



Leopoldina
Nationale Akademie
der Wissenschaften



Dezember 2015

Kurzfassung der Stellungnahme

Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050

Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Union der deutschen Akademien der Wissenschaften

Als Beitrag zum Klimaschutz soll die Stromversorgung in Deutschland überwiegend auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Die wichtigsten Energiequellen Wind und Sonne schwanken jedoch in Abhängigkeit vom Wetter. Flexibilitätstechnologien wie flexible Kraftwerke, Speicher oder Demand-Side-Management müssen diese Schwankungen ausgleichen. Doch welche Kombinationen verbinden Stabilität mit Nachhaltigkeit, Kosteneffizienz und gesellschaftlicher Akzeptanz? Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“ hat mithilfe eines eigens entwickelten Rechenmodells rund 130 Systemkonstellationen verglichen:

- Fast keine Technologie ist alternativlos, fast jede lässt sich zu überschaubaren Mehrkosten ersetzen – sofern die Weichen rechtzeitig gestellt und Fehlinvestitionen vermieden werden.
- Brennstoffflexible **Gaskraftwerke** sind jedoch das stabilisierende Rückgrat jedes Energiesystems, um die Versorgung auch in mehrwöchigen wind- und sonnenarmen Phasen sicherzustellen.
- Mit einer flexiblen Verbrauchs- und Speichersteuerung in Haushalten und Industrie (**Demand-Side-Management**) lassen sich kurzfristige Stromschwankungen am kostengünstigsten ausgleichen.
- **Langzeitspeicher** lohnen sich erst ab einer CO₂-Einsparung über 80 Prozent – bis dahin ist es kostengünstiger, mit überschüssigem Strom zunächst den Wärmesektor zu versorgen und verbleibende Erzeugungsspitzen abzuregeln.

Gestaltungsoptionen für das Stromsystem

Welchen Einfluss haben die CO₂-Minderungsziele?

Windenergie und Photovoltaik sind die wichtigsten Erzeugungstechnologien für die Stromversorgung 2050. Geht man davon aus, dass der Preis für CO₂-Emissionszertifikate bis zum Jahr 2050 deutlich steigen wird, ist die Stromerzeugung mit hohem Wind- und Photovoltaikanteil in der Regel günstiger als mit einem von fossilen Energien dominierten Kraftwerkspark heutiger Prägung.

Die schwankende Einspeisung aus Wind- und Photovoltaik erfordert den Einsatz von Flexibilitätstechnologien. **Gasturbinen- sowie Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerke** sind künftig das Rückgrat einer gesicherten und zuverlässigen Stromversorgung, zu der es wenige Alternativen gibt. Abhängig davon, wie viel Kohlendioxid tatsächlich eingespart werden muss und wie hoch der Anteil erneuerbarer Energien ist, werden diese Kraftwerke mit Erdgas, mit Biogas oder als Teil von Speichersystemen mit Wasserstoff oder synthetischem Methan betrieben. Sind die Anlagen mit variabler Gasfeuerung ausgelegt, ermöglichen sie eine sukzessive Umstellung auf erneuerbare Brennstoffe.

Wie könnte ein Stromsystem mit 100 Prozent Erneuerbaren aussehen?

Bei einem **hohen Wind- und Photovoltaikanteil von 80 bis 95 Prozent** ist eine Option, den verbleibenden Strombedarf durch Bioenergie abzudecken. Hierzu wäre allerdings bis zu doppelt so viel **Biogas** erforderlich wie heute. Wie viel Biomasse tatsächlich für den Stromsektor zur Verfügung steht, kann nur im Rahmen einer nationalen Biomassestrategie entschieden werden. Sie muss sowohl Nutzungskonkurrenzen als auch ökologische und soziale Folgen des Anbaus berücksichtigen. Alternativ könnten deutlich mehr Wind- und Photovoltaikanlagen zusammen mit saisonalen Gasspeichern installiert werden als rechnerisch zur Deckung des Strombedarfs erforderlich sind (Überinstallation). In diesem Fall würde für den Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage weniger als die Hälfte dessen benötigt, was heute an Biogas eingesetzt wird. In besonders wind- und sonnenreichen Zeiten würden die zusätzlichen Wind- und Photovoltaikanlagen abgeregelt.

Bei einem **niedrigen Anteil an Wind und Photovoltaik** wären **solarthermische Kraftwerke** mit integrierten Wärmespeichern (Concentrated Solar Power) als Ergänzung zu Windkraft und Photovoltaik vergleichsweise kostengünstig. Von Südeuropa oder Nordafrika aus könnten sie Deutschland über transeuropäische Stromnetze versorgen. Die Voraussetzung: Erzeugerländer und „Transitstaaten“ gewährleisten die für den Stromtransport erforderliche Rechtssicherheit. Falls noch geringe Restemissionen erlaubt sind, kann der zusätzliche Strombedarf am kostengünstigsten durch Erdgaskraftwerke gedeckt werden. Ohne Erdgas und Solarthermie könnte die Geothermie die Lücke schließen, allerdings verbunden mit relativ hohen Kosten. Falls noch geringe Restemissionen erlaubt sind, kann der zusätzliche Strombedarf am kostengünstigsten durch Erdgaskraftwerke gedeckt werden. Ohne Erdgas und Solarthermie könnte die geothermische Stromerzeugung die Lücke schließen, allerdings verbunden mit relativ hohen Kosten.

Zentrale oder dezentrale Erzeugung?

Insgesamt sind Systeme mit starkem Übertragungsnetzausbau sowie dem kombinierten Einsatz von dezentralen und zentralen Kraftwerkstechnologien günstiger als rein dezentrale Systeme. Lässt man die Verteilnetze außen vor, sind die Stromgestehungskosten eines dezentralen Systems rund zehn Prozent höher (nur Anlagen mit einer Leistung unter 100 Megawatt, 90 Prozent Wind und Photovoltaikanteil). Je niedriger der Wind- und Photovoltaikanteil, desto höher sind die Mehrkosten. Deshalb sollte ein hoher Grad an Dezentralität mit einem starken Ausbau von Wind- und Photovoltaikanlagen in allen Teilen Deutschlands, insbesondere nahe der Verbrauchszentren einhergehen.

Umfragen zeigen, dass kleine, dezentrale Anlagen in der Bevölkerung mehr Zustimmung finden als große, zentrale Anlagen. Darüber hinaus stößt der Netzausbau teilweise auf vehementen Widerstand. Bei der Entscheidung für eine zentrale oder dezentrale Architektur der Stromversorgung müssen daher auch die gesellschaftlichen Präferenzen berücksichtigt werden.

Welche Rolle können Speicher in Zukunft spielen?

Das wichtigste Unterscheidungsmerkmal der zahlreichen Speichertechnologien ist die Dauer, für die Energie aufgenommen oder abgegeben werden kann. Als **Kurzzeitspeicher** zur Überbrückung einiger Stunden können Pump- und Druckluftspeicher sowie eigens für diesen Zweck installierte Batterien dienen. Wesentlich kostengünstiger wäre jedoch das Demand-Side-Management, das heißt die gezielte Steuerung der Stromnachfrage von Haushalten oder Industrieunternehmen. Denn 2050 wird es sehr wahrscheinlich so viele Photovoltaik- und Elektrofahrzeug-Batterien, elektrische Heiz- und Warmwassersysteme mit thermischen Speichern sowie steuerbare Haushaltsgeräte geben, dass sie den gesamten Kurzzeitspeicherbedarf abdecken können. Die Herausforderung: Flächendeckend wird intelligente Steuerungstechnik benötigt, mit der sich Geräte in Haushalten und Unternehmen „fernsteuern“ lassen. Die Verbraucher wiederum müssten bereit sein, die Steuerungseingriffe zu akzeptieren.

Mehrwöchige wind- und sonnenarme Phasen („Dunkelflauten“) lassen sich technisch sowohl mithilfe von **Langzeitspeichern** als auch **flexiblen Erzeugern** (zum Beispiel Gaskraftwerken) überbrücken. Für die Langzeitspeicherung muss Strom in Wasserstoff oder in einem weiteren Schritt in Methan umgewandelt werden (Power-to-Gas), das später in Gaskraftwerken rückverstromt wird.

Langzeitspeicher kommen vor allem dann zum Einsatz, wenn die Klimaschutzziele sehr ambitioniert und die Möglichkeiten zur flexiblen Stromerzeugung begrenzt sind (zum Beispiel, wenn wenig Biomasse zur Energiegewinnung verfügbar ist). Bis zu einer Einsparung von 80 Prozent CO₂ lohnen sich Langzeitspeicher dagegen kaum und es ist kostengünstiger, den Überschussstrom dem Wärmemarkt zur Verfügung zu stellen und bis zu zehn Prozent abzuregeln. Bei hohen Anteilen fluktuierender erneuerbarer Energien können Langzeitspeicher allerdings auch gezielt installiert werden, um die Stromversorgung unabhängiger vom Erdgasimport zu machen.

Wie können Stromüberschüsse verwendet werden?

Power-to-Heat ist eine kostengünstige Möglichkeit, überschüssigen Strom aus erneuerbaren Energien sinnvoll zu verwenden, da die Investitionskosten gering sind. In den Warmwassertanks klassischer Heizsysteme werden zusätzlich zu den Erdgas- oder Erdölbrennern Tauchsieder installiert. Sie erhitzen das Wasser, wenn überschüssiger Wind- und Photovoltaikstrom zur Verfügung steht, so dass sich der Gas- beziehungsweise Ölverbrauch reduzieren lässt.

Der Einsatz von **Power-to-Gas** als reine Flexibilitätstechnologie lohnt sich wohl erst, wenn eine erhebliche Überinstallation von Wind- und Photovoltaik-Anlagen erfolgt, um auch andere Sektoren zu elektrifizieren und damit zu dekarbonisieren. Der Grund: Die Investitionskosten der Elektrolyseure und Methanisierungsanlagen sind so hoch, dass sich der Betrieb nur bei einer hohen Auslastung lohnt.

Geringere Abhängigkeit von Energieimporten – was sind die Folgen?

Erdgaskraftwerke sind flexibel regelbar, kostengünstig und verursachen im Vergleich zu Kohlekraftwerken geringere CO₂-Emissionen. Dies führt in einigen Szenarien dazu, dass der Erdgasverbrauch 2050 etwa doppelt so hoch wie heute ist. Die damit verbundene Abhängigkeit von Erdgas-Importen birgt jedoch Risiken für die Versorgungssicherheit. Reduzieren lässt sich der Erdgaseinsatz durch einen hohen Anteil an Wind- und Photovoltaikstrom, die gezielte Langzeitspeicherung von Überschüssen und einen hohen Einsatz von Biogas.

Auch **Braunkohle** mit **Carbon Capture and Storage (CCS)** wäre eine Option sowohl den Erdgas- als auch den Biogasbedarf zu verringern. Derzeit ist jedoch nicht absehbar, dass der Einsatz der CCS-Technologie von der Gesellschaft mitgetragen würde.

Eine weitere Alternative ist die **geothermische Stromerzeugung**. Allerdings müssten die Kosten der Technologie um 75 Prozent sinken, um damit wirtschaftlich vertretbare Stromgestehungskosten zu erzielen – ein äußerst ambitioniertes Ziel, das erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erfordern würde. Wie auch Braunkohlekraftwerke erfordern geothermische Kraftwerke zudem immer eine hohe Auslastung, um wirtschaftlich zu sein. Daher kommen beide Technologien nur bei einem eher geringen Wind- und Photovoltaikanteil in Frage.

Modellrechnungen und Arbeitsweise

Ausgehend von repräsentativen Energieszenarien wurde der jeweilige Flexibilitätsbedarf ermittelt. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für Modellrechnungen: Auf Basis des Wind- und Photovoltaikanteils sowie des Stromverbrauchs der Energieszenarien wurde das Portfolio der Flexibilitätstechnologien so berechnet, dass die mittleren Stromgestehungskosten möglichst gering sind.

Um die Technologien im Modell realistisch abbilden zu können, haben mehr als hundert Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft die Flexibilitätstechnologien für das Jahr 2050 analysiert und deren technischen Fortschritte sowie Kostenentwicklungen abgeschätzt. Mögliche Hindernisse durch Materialengpässe, fehlende Akzeptanz und rechtliche Rahmenbedingungen wurden ebenfalls ermittelt.

Auf dieser Basis wurden rund 130 mögliche Konstellationen des Stromsystems berechnet. Ihnen liegen jeweils unterschiedliche politisch-gesellschaftliche Rahmenbedingungen zugrunde, etwa unterschiedlich hohe CO₂-Einsparziele, Präferenzen für bestimmte Technologien oder geopolitische Risiken.

Modellierung von Energieszenarien

Mit Hilfe der technisch-ökonomischen Modellierung lassen sich Szenarien entwerfen, die zeigen, wie die Energieversorgung hin zu mehr erneuerbaren Energien umgebaut werden kann, und wie sich dies auf CO₂-Emissionen und volkswirtschaftliche Kosten auswirkt.

Um Energiesysteme abzubilden, wurden zunehmend aufwendige Berechnungsmodelle entwickelt. Die Rechenzeit beträgt mehrere Tage bis Wochen, sodass für eine Studie meist nur eine sehr begrenzte Zahl an Modellrechnungen durchgeführt werden kann. Darüber hinaus lassen sich Ergebnisse unterschiedlicher Szenariostudien kaum miteinander vergleichen, da sich Modellierungsansätze und Annahmen stark unterscheiden.

Hier setzt die der Stellungnahme zugrunde liegende Methode an: Mit dem Rechenmodell lässt sich innerhalb weniger Minuten eine überschlägige Auslegung der Stromversorgung ermitteln. Die Arbeitsgruppe hat es genutzt, um eine große Zahl alternativer Systemkonstellationen zu entwerfen, welche die Bandbreite möglicher Entwicklungen der Stromversorgung gut abdecken. Auf diese Weise lassen sich unterschiedlich ausgestaltete Stromsysteme direkt miteinander vergleichen und der Einfluss verschiedener Rahmenbedingungen bewerten.

Vereinfachungen und Annahmen

Die Berechnungen beschränken sich auf Deutschland, Kapazitäten zur Bereitstellung von Flexibilität in den europäischen Nachbarländern wurden nicht berücksichtigt. Im Fokus steht außerdem das Stromsystem. Die Sektoren Wärme und Verkehr wurden nur insofern einbezogen als sie gesicherte ganzjährige Flexibilität für das Stromsystem liefern können. So wurden beispielsweise die Prozesswärme in der Industrie berücksichtigt, nicht aber Gebäudeheizungen.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass alle Anlagen im Jahr 2050 „auf der grünen Wiese“ neu errichtet werden. Tatsächlich setzen technische und wirtschaftliche Fortschritte wie Wirkungsgradsteigerungen und Kostensenkungen in der Regel voraus, dass die Technologien fortlaufend weiterentwickelt werden. Die damit verbundenen Kosten der Systemtransformation sind somit nicht erfasst. Gleiches gilt für Marktmodelle, die in der Praxis andere Systemkonstellationen begünstigen. So könnten etwa Verbraucher wesentlich mehr eigene Speicher installieren, um ihre betriebswirtschaftlichen Kosten zu optimieren.

Das Akademienprojekt „Energiesysteme der Zukunft“

Die Stellungnahme „Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050“ ist im Rahmen des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“ entstanden. Acht Arbeitsgruppen (AGs) bündeln fachliche Kompetenzen und identifizieren relevante Problemstellungen. Interdisziplinär zusammengesetzte Ad-hoc-Gruppen erarbeiten dazu anschließend Handlungsoptionen. Die vorliegende Stellungnahme wurde von der Ad-hoc-Gruppe „Flexibilitätskonzepte“ erarbeitet.

Mitwirkende der Ad-hoc-Gruppe

Zur Ad-hoc-Gruppe gehörten elf Fachgruppen mit rund 100 Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie. Neben Naturwissenschaftlern und Ingenieuren waren auch Wirtschaftswissenschaftler, Psychologen, Politik- und Sozialwissenschaftler vertreten.

Leitung: Prof. Dr. Peter Elsner (Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie), Prof. Dr. Dirk Uwe Sauer (RWTH Aachen)

Wissenschaftliche Referenten: Dr. Berit Erlach (acatech), Benedikt Lunz (RWTH Aachen), Dr. Matthias Merzkirch (Karlsruher Institut für Technologie)

Kontakt:

Dr. Ulrich Glotzbach
Leiter der Koordinierungsstelle Energiesysteme der Zukunft
Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a, 10117 Berlin
Tel.: +49 (0)30 206 79 57-32
E-Mail: glotzbach@acatech.de

Die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und die Union der deutschen Akademien der Wissenschaften unterstützen Politik und Gesellschaft unabhängig und wissenschaftsbasiert bei der Beantwortung von Zukunftsfragen zu aktuellen Themen. Die Akademiemitglieder und weitere Experten sind hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus dem In- und Ausland. In interdisziplinären Arbeitsgruppen erarbeiten sie Stellungnahmen, die nach externer Begutachtung vom Ständigen Ausschuss der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina verabschiedet und anschließend in der *Schriftenreihe zur wissenschaftsbasierten Politikberatung* veröffentlicht werden.

Deutsche Akademie der
Naturforscher Leopoldina e. V. –
Nationale Akademie der
Wissenschaften
Jägerberg 1
06108 Halle (Saale)
Tel.: (0345) 472 39-867
Fax: (0345) 472 39-839
E-Mail: politikberatung@leopoldina.org
Berliner Büro:
Reinhardtstraße 14
10117 Berlin

acatech – Deutsche Akademie
der Technikwissenschaften
Residenz München,
Hofgartenstraße 2
80539 München
Tel.: (089) 5 20 30 9-0
Fax: (089) 5 20 30 9-9
E-Mail: info@acatech.de
Hauptstadtbüro:
Pariser Platz 4a
10117 Berlin

Union der deutschen Akademien
der Wissenschaften
Geschwister-Scholl-Straße 2
55131 Mainz
Tel.: (06131) 218528-10
Fax: (06131) 218528-11
E-Mail: info@akademienunion.de
Berliner Büro:
Jägerstraße 22/23
10117 Berlin