potsdam.de

Das Hauptgutachten des Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, WBGU, aus dem Jahr 2011 trägt den Titel „Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation“. Es setzt sich mit drei Handlungsfeldern auseinander, deren Transformation wesentlich ist für eine globale Wende zur Nachhaltigkeit: Energiesysteme, urbane Räume und Landnutzungssysteme. Der Gedanke, der diesem Ansatz zu Grunde liegt, ist der der planetarischen Leitplanken. Werden diese im Rahmen des scheinbar endlosen Wachstums überschritten, wird das Erdsystem aus dem Gleichgewicht gestoßen und Rückwirkungen auf die Gesellschaft sind wahrscheinlich. Bereits in den 1970er-Jahren hat Dennis Meadows für den Club of Rome die Grenzen des Wachstums erforscht, die man damals schon verstanden hatte: Es ist in einer begrenzten Welt eigentlich eine Selbstverständlichkeit, dass exponentielles Wachstum nicht für immer weitergehen kann. Doch die Schärfe der Krisenproblematik, vor der wir heute stehen, war damals noch nicht sichtbar. Heute zeichnen wissenschaftliche Einsichten ein anderes Bild und lassen drei Themengebiete im Mittelpunkt erscheinen: den gefährlichen Klimawandel, die Erschöpfung billiger fossiler Energiequellen und ein globales Bevölkerungswachstum, das auf lange Sicht sogar superexponentiell ist.

#### Klimaentwicklung in Vergangenheit und Zukunft

Messungen zeigen, dass die globale Mitteltemperatur in den letzten vier Jahrzehnten um 0,5 °C angestiegen ist (Abb. 1). Regional fällt diese Erwärmung vor allem an den Polkappen noch stärker aus, was mit der so genannten Eis-Albedo-Rückkopplung zu erklären ist. Wo Eis schwindet, kommt meist ein dunklerer Untergrund zum Vorschein, sei es das felsige Bett eines Gletschers oder das Meer. Diese freigelegte Oberfläche nimmt mehr Sonnenwärme auf, die wiederum



den Schwund des verbliebenen Eises beschleunigt. Dieser Mechanismus hat das Abschmelzen oder Abfließen und die Neubildung von Meereis und Gletschern weltweit aus dem Gleichgewicht gebracht. Auch der Grönländische und der Westantarktische Eisschild verlieren zurzeit an Masse, wengleich hier hauptsächlich andere Mechanismen wirken.

Der Rückgang der Arktischen Meereisfläche in den Sommermonaten kann als eine der anschaulichsten Auswirkungen der Erderwärmung gelten. Das Minimum (Abb. 2), das meist im September erreicht wird, zeigt im Vergleich zu der durchschnittlichen Bedeckung, die 1979 bis 2000 gemessen wurde, einen deutlichen negativen Trend von 6,71 auf 5,1 Millionen Quadratkilometer im Jahr 2009. Der Messwert des Jahres 2011 entspricht diesem Ausmaß, weist im Juli jedoch einen neuen Niedrigrekord auf. Eine solche Entwicklung übersteigt die Projektionen des Intergovernmental Panel on Climate Change der Vereinten Nationen.

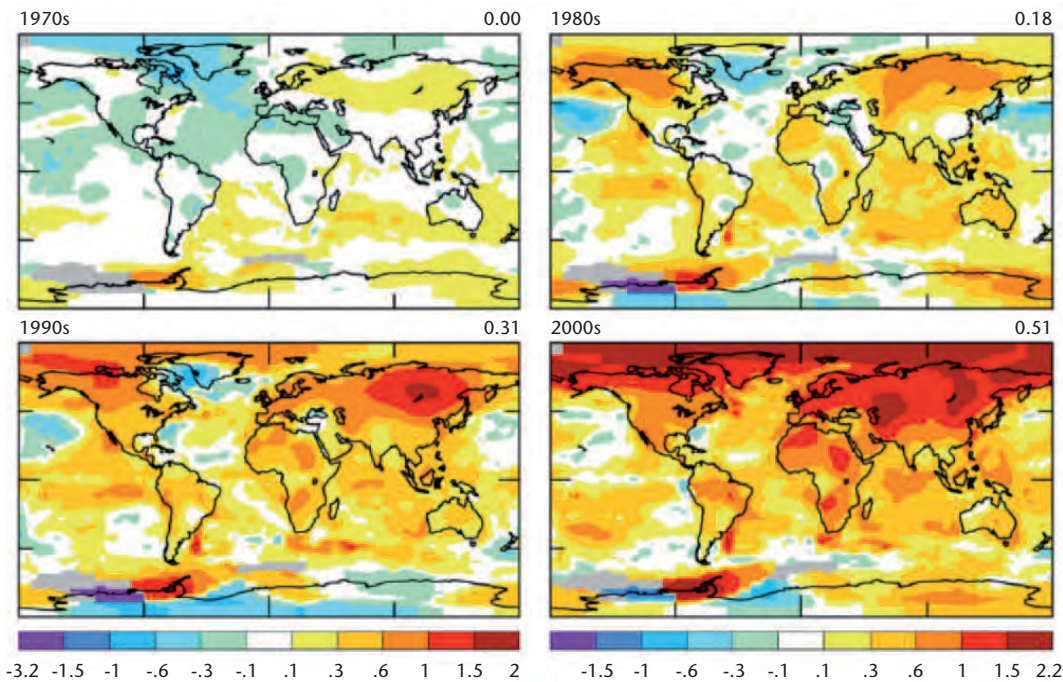


Abbildung 1  
Dekadische  
Oberflächen-  
Temperaturanomalien  
(Referenzzeitraum  
1951–1980) [1]

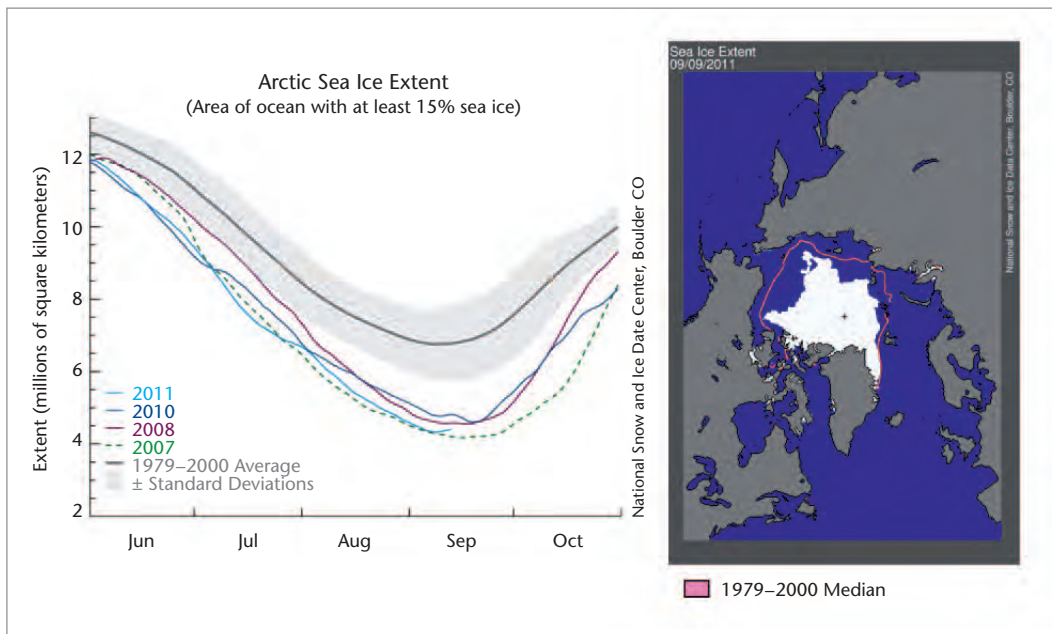


Abbildung 2  
Arktisches Meereismini-  
mum 2011 nahe am  
bisherigen Rekord. [2]

Eine unmittelbare Folge des Meereisrückganges ist die Öffnung sowohl der Nordwest-Passage als auch der Nordost-Passage, die im Sommer eisfrei sind. Mit dem schwindenden Eis werden jedoch auch neue Quellen fossiler Ressourcen zugänglich. Darin besteht die grausame Ironie: Den Verursachern des Klimawandels wird durch seine inhärenten Folgen ein Weitermachen-wie-bisher erleichtert.

Auch in anderen Bereichen wird der Klimawandel sichtbar, wenngleich noch Unsicherheiten bei der Zuordnung und der Einschätzung verschiedener Ereignisse bestehen. Eine weltweite Debatte wird darüber geführt, ob Stürme und Extremereignisse zunehmen. Die Antwort ist subtil. Schaut man sich die großen Sturmereignisse der vergangenen Jahre an, so lässt sich eine Gemeinsamkeit feststellen: Es handelt sich um die größten, am weitesten

ausgedehnten, tropischen Tiefdruckgebiete seit Beginn der Aufzeichnungen. Der gegenwärtige Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis lässt es als wahrscheinlich annehmen, dass in Zukunft stärkere tropische Stürme mit höheren Windgeschwindigkeiten auftreten werden. Ihre Zahl hingegen wird wahrscheinlich abnehmen, was durch die begrenzte Meeresoberfläche bedingt ist, über der sich Stürme bilden. Die Problematik besteht folglich nicht darin, dass mehr Ereignisse eintreten werden, sondern dass sie wesentlich größeren Schaden anrichten können. Denn das Schadenspotenzial skaliert in etwa mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit, also  $V^3$  multipliziert mit einer Konstante. Diese Funktion ist hochgradig nicht-linear.

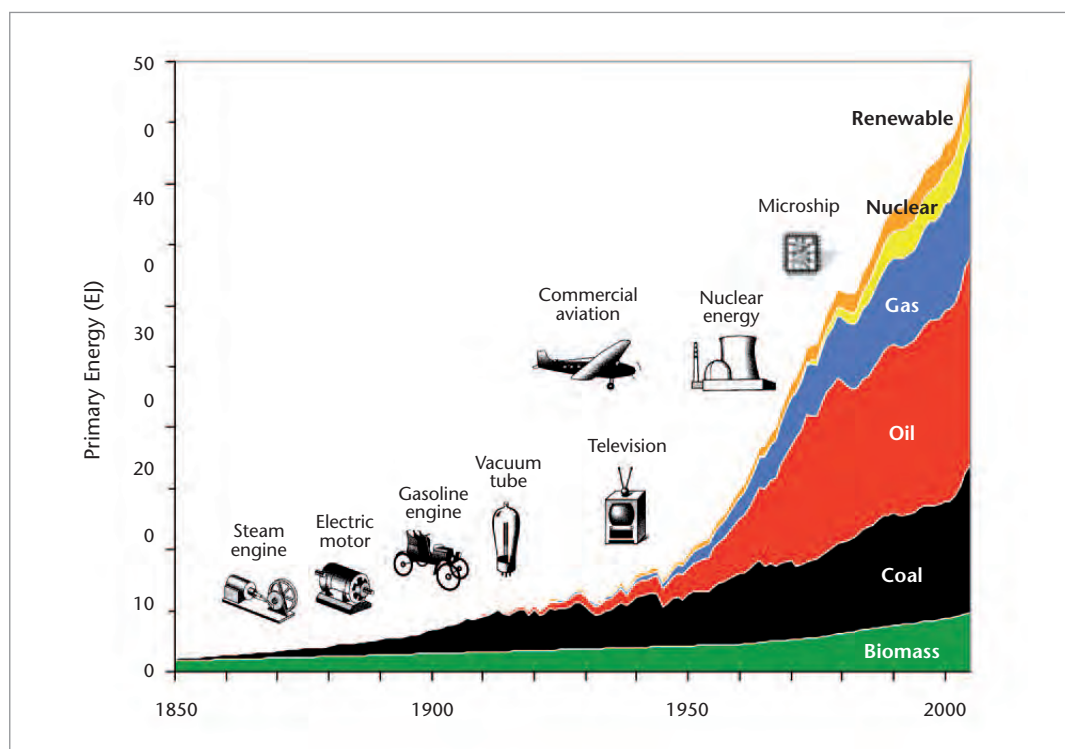
### Primärenergieeinsatz und Klimaänderungen

Was steht hinter der Eisschildschmelze und den immer energiereicher werdenden Tropenstürmen? Es ist die Energiegeschichte der Menschheit, genauer: der Primärenergieeinsatz seit 1850 (Abb. 3). Die erste Industrielle Revolution legte mit der

Kohle eine völlig neue energetische Grundlage für die Gesellschaft. Die zweite Industrielle Revolution wurde im Wesentlichen durch preiswertes Erdöl angetrieben. Erdgas wurde später ergänzt, ebenso wie Nuklearenergie und bis heute sehr wenig erneuerbare Energien.

Der Beginn der ersten Industriellen Revolution lässt sich nahezu exakt datieren: In Manchester wurde um 1785 zum ersten Mal eine Textilmaschine mit einer Dampfmaschine gekoppelt, was rasante Entwicklungen in Nachfrage und Angebot zur Folge hatte. Es handelt sich hierbei um ein Zusammenkommen weniger Faktoren in einer einmaligen Konstellation. Die notwendigen Kohlegruben, die den neuen Bedarf decken konnten, befanden sich in direkter Nähe. Anfangs deckte Walöl den wachsenden Bedarf nach Energieressourcen. Die Tiere fanden gleich mehrfach Verwertung. Denn Fischbein war eine wesentliche Grundlage für das Anfertigen von Miedern. Dafür wurde ein massiver Walf betrieben, der so weit führte, dass die Tiere nahezu ausgerottet wurden. Als es immer weniger Wale gab, musste man als Alternative zu Petroleum, sogenanntem Steinöl, übergehen. Das wurde ab 1876 vor allem in Pennsylvania gefördert.

Abbildung 3  
Historischer  
Weltprimärenergie-  
einsatz [3]



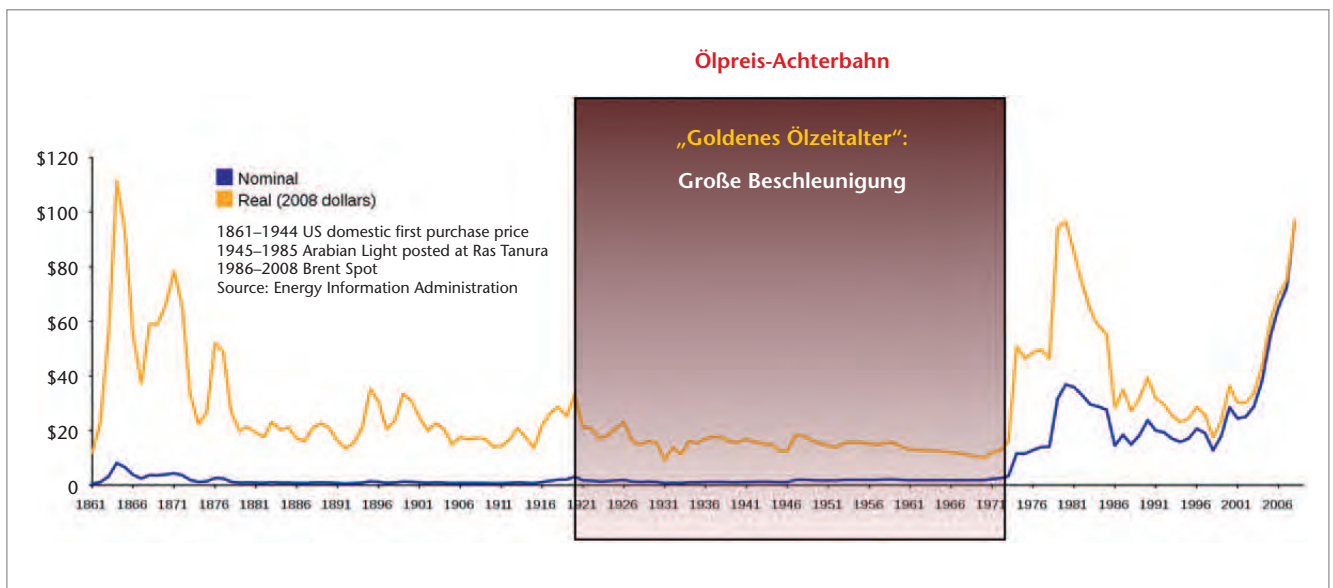


Abbildung 4  
Ölpreisverlauf von  
1861 bis 2008 [4]

Gemeinhin wird der Name John D. Rockefeller mit dem Siegeszug des Erdöls in Verbindung gebracht. Eine entscheidende Rolle für die Ausdehnung und den Einsatz des Erdöls spielte jedoch auch Winston Churchill. Als erster Lord der britischen Admiralität beschloss dieser kurz vor dem ersten Weltkrieg, die britische Kriegsflotte von Kohlefeuerung auf Erdöl umzustellen. Damit wurde die zweite Industrielle Revolution eingeläutet.

Der Ölpreis war in den 1860er-Jahren sehr hoch. Eine entscheidende Phase begann dann 1920: Die Preise begannen zu sinken, bis sich die OPEC-Ölpreisschocks der 1970er Jahre ereigneten. Diese Periode lässt sich als das goldene Ölzeitalter bezeichnen (Abb. 4). Die Ökonomen sehen in dieser Zeit die *great acceleration*, die große Beschleunigung, während derer der Metabolismus<sup>1</sup> der modernen Wirtschaft erfunden wurde.

## Die Ressourcen für Flüssigtreibstoffe auf diesem Planeten

Gegenwärtig verbraucht die Menschheit pro Jahr das Äquivalent von fünf Millionen geologischen Jahren der Erdöl-Bildungszeit. Mit anderen Worten: Über geochemische Prozesse dauerte es fünf Millionen Jahre, bis sich das Erdöl gebildet hatte, das heute in einem Jahr konsumiert wird.

Ein Vergleich der unterschiedlichen Erdölvorkommen, gemessen an dem jeweiligen Preissegment der Förderung, gibt Aufschluss über das baldige Ende billigen Öls (Abb. 5). Kostenreiche Förderungen werden bereits jetzt betrieben. Dabei ist das bisher extrahierte konventionelle Erdöl selbstverständlich am kostengünstigsten. Gefördert wurden hiervon circa 1000 Giga-Barrel. Vergleichbare Kosten weist das Öl im *Middle East North Africa* auf. Dann folgt zu ebenfalls vergleichbaren Kosten das sogenannte andere konventionelle Öl in anderen Regionen der Welt. Mit enorm steigenden Förderkosten jedoch ist das sogenannte *Enhanced Oil Recovery, Deep and Arctic* verbunden – in diesem Bereich der Ölförderung ist beispielsweise die explodierte Plattform „Deep Water Horizon“ zu verorten wie auch die Vorräte unter den schmelzenden Polkappen. Zu noch höheren Kosten sind die Teersande in Alberta und Orinoco zu gewinnen. Schieferöl, das z. B. in Utah, in den USA zwar in großem Maße existiert, und nur mit extrem aufwändigen Verfahren zu fördern ist, ist wiederum noch teurer zu extrahieren. Schließlich sind die eigentlichen Geister, die noch „in der Flasche“ sind, nämlich *Gas to liquid* und *Coal to liquid*, zu nennen: Die Verflüssigung von Kohle zu Treibstoff. Die globalen Kohlevorkommen sind ziemlich groß. Die Menschheit verbraucht hiervon pro Jahr „nur“ das Äquivalent von 10.000 geologischen Jahren. Es ist jedoch der Preis der Konversion, der hier die Kosten in die Höhe treibt.

1 Metabolismus = Stoffwechsel (Anm. der Redaktion)

Abbildung 5  
Zukünftiger  
Ölpreisanstieg [5]

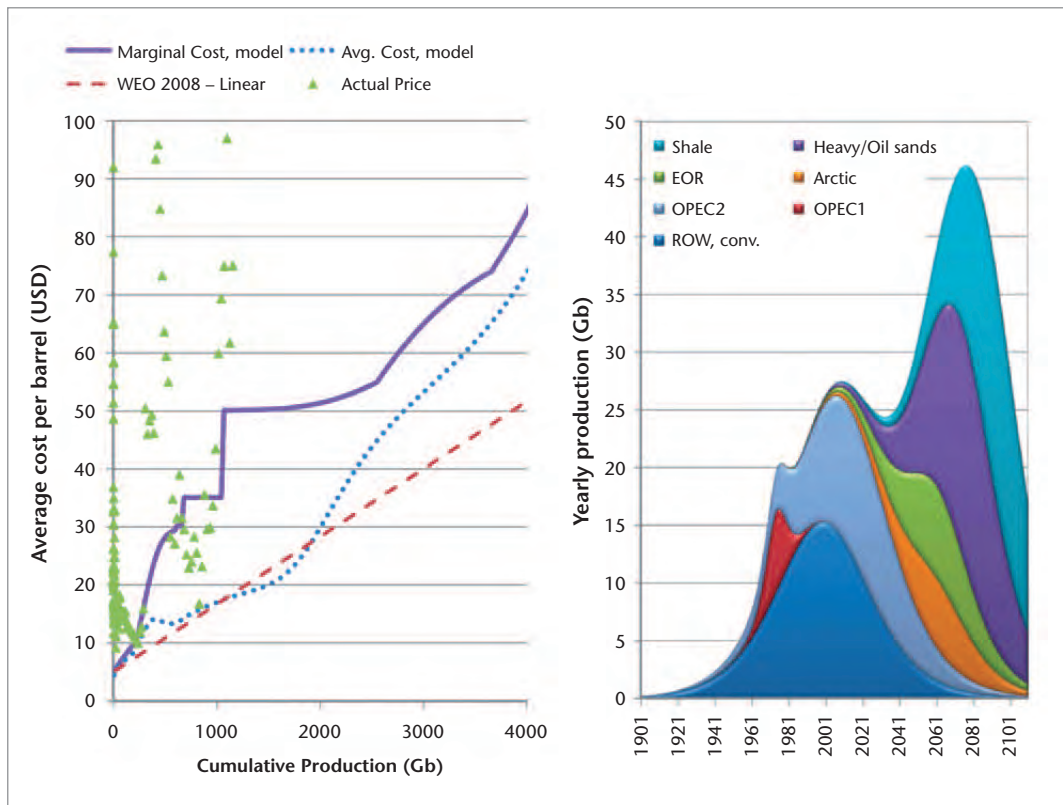


Tabelle  
Die zwölf weltgrößten  
Unternehmen 2011 [6]

Rank	Company	Revenues (\$ millions)	Profits (\$ millions)
1	Wal-Mart Stores	421,849	16,389
2	Royal Dutch Shell	378,152	20,127
3	Exxon Mobil	354,674	30,460
4	BP	308,928	-3,719
5	Sinopec Group	273,422	7,629
6	China National Petroleum	240,192	14,367
7	State Grid	226,294	4,556
8	Toyota Motor	221,760	4,766
9	Japan Post Holdings	203,958	4,891
10	Chevron	196,337	19,024
11	Total	186,055	14,001
12	ConocoPhillips	184,966	11,358

Insgesamt lässt sich sagen, dass mit den Ressourcen, die man fördern möchte, der Förderpreis bis zu einem gewissen Punkt nahezu linear steigt. Mit dem Übergang von *Coal to liquid* jedoch wird der Treibstoff immer teurer.

Die jüngst im Forbes Magazine abgedruckte Liste der 12 größten Unternehmen der Welt im Jahr 2011 (siehe *Tabelle* oben) zeigt, dass acht dieser Konzerne mit dem Vertrieb oder der Förderung von Erdöl verbunden sind. Vor allem ist diese

Ressource von entscheidender Bedeutung für das Transportwesen auf diesem Planeten. Hier sind es unter anderem die Frachtschiffe, die Erdöl verschlingen, denn 95 Prozent aller Frachttransporte passieren per Schiff. Die größten Unternehmen der Welt sind also entweder selbst Erdöl-Förderer oder sind mit dem Transport von Waren beschäftigt. Die Abhängigkeit eines großen Teiles der Weltwirtschaft von dieser Ressource, deren Förderkosten steigen werden, ist in der genannten Liste versinnbildlicht.



## „Der dreifache Hammerschlag“ Die neuen Szenarien des Weltklimarats

Das Bevölkerungswachstum verschärft die skizzierte Situation gefährlichen Klimawandels und schwindender billiger Flüssigtreibstoffe zusätzlich, da immer mehr Menschen mit Energie versorgt werden müssen und gleichzeitig den Folgen des Klimawandels ausgesetzt sind. Die sich hieraus ergebende Dreifachproblematik liegt jedoch jenseits der Vorstellungskraft, zumal sie negative Synergien hervorbringt: Die Klimaerwärmung wird mit großer Wahrscheinlichkeit die landwirtschaftliche Produktion behindern, die zukünftig bis zu zehn Milliarden Menschen ernähren soll. Der projizierte Meeresspiegelanstieg bedroht weite Küstengebiete und somit Lebensräume, auch wenn er unter einem „business as usual“-Szenario der Emissionen und damit zusammenhängenden Temperaturen bis 2100 „nur“ einen Meter betragen wird. Allerdings wird ein solcher Anstieg regional extrem uneinheitlich auftreten. Vor der Ostküste der USA wird der Meeresspiegel wahrscheinlich eher sinken. Dies hat einen einfachen physikalischen Prozess zur Ursache: Die Hauptbeiträge des Meeresspiegelanstieges werden vom Abschmelzen Grönlands kommen. Grönland wird also an Masse verloren haben. Damit verliert es auch Gravitationsfähigkeit und kann das Wasser vor seiner Küste nicht mehr in gleichem Maße wie bisher halten. Stattdessen fließt das Wasser in die tropischen Zonen, zum Beispiel zu den Malediven. – Auch die Physik, so will es scheinen, kann ungerecht sein.

Die neuen Szenarien, die der IPCC für seinen im Jahr 2014 erscheinenden Bericht entwickelt, geben die Bandbreite zukünftiger Emissionsentwicklungen wider.

Zwei Bündel von Schlüsselszenarien, wie sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Beständen entwickeln könnten, lassen sich hierbei denken:

1. Es gibt weiterhin praktisch keine Klimapolitik – also *business as usual*, oder 2. die Staaten der Welt betreiben eine starke Klimapolitik.

Im Jahr 1800 betragen die Emissionen fast null, heute sind wir bei etwa 32 Gigatonnen pro Jahr – also 32 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>. In seinem pessimistischsten Szenario „representative concentrations pathway RCP8.5“ nimmt der IPCC einen Konzentrationsverlauf an, bei dem die Emissionen auf über 100 Gigatonnen im Jahr anwachsen (Abb. 6). Dies wäre zwar fatal – liegt bei einer Fortschreibung der gegenwärtigen Wirtschaftsweise aber durchaus im Bereich des Möglichen. Schließlich stehen genügend fossile Brennstoffe zur Verfügung, und notfalls kann man auch Kohle verflüssigen. Ab dem Jahr 2200 werden in diesem Szenario die Emissionen einfach künstlich abgeschnitten, weil angenommen wird, dass sich die Kosten der Förderung nicht mehr ökonomisch rechtfertigen lassen. Das optimistische Szenario

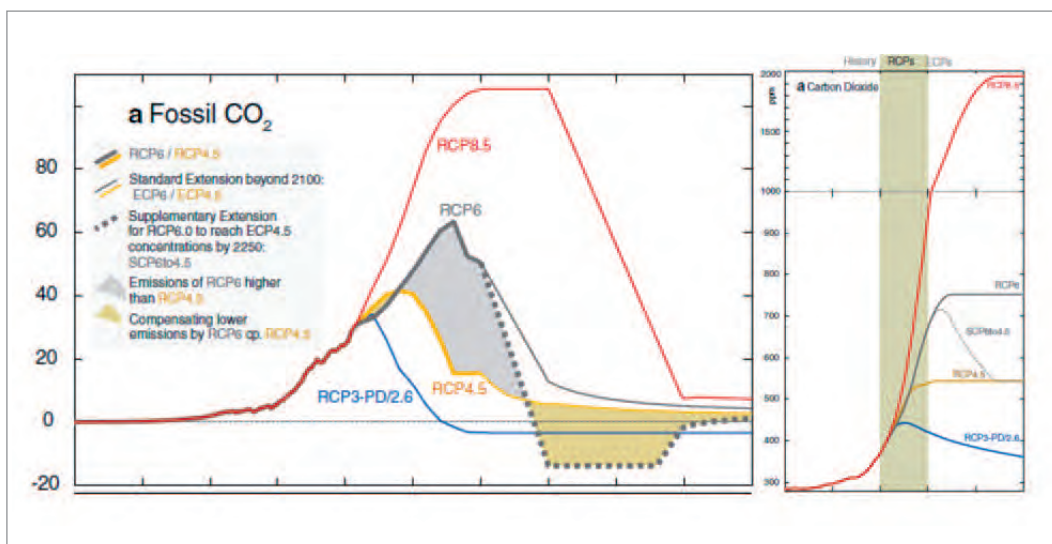
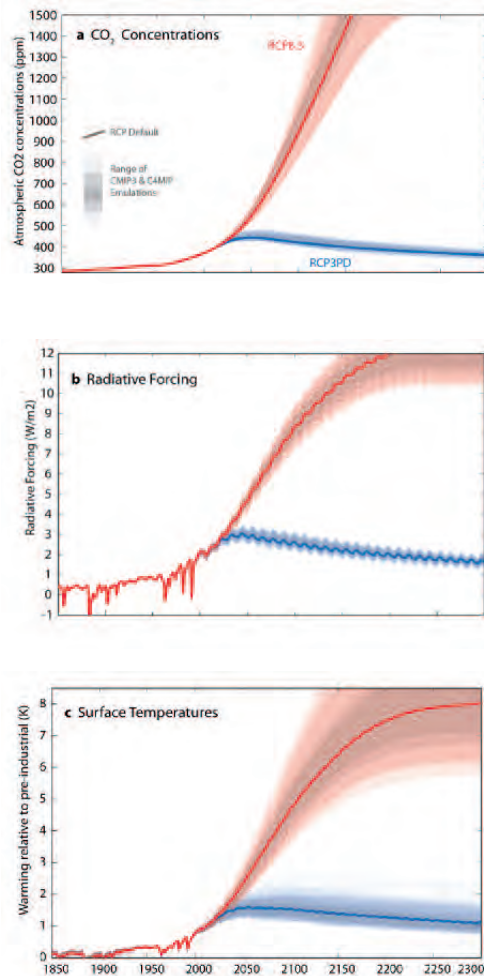


Abbildung 6  
Die nächste Generation von Szenarien, Verlauf der Emissionen 1800 bis 2300 [7]

Abbildung 7  
Szenarien für die  
CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in  
der Atmosphäre, den  
Strahlungsantrieb und  
die Temperatur [8]



des IPCC, RCP3-PD/2.6, beschreibt das andere Extrem. Ab einem Scheitelpunkt etwa im Jahr 2020 sinken die Emissionen bis zum Jahr 2070 auf null und anschließend unter die Nulllinie. Letzteres wären negative Emissionen, das heißt, es werden künstliche Senken von CO<sub>2</sub> geschaffen. Nur in diesem optimistischen Szenario kann das Zwei-Grad-Limit eingehalten werden. Diese 2 °C-Leitplanke wurde völkerrechtlich von 194 Nationen im Dezember 2010 in Cancún beschlossen.

Extrem ist das oben genannte optimistische Szenario (Abb. 6) deshalb, weil es in Wirklichkeit nicht nur ein Emissions-Reduktions-Szenario ist, sondern ein Emissions-Inversions-Szenario. Die hierfür notwendige absolute Trendwende bedeutet in einem ersten Schritt, den kompletten industriellen Metabolismus auf erneuerbare Energien umzustellen. Vom zweiten Schritt, den negativen Emissionen, wissen wir noch nicht, ob er

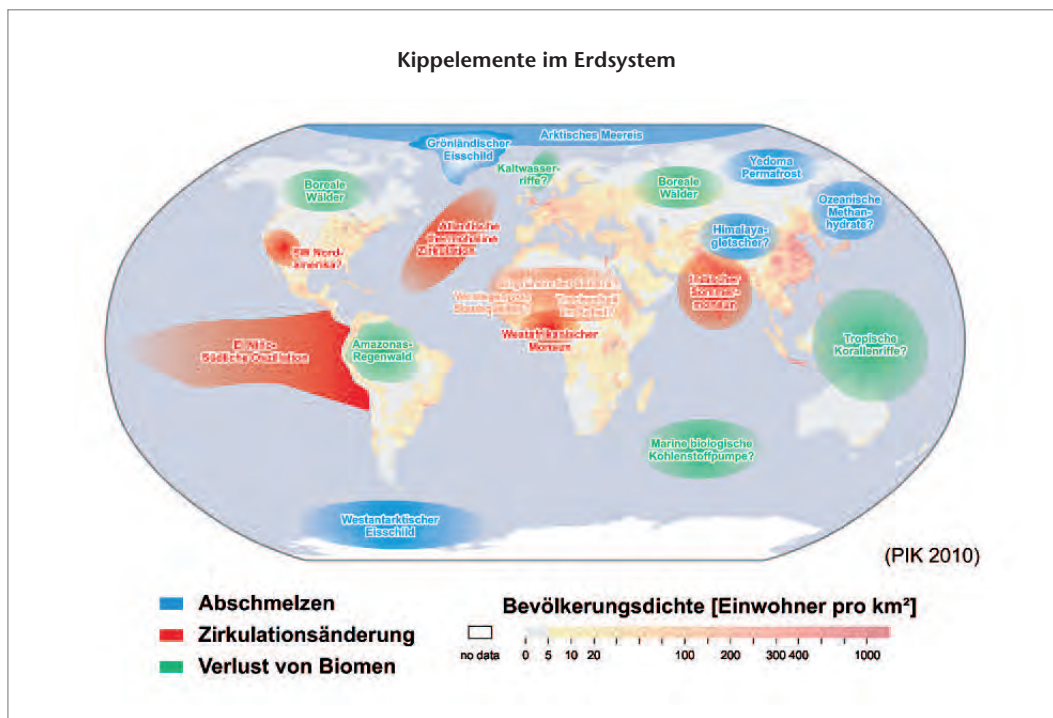
umgesetzt werden kann. Eine Möglichkeit wäre die Nutzung der Biomasse im großen Stil. Bäume binden über die Photosynthese Kohlendioxid aus der Atmosphäre. Kohle ist genau der Überrest von photosynthetischen Leistungen, der sich über Millionen Jahre gebildet hat. Wenn Biomasse in großem Stil energetisch genutzt würde, der Kohlenstoff aber abgeschieden und entweder auf die Felder gebracht oder unterirdisch verpresst würde, dann ließe sich das Emissions-Inversions-Szenario realisieren.

In dem absolut radikalen Inversionsszenario steigt die atmosphärische Konzentration auf 420 ppm (vorindustriell waren es 280 ppm, heute sind es 390) aber im *business as usual*-Szenario RCP8.5 kommt man im Jahre 2200 auf 2000 ppm. Die den Emissionsszenarien entsprechenden Temperaturunterschiede lassen sich ebenfalls errechnen.

Das Emissions-Inversionsszenario würde etwa an das 2 °C-Limit herankommen und könnte anschließend langsam die Temperaturen wieder reduzieren. Es würde vermutlich 10.000 Jahre dauern, bis wieder Normaltemperaturen etabliert wären. In dem pessimistischen Szenario kommt man nach 2100 Berechnungen des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung zufolge im Mittel auf 8 °C Erwärmung gegenüber dem mittleren Niveau in der Warmzeit, in der wir uns – geologisch gesehen – heute befinden.

Bei Temperaturprojektionen gibt es zweifellos Unsicherheiten (Abb. 7). Die Szenarien werden mit 27 verschiedenen Modellen berechnet, die zahlreiche Parameter durchspielen. Doch trotz aller Unsicherheiten liegt eine große Differenz zwischen den Temperaturverläufen beider Szenarien. Das ist die so genannte Bifurkation<sup>2</sup>, vor der die menschliche Zivilisation steht. Leider lehrt die theoretische Physik, dass Bifurkationen in der Regel irreversibel sind. Wenn das Klimasystem erst einmal entsprechend angestoßen ist, kann man es nicht mehr einfach zurückdrehen.

2 Bifurkation ist ein Begriff aus der nichtlinearen Dynamik für eine Zustandsänderung. Nichtlineare Systeme, deren Verhalten von einem Parameter abhängt, können bei einer Änderung des Parameters ihr Verhalten plötzlich ändern. Zum Beispiel kann ein System, das zuvor einem Grenzwert zustrebte, nun zwischen zwei Werten hin und her springen, also zwei Häufungspunkte aufweisen. (Wikipedia; Anm. der Redaktion)



**Abbildung 8**  
Die gegenwärtigen Risikozonen – Kippelemente<sup>3</sup> im Erdsystem [9]

## Niederschläge

Der große Pionier der Computermodellierung für das Klimasystem, der Japaner Syunkuro Manabe, hat gezeigt: Dort, wo es heute sehr trocken ist, also im Mittelmeerraum, Westaustralien, Namibia, Nordost-Brasilien, wird es durch die Erderwärmung noch trockener werden. Wo die Niederschläge hingegen schon heute hoch sind, da wird es noch mehr regnen.

Es wird also nicht so sein, dass sich die Niederschlagsveränderungen homogen verteilen werden, sondern die heutige Polarisierung wird noch vertieft. Das hängt mit der Walzenstruktur der Atmosphäre zusammen. Über dem Äquator baut sich ein permanentes Tiefdruckgebiet auf. Die Erde erwärmt sich, warme Luft steigt auf, strömt in großer Höhe nach Süden und Norden und kommt dann in den Wüstengürteln, in den sogenannten Rossbreiten wieder herunter, wo sich permanente Hochdruckgebiete befinden. Durch die zusätzliche Energie verändern sich nun die Strukturen in der Atmosphäre und an der Erdoberfläche: So genannte „Kippelemente“ im Erdsystem können aktiviert werden (Abb. 8), wie z. B. die Monsun-Systeme in Westafrika und Indien, das El Nino-Phänomen, aber auch die Eisschilde.

Werden hier Grenzwerte überschritten, entstehen positive Rückkopplungen und der Effekt der Erwärmung wird signifikant verstärkt. Im Resultat kann das zu bleibenden Veränderungen auf großer Skala führen. Ein Beispiel dafür ist das unumkehrbare Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes, dessen abschmelzende Oberfläche von oben in immer niedriger gelegene, wärmere Luftschichten absinkt und dadurch noch schneller schmilzt. Eine Temperaturerhöhung, die über die 2°-Leitplanke hinausgeht, birgt nun unserer Ansicht nach das Potenzial, diese Komponenten des Erdklimasystems an ihren Kipp-Punkt zu bringen.

Dies ist letztendlich der entscheidende, systemische Grund, warum das 2 °Celsius-Limit verhandelt wird: In der Wissenschaft liegen zwar keine Beweise, aber gute Hinweise darauf vor, dass unterhalb der 2°-Leitplanke die Wahrscheinlichkeit für das Überschreiten solcher Kipp-Punkte deutlich geringer ist. Aber es ist selbstverständlich die Aufgabe der Forschung, diese Hinweise immer

3 In den Gebieten mit Kippelementen finden Prozesse statt, die aufgrund von sich selbstverstärkenden Rückkopplungen einen Schwellenwert besitzen. Wird dieser überschritten, reagiert das System besonders sensitiv auf bereits kleine äußere Störungen und entwickelt eine Eigendynamik hin zu einem anderen Zustand, der nicht reversibel ist.

klarer und genauer herauszuarbeiten. Die Grenzlinien, jenseits derer die großen irreversiblen Veränderungen stattfinden, müssen noch viel besser verstanden werden. Es gilt also, erstens die Nicht-linearitäten im Klimasystem zu identifizieren, die solche Kippelemente erst hervorrufen, und zweitens die Lage der Kipp-Punkte zu verstehen, um Aussagen darüber treffen zu können, wann die Systeme kippen.

## Die Konsequenzen der neuen Szenarien

Bei der Berechnung von Temperaturanstiegen in den unterschiedlichen Szenarien spielen auch Methan und Lachgas eine Rolle, die in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten dargestellt werden. Fast alle Modelle liefern Geraden, also lineare Verhältnisse. Und das liegt daran, dass sich verschiedene nichtlineare Prozesse quasi gegenseitig aufheben, so dass nur die linearen Rumpfterme übrigbleiben. Das Ergebnis bedeutet, dass wir so etwas wie einen **endlichen** Kohlenstoffkredit von der Natur bekommen. Mit anderen Worten, wenn wir das 2°C-Ziel einhalten wollen, um drastische nicht-lineare Effekte zu vermeiden, lässt sich ausrechnen, wie viel kumulierte Emissionen noch zur Verfügung stehen (*Abb. 9*). Diese Berechnung zeigt, dass die Einhaltung der 2°-Linie mit einer Wahrscheinlichkeit von zwei Dritteln noch eine Summe von 750 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub> erlaubt, die von heute bis zur Mitte des Jahrhunderts emittiert werden dürfen.

Hieraus ergeben sich Konsequenzen für die Klimapolitik. Im Augenblick werden weltweit über 30 Milliarden Tonnen Kohlendioxid in die Atmosphäre pro Jahr emittiert. Und von dem Scheitelpunkt der Emissionen hängt die Rate ab, mit der anschließend reduziert werden muss, um das globale Budget nicht zu überschreiten (*Abb. 10*).

Wäre 2015 der Scheitelpunkt erreicht, dann ergäbe sich daraus nicht nur die Reduktionsrate von 5% pro Jahr – wie im Kyoto-Protokoll insgesamt vereinbart! – sondern bis 2045 wäre der Kohlenstoffkredit dann auch schon vollständig aufgebraucht. Und wenn, was wesentlich wahrscheinlicher ist, der Scheitelpunkt erst im Jahr 2020 erreicht ist, dann müsste man im Jahr 9% CO<sub>2</sub> reduzieren und hätte schon 2040 den Kohlenstoffkredit aufgebraucht.

## Die Sieben Kardinalinnovationen

Wir brauchen einen radikalen Innovationspfad, der alle Bereiche unseres industriellen Metabolismus erfassen muss, wenn wir den oben genannten Raten auch nur annähernd gerecht werden und das Klimasystem stabilisieren wollen. Hierbei geht es im Wesentlichen um sieben Kardinalinnovationen:

1. Intensiver Ausbau der erneuerbaren Energien – das *Desertec-Projekt* könnte dabei ein Baustein sein.
2. Energieeffizientes und solares Bauen – Häuser, die mehr Energie erzeugen und ins Netz abgeben als sie verbrauchen.
3. Holistische Raum- und Städteplanung – Wie sieht eine nachhaltige und realistische Stadtplanung der Zukunft aus?
4. Neue Konzepte der Energieversorgung für den Transport – Elektromobilität allein wird nicht reichen.
5. Übergang zu Kreislaufwirtschaft in der Produktion (*Cradle-to-Cradle*) – Abfall- und Reststoffe werden die Ausgangsstoffe für erneute Fabrikationen.
6. Biomasse-Management, um künstliche Senken für CO<sub>2</sub> zu schaffen – beginnend bei besseren agrarischen Praktiken, fortgesetzt, indem große Mengen CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre herausgefiltert werden.
7. Sorgsamer Umgang mit Wasser – Solare Desalinierung als Königslösung.

Der WBGU hat noch vor den Ereignissen in Fukushima beschlossen, Energieszenarien zu berechnen, die vollständig ohne fossile und nukleare Energiequellen auskommen: das WBGU-Szenario auf der Basis aller Erneuerbaren: Sonne, Wind, Geothermie, Wasserkraft und Biomasse (*Abb. 11*).

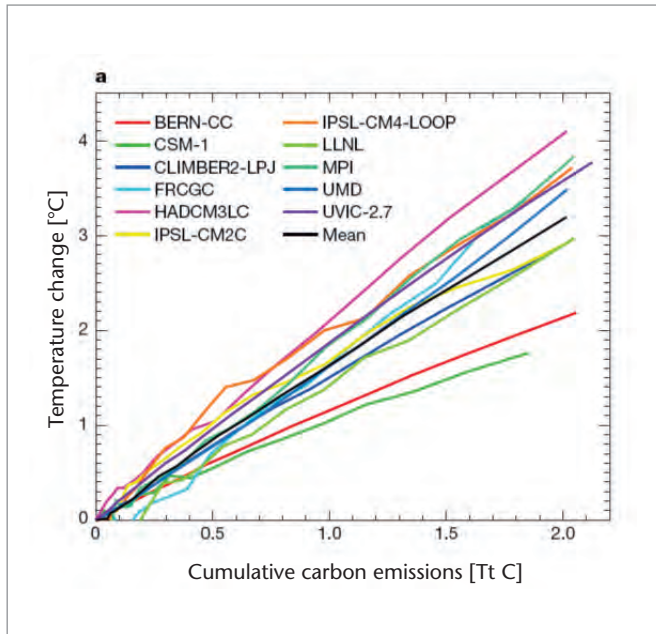


Abbildung 9  
Proportionalität von Temperaturanstieg und kumulativen Emissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten [10]

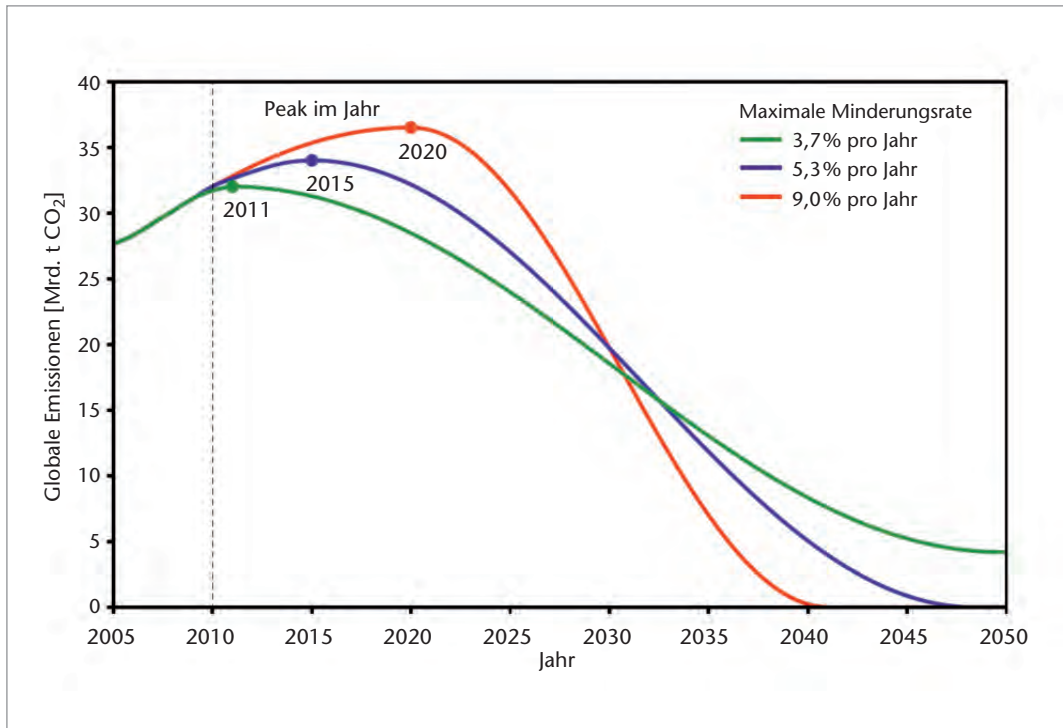


Abbildung 10  
Beispielhafte globale Emissionspfade für den Zeitraum 2010 bis 2050, bei denen 750 Mrd. t CO<sub>2</sub> emittiert werden. Bei dieser Menge kann die Erwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% unter 2 °C gehalten werden. (WGBU SG, 2009) [11]

Der WBGU misst der Energieeffizienz eine große Bedeutung zu. Denn ohne eine massive Erhöhung der Energieeffizienz ist es völlig unmöglich die Dekarbonisierung der Energieerzeugung zu erreichen. Der endgültige Energiemix wird aus einer Mischung von Wasserkraft, Biomasse, Geothermie,

Windenergie und Solarenergie bestehen (Abb. 12). Auch wenn die exakten einzelnen Anteile der verschiedenen erneuerbaren Energiequellen heute noch unklar sind, erscheint es sinnvoll, ein möglichst breites Spektrum an Optionen zu realisieren.

## Schlussfolgerungen für die Ökonomie

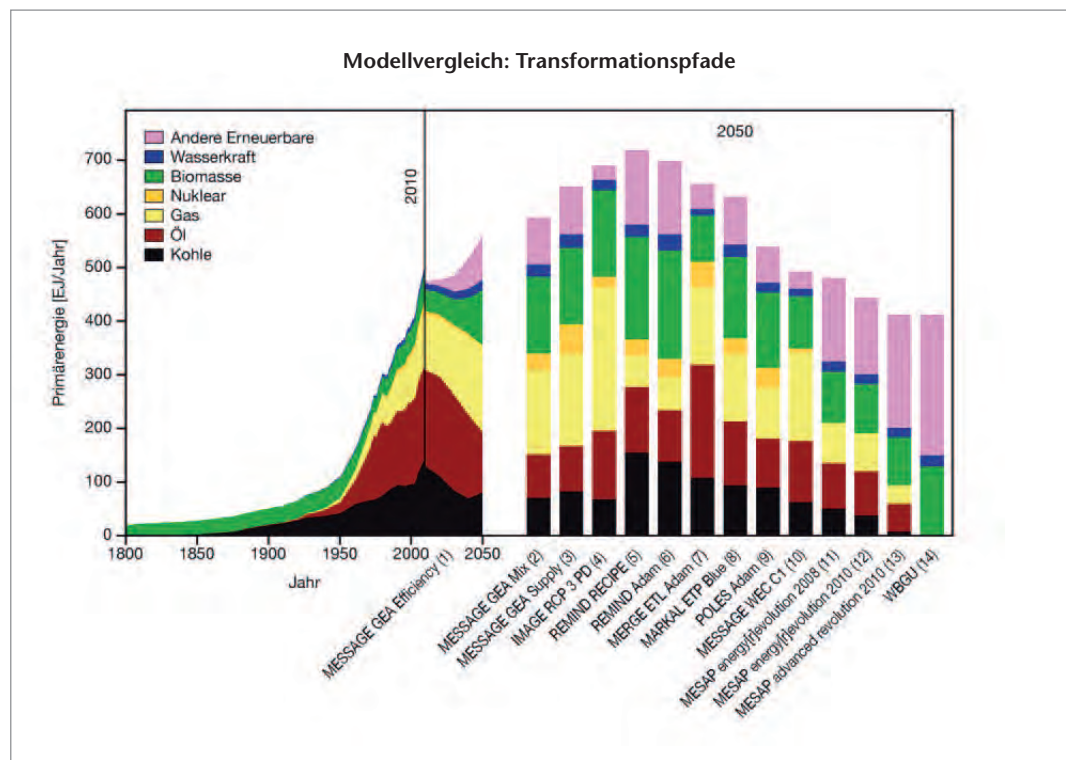
Ein ökonomisch entscheidender Faktor, der sich auch auf den Energiemix auswirken wird, sind die Lernkurven der einzelnen Technologien. Denn ab einem gewissen Punkt der Prozentanteile der Erneuerbaren an der Stromproduktion werden die Kosten der Energie aus erneuerbaren Quellen die Kosten der konventionellen Energieträger unterschreiten. Die Betrachtung der Lernkurven macht klar, dass mit dem Ausbau der Erneuerbaren diese mit den konventionellen und ohnehin mit den nuklearen Energiequellen sehr gut konkurrieren können (Abb. 13). Doch ein jedes Lernkurvenszenario hängt auch mit einer *economy of scales* zusammen und die wiederum braucht entsprechende Investitionen.

In den Modellrechnungen stellt sich dementsprechend heraus, dass der Investitionsbedarf, den man für die Transformation bräuchte, sehr hoch ist und 2030 bis 2050 bei etwa 33.000 Milliarden US-Dollar liegt.

Hierbei kann der Verkehrssektor der entscheidende Blockadefaktor sein (Abb. 14). Doch für den Transportsektor gibt es bisher noch keine überzeugende Lösung, wie die Kosten drastisch gesenkt werden können, wenn die Dekarbonisierung des Transportwesens durchgeführt werden soll. Die entscheidende Frage ist also: Wie können die Erneuerbaren den Schwergütertransport versorgen?

Es werden also Investitionen auf großer Skala getätigt werden müssen. Doch die Investitionsquoten in Deutschland sind noch immer relativ gering. Während die Unternehmensgewinne in den letzten Jahren kräftig gestiegen sind, ging die Investitionsquote in Prozent der Gewinne in der Finanzkrise sogar in den negativen Bereich zurück (Abb. 15). Nur ein winziger Bruchteil der erzielten Gewinne wurde tatsächlich investiert – und das kaum in die Infrastruktur der Energieversorgung.

Abbildung 11  
Energieszenarien auf der Basis traditioneller Energie-Ökonomie-Modelle (WGBU, 2011) [12]



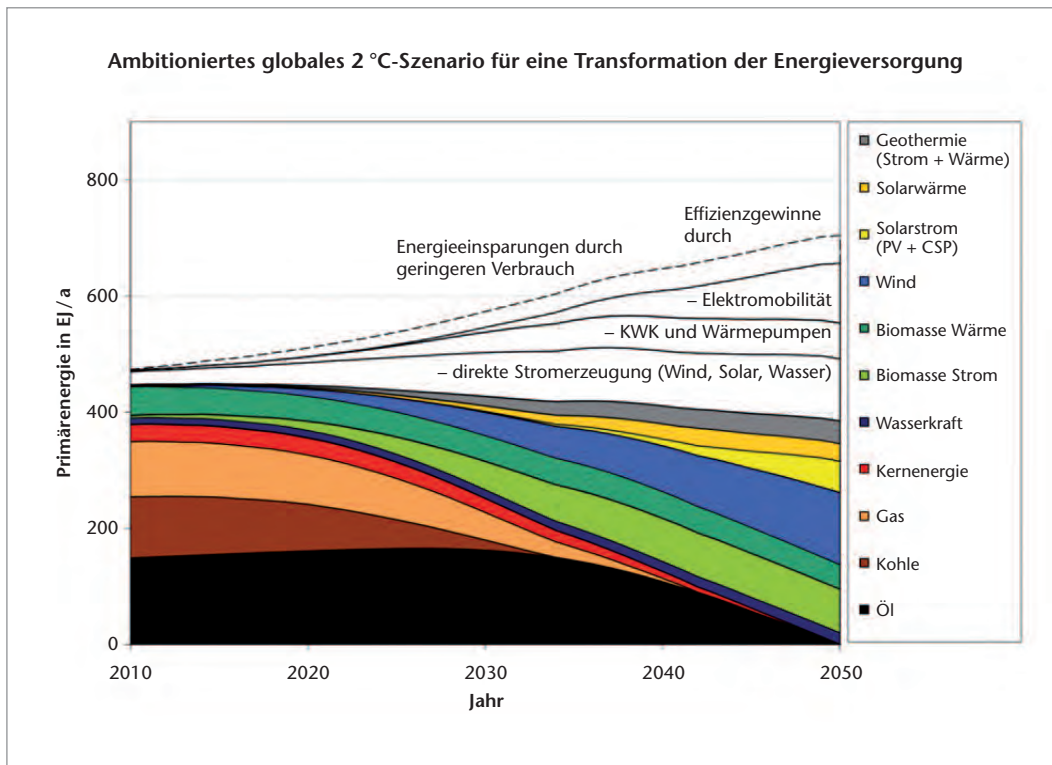


Abbildung 12  
 Szenario 100%  
 erneuerbare Energien:  
 Globaler Energiebedarf  
 bis 2050 nach der  
 Wirkungsgradmethode.  
 (WGBU, 2011) [12]

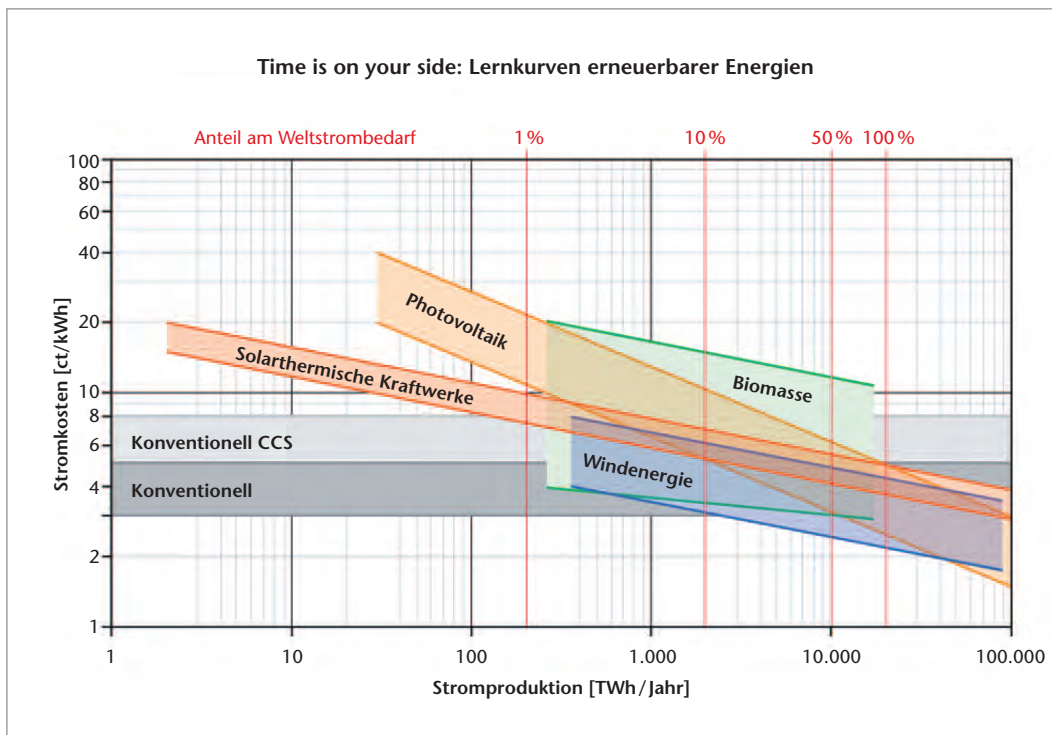


Abbildung 13  
 Lernkurven der Techno-  
 logien erneuerbarer  
 Energien als Funktion  
 der globalen jährlichen  
 Stromproduktion in  
 doppeltlogarithmischer  
 Auftragung im Vergleich  
 zu als konstant ange-  
 setzten Stromkosten  
 konventioneller Kraft-  
 werke. (WGBU, 2011)  
 [12]

## Die Große Transformationsaufgabe

Die Herausforderungen der Großen Transformation sind somit auch wirtschaftspolitischer Natur. Folgt man dem Weltbild der neoklassischen Ökonomie, dann ergibt sich aus der gegenwärtigen

Lage ein Kostenoptimum, das keine Anreize bietet, aus ihm auszubrechen (Abb. 16 a). Der gegenwärtige Pfad ist unter bestehenden Kostenabschätzungen der günstigste. Wenn man hingegen ernsthaftere ökonomische Wissenschaft betreibt, statt diesem vereinfachten Weltbild zu folgen, und man die externen Effekte – also zum

Abbildung 14  
Investitionsbedarf für eine Transformation zur Nachhaltigkeit. (WGBU, 2011) [12]

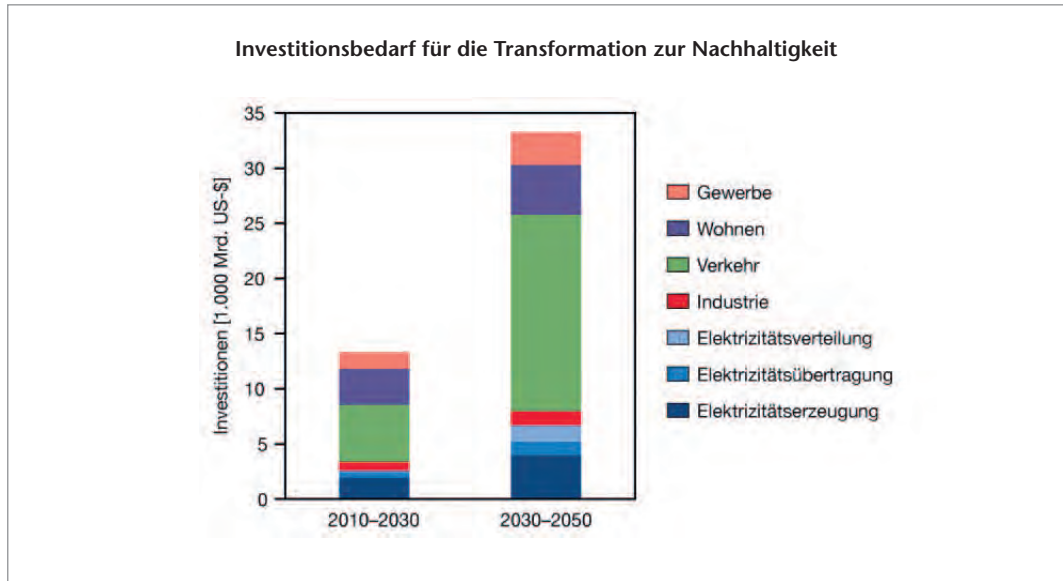
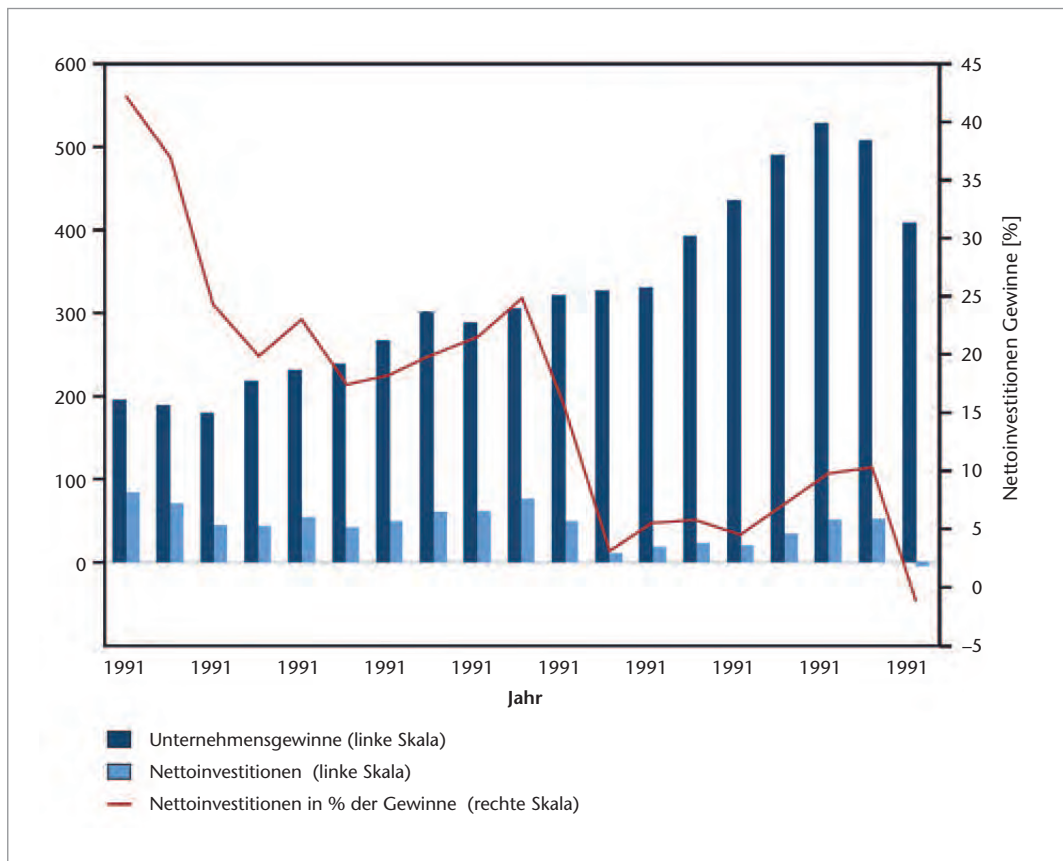


Abbildung 15  
Unternehmensgewinne und Investitionen in Deutschland. (WGBU, 2011) [12]





Beispiel die Umweltkosten – internalisiert, dann wird erkennbar, dass die tatsächlichen Kosten für das bestehende Gesamtsystem deutlich höher sind als neoklassisch angenommen (Abb. 16b).

Unter internalisierten Kosten ergibt sich dann ein wesentlich günstigeres Gleichgewicht, das durch eine Umstellung des industriellen Metabolismus auf erneuerbare Energien und Energieeffizienz realisiert werden könnte (Abb. 16c).

Jedoch gilt es den Übergang zwischen den beiden Minima – die Transformation – zu ermöglichen, der wie bereits erwähnt, nicht billig wird.

Zusätzlich bestehen zahlreiche Mechanismen, die die Kosten des gegenwärtigen Systems künstlich niedrig halten und eine Änderung der Lage erschweren. Einleuchtendes Beispiel sind die Subventionen von ungefähr 500 Milliarden Dollar pro Jahr für fossile Energien, wie kürzlich von der International Energy Agency bekannt gegeben wurde (Abb. 17a).

Es gilt also nun, die verzerrenden Mechanismen abzubauen und Anreize zu schaffen, das Kostenoptimum zu erreichen, das den wahren Kosten unseres industriellen Metabolismus gerecht wird (Abb. 17b, c).

Abbildung 16  
Bildliche Darstellung der wirtschaftspolitischen Herausforderungen der „Großen Transformation“. Erläuterungen siehe Text [12]

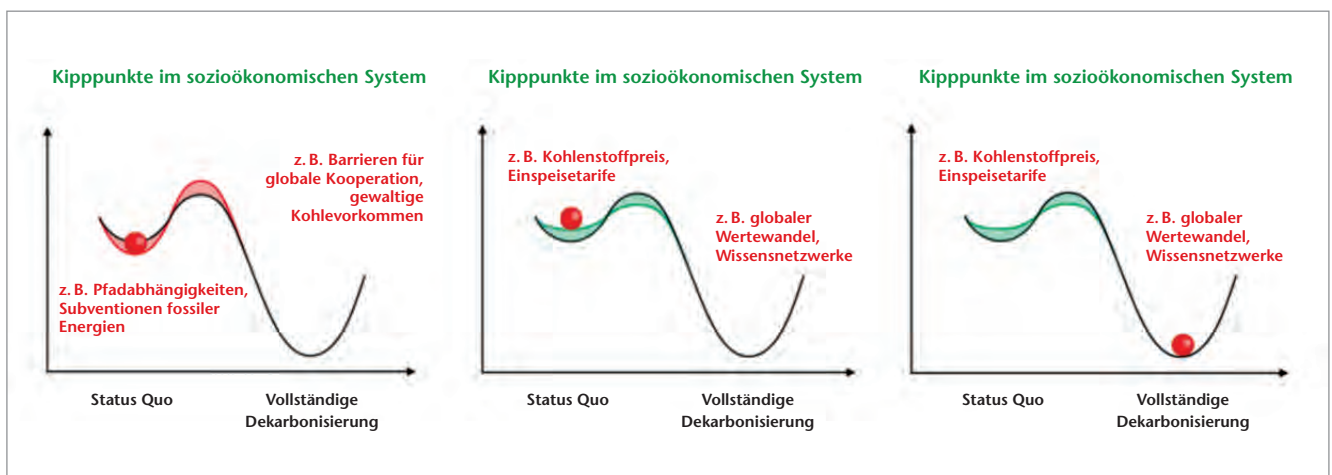
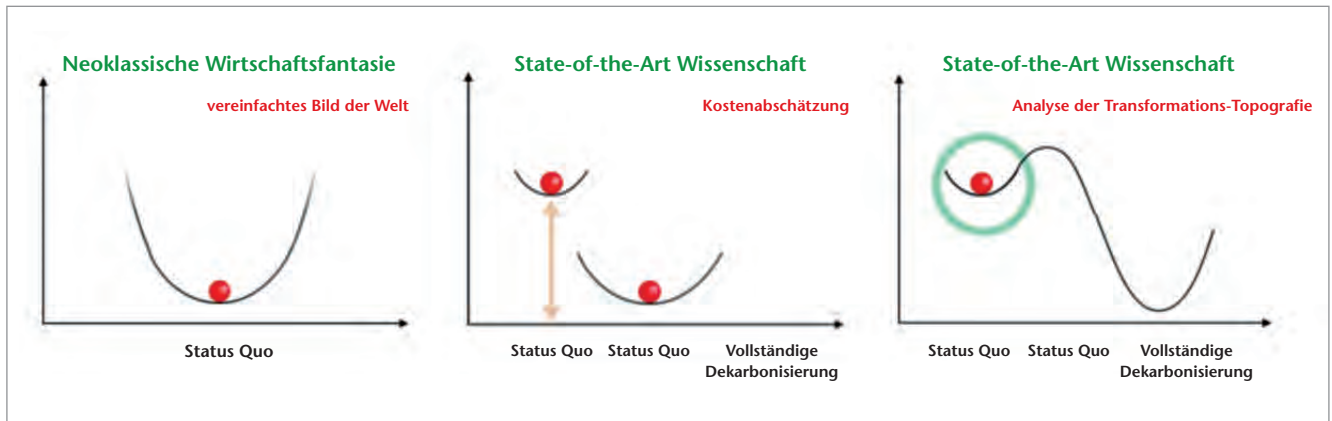


Abbildung 17  
Kippunkte im sozioökonomischen System [12]

## Abbildungsverzeichnis

- [1] Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. & Lo, K. Global Surface Temperature Change. *Rev. Geophys.* 48, (2010).
- [2] National Snow Ice & Ice Data Center, auf <http://nsidc.org/arcticseaicenews/>; aufgerufen am 29.03.2012
- [3] N. Nakicenovic, A. Grübler Energy and the protection of the atmosphere, *International Journal of Global Energy Issues*, 13 (1–3) (2000), pp. 4–57
- [4] nach Wikipedia 2009, auf <http://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96lpreis>; aufgerufen am 29.03.2012
- [5] Brecha & Kriegler *Ecological Economics* (2011), eingereicht 2011
- [6] nach *Fortune Magazine* 2011, Global 500, auf [http://money.cnn.com/magazines/fortune/global500/2011/full\\_list/index.html](http://money.cnn.com/magazines/fortune/global500/2011/full_list/index.html); aufgerufen am 29.03.2012
- [7] Meinshausen, M. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change* 109, 213–241 (2011).
- [8] Meinshausen, M. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change* 109, 213–241 (2011).
- [9] PIK, nach Lenton, T. M. et al. Tipping Elements in the Earth's Climate System. *PNAS* 105, 1786–1793 (2008).
- [10] Matthews, H. D., Gillett, N. P., Peter A. Stott, P. A., Zickfeld, K.: The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions. *Nature* 459, 829–832 (2009)
- [11] WBGU: SG 2009 Budgetansatz. <http://www.wbgu.de/sondergutachten/sg-2009-budgetansatz/>
- [12] WBGU: HG 2011 Transformation. <http://www.wbgu.de/hauptgutachten/hg-2011-transformation/>

# Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien

## Standorte der Mitgliedsinstitute



ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE) • Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin  
Telefon: 030 / 8062-41338 • [fvee@helmholtz-berlin.de](mailto:fvee@helmholtz-berlin.de) • [www.fvee.de](http://www.fvee.de)

## Mitgliedsinstitute und Ansprechpartner



**DLR** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft  
Zentrum Köln-Porz • 51170 Köln  
Dorothee Bürkle:  
Telefon 02203/601-3492  
dorothee.buerkle@dlr.de  
www.dlr.de

Standort Stuttgart  
Pfaffenwaldring 38-40 • 70569 Stuttgart

DLR-Projektteam auf der  
**PSA** Plataforma Solar de Almería  
Apartado 39 • E-04200 Tabernas (Almería)



**Forschungszentrum Jülich**  
52425 Jülich  
Dr. Anne Rother:  
Telefon 02461/61-4661  
info@fz-juelich.de  
www.fz-juelich.de



**Fraunhofer IBP** Fraunhofer-Institut für Bauphysik  
Nobelstr. 12 • 70569 Stuttgart  
Rita Schwab:  
Telefon 0711/9703301  
rita.schwab@ipb.fraunhofer.de  
www.ipb.fraunhofer.de

Standort Holzkirchen  
Fraunhoferstr. 10 • 83626 Valley  
Janis Eitner:  
Telefon 08024/643-203  
janis.eitner@ibp.fraunhofer.de

Projektgruppe Kassel  
Gottschalkstrasse 28a • 34127 Kassel



**Fraunhofer ISE**  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme  
Heidenhofstraße 2 • 79110 Freiburg  
www.ise.fraunhofer.de  
Karin Schneider:  
Telefon 0761/4588-5147  
karin.schneider@ise.fraunhofer.de

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP  
Walter-Hülse-Straße 1 • 06120 Halle

Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM  
Am St.-Niclas-Schacht 13 • 09599 Freiberg

Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen  
Auf der Reihe 2 • 45884 Gelsenkirchen



**Fraunhofer IWES**  
Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik  
www.iwes.fraunhofer.de

Institutsteil Kassel  
Königstor 59 • 34119 Kassel  
Uwe Kregel:  
Telefon 0561/7294-345  
uwe.kregel@iwes.fraunhofer.de

Institutsteil Bremerhaven  
Am Seedeich 45 • 27572 Bremerhaven  
Britta Rollert  
Telefon 0471/ 902629-51  
info@iwes.fraunhofer.de



**GFZ** Helmholtz-Zentrum Potsdam  
Deutsches GeoForschungsZentrum  
Telegrafenberg • 14473 Potsdam  
Franz Ossing:  
Telefon 0331/288-1040  
ossing@gfz-potsdam.de  
www.gfz-potsdam.de



**HZB** Helmholtz-Zentrum Berlin  
für Materialien und Energie  
Lise-Meitner-Campus  
Glienicker Straße 100 • 14109 Berlin-Wannsee  
Dr. Ina Helms:  
Telefon 030/8062-42034  
info@helmholtz-berlin.de  
www.helmholtz-berlin.de

Campus Wilhelm Conrad Röntgen  
Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin-Adlershof



**ISFH** Institut für Solarenergieforschung GmbH  
Hameln/Emmerthal  
Am Ohrberg 1 • 31860 Emmerthal  
Dr. Roland Goslich:  
Telefon 05151/999-302  
info@isfh.de  
www.isfh.de



**IZES**  
Institut für ZukunftsEnergieSysteme gGmbH  
Altenkessler Str. 17 • 66115 Saarbrücken  
Barbara Dröschel:  
Telefon 0681/9762- 852  
droeschel@izes.de  
www.izes.de



**WI** Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie  
Döppersberg 19 • 42103 Wuppertal  
Dorle Riechert:  
Telefon 0202/2492-180  
info@wupperinst.org  
www.wupperinst.org



**ZAE** Bayerisches Zentrum für  
Angewandte Energieforschung e.V.  
Am Hubland • 97074 Würzburg  
Anja Matern-Lang:  
Telefon 0931/70564-52  
matern-lang@zae.uni-wuerzburg.de  
www.zae-bayern.de

Standort Garching  
Walther-Meißner-Str. 6 • 85748 Garching

Standort Erlangen  
Am Weichselgarten 7 • 91058 Erlangen



**ZSW** Zentrum für Sonnenenergie- und  
Wasserstoff-Forschung Baden Württemberg  
Gemeinnützige Stiftung  
Industriestraße 6 • 70565 Stuttgart  
Karl-Heinz Frietsch:  
Telefon 0711/7870-206  
info@zsw-bw.de  
www.zsw-bw.de

Standort Ulm  
Helmholtzstraße 8 • 89081 Ulm

## Impressum • Themen 2011

# Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem

### Herausgeber

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)  
Kekuléstr. 5 • 12489 Berlin  
Tel.: 030/8062-41338  
Fax: 030/8062-41333  
E-Mail: [fvee@helmholtz-berlin.de](mailto:fvee@helmholtz-berlin.de)  
Internet: [www.fvee.de](http://www.fvee.de)

### Redaktion

Dr. Gerd Stadermann  
Petra Szczepanski  
Franziska Wunschick  
Dr. Niklas Martin

### Förderung

Der ForschungsVerbund Erneuerbare Energien wird durch diese Ministerien gefördert:

- BMU
- BMBF
- BMWi
- BMELV
- BMVBS

### Gesamtproduktion

Hoch3 GmbH – Design- und Werbeagentur

Berlin, März 2012

ISSN • 0939-7582





FVEE-Geschäftsstelle • Kekuléstraße 5 • 12489 Berlin • Telefon: 030 / 8062-41338  
E-Mail: [fvee@helmholtz-berlin.de](mailto:fvee@helmholtz-berlin.de) • [www.fvee.de](http://www.fvee.de)